

JSR C

E-ISSN: 2117 - 8633
Number 2
December 2021

JOURNAL OF SCIENTIFIC REPORTS C

JOURNAL OF SCIENTIFIC REPORTS C - DECEMBER 2021 - NUMBER 2



Kutahya Dumlupınar University Scientific Reports C
Evliya Celebi Campus Tavsanlı Road 10 KM. 43270 Kutahya
Phone : (0274) 443 19 29 - 30
E-mail : joursrc@gmail.com
www.gsjsrcc.com

Dumlupınar University Press

gate of
science



Sahibi

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi adına
Prof. Dr. Kazım UYSAL (Rektör)
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü adına
Doç. Dr. Arif KOLAY (Enstitü Müdürü)

Owner

On Behalf of Kütahya Dumlupınar University
Prof. Dr. Kazım UYSAL (Rector),
On Behalf of Institute of Graduate Studies
Assoc. Prof. Dr. Arif KOLAY (Director)

Yayın Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Önder UYSAL	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Maden Mühendisliği
Prof. Dr. Cengiz YENİKAYA	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Kimya
Prof. Dr. Cengiz KARAGÜZEL	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Maden Mühendisliği
Prof. Dr. Gürsel YANIK	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği
Doç. Dr. Cemal PARLAK	Ege Üniversitesi / Fizik
Doç. Dr. Nevzat BEYAZIT	Ondokuz Mayıs Üniversitesi / Çevre Mühendisliği
Doç. Dr. Levent URTEKİN	Ahi Evran Üniversitesi / Makine Mühendisliği
Prof. Dr. Fatih ŞEN	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Biyokimya
Dr. Öğr. Üyesi Ümran ERÇETİN	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Makine Mühendisliği

Journal of Scientific Reports-C dergisi, yayın hayatına 2000 yılında başlayan Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi ayrılmış olup, Haziran ve Aralık aylarında olmak üzere yılda düzenli olarak 2 kez yayımlanan ulusal hakemli bir dergidir. Derginin yazım dili Türkçe ve İngilizce'dir. Dergiye gönderilen makaleler, editör kurulu tarafından seçilen ve konusunda uzman en az iki hakem tarafından değerlendirilmektedir. Dergiye sunulan bütün makaleler çift-körleme yöntemiyle değerlendirilmektedir. Değerlendirilmek üzere dergimize gönderilen makalelerin, daha önce yayınlanmamış, yayınlanmak üzere kabul edilmemiş ve yayınlanmak için başka bir dergide değerlendirilme sürecinde olmaması gerekmektedir. Dergide yayımlanan yazıların her türlü sorumluluğu yazar(lar)ına aittir.

Dergi, fen ve mühendislik bilimlerinde ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan bilimsel çalışmalarını bilim insanları ve kamuoyu ile paylaşmayı amaçlar. Dergiye, fen ve mühendislik bilim dallarında yapılan, özgün araştırma makaleleri, derleme makaleleri ve kısa notlar kabul edilir. Özgün araştırma makalelerinin başka dergilerde yayınlanmamış olması, teorik ve deneysel sonuçlar içermesi beklenir. Derleme makalelerinde ise belirli bir konu üzerinde bilimsel, teknolojik ve güncel gelişmelerin geniş bir kaynakça kullanılarak yansıtılması ve bunların doyurucu bir değerlendirilmesinin yapılması aranır. Kısa notlar, özgün bir çalışmanın ilk bulgularının duyurulması amacıyla yönelik hazırlanan kısa yazılar olmalıdır.

İçerik Politikası

Dergimiz açık erişim dergisi olup, makale değerlendirme süresi 1-2 aydır

Yazışma Adresi: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Yerleşkesi Fen Bilimleri Enstitüsü 43270 KÜTAHYA

Telefon: 0 274 443 19 42

Faks: 0 274 265 20 60

E-posta: joursrc@gmail.com

Web Sayfası: gsjrcc.com

Journal of Scientific Reports-C was separated from Journal of Science and Technology of Dumlupınar University which started its publication life in 2000 and is a national peer-reviewed journal published regularly twice a year in June and December. The language of the journal is Turkish and English. Articles submitted to the journal are evaluated by at least two referees who are experts in the subject and selected by the editorial board. All articles submitted to the journal are evaluated by the double-blind method. Articles submitted to our journal for review should not be previously published, accepted for publication and in the process of being evaluated for publication in another journal. All responsibility for the articles published in the journal belongs to the author(s).

The journal aims to share scientific studies carried out in the fields of science and engineering at national and international level with scientists and the public. Original research articles, review articles and short notes in science and engineering disciplines are accepted for the journal. Original research articles are expected to contain theoretical and experimental results and should not be published in other journals. In the review articles, it is expected that scientific, technological and current developments on a specific subject are reflected by using an extensive bibliography and made a satisfying evaluation of these. Short notes should be brief writings prepared to announce the first findings of an original study.

Editorial Policy

The journal is open access and the article evaluation period is between 1-2 months.

Correspondence Address: Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Evliya Çelebi Yerleşkesi Fen Bilimleri Enstitüsü 43270 KÜTAHYA

Phone: 0 274 443 19 42

Fax: 0 274 265 20 60

E-mail: joursrc@gmail.com

Webpage: gsjrcc.com

Bölüm Editörleri / Section Editors

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering Prof. Dr. M. Çağatay KARABÖRK	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering Prof. Dr. Ramazan KÖSE	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronics Engineering Dr. Öğr. Üyesi Kadir VARDAR	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering Doç. Dr. Doğan AYDIN	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering Dr. Öğr. Üyesi Kerem CİDDİ	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Maden Mühendisliği / Mining Engineering Dr. Öğr. Üyesi Uğur DEMİR	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Jeoloji Mühendisliği / Geology Engineering Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer ÖZBURAN	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering Prof. Dr. İskender IŞIK	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Gıda Mühendisliği / Food Engineering Prof. Dr. Muhammet DÖNMEZ	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering Doç. Dr. Nevzat BEYAZIT	Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Matematik / Mathematics Dr. Öğr. Üyesi Cansu KESKİN	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Fizik / Physics Doç. Dr. Huriye Sanem AYDOĞU	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Kimya / Chemistry Doç. Dr. Bülent ZEYBEK	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Biyoloji / Biology Dr. Öğr. Üyesi Nüket Akalın BİNGÖL	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Biyokimya / Biochemistry Doç. Dr. Derya KOYUNCU ZEYBEK	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
İş Sağlığı ve Güvenliği / Occupational Health and Safety Prof. Dr. Cem ŞENSÖĞÜT	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Danışma Kurulu / Advisory Board

Prof. Dr. Sibel AKAR	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Kimya
Prof. Dr. Abdurrahman AKTÜMSEK	Selçuk Üniversitesi / Biyoloji
Prof. Dr. Mustafa ALTUNOK	Gazi Üniversitesi / Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği
Prof. Dr. Uğur ARİFOĞLU	Sakarya Üniversitesi / Elektrik-Elektr. Mühendisliği
Prof. Dr. Oktay ARSLAN	Balıkesir Üniversitesi / Kimya
Prof. Dr. Şükrü ASLAN	Sivas Cumhuriyet Üniversitesi / Çevre Mühendisliği
Prof. Dr. Ülfet ATAV	Selçuk Üniversitesi / Fizik
Prof. Dr. Mustafa BAYRAKTAR	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi / Matematik
Prof. Dr. Niyazi BİLİM	Konya Teknik Üniversitesi / Maden Mühendisliği
Prof. Dr. İsmail BOZTOSUN	Akdeniz Üniversitesi / Fizik
Prof. Dr. Erdal ÇELİK	Dokuz Eylül Üniversitesi / Metalurji Malzeme Müh.
Prof. Dr. Hayri DAYIOĞLU	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Biyoloji
Prof. Dr. Muhammet DÖNMEZ	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Gıda Mühendisliği
Prof. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Elektrik-Elektr. Müh.
Prof. Dr. İsmail Göktay EDİZ	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Maden Mühendisliği
Prof. Dr. İsmail EKİNCİOĞLU	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Matematik
Prof. Dr. Kaan ERARSLAN	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Maden Mühendisliği
Prof. Dr. Zeynal Abiddin ERGÜLER	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği
Prof. Dr. Seyhan FIRAT	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği
Prof. Dr. Remzi GÖREN	Sakarya Üniversitesi / Met. Malzeme Müh.
Prof. Dr. Rasim İPEK	Ege Üniversitesi / Makine Mühendisliği
Prof. Dr. Refail KASIMBEYLİ	Eskişehir Teknik Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği
Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ	Selçuk Üniversitesi / Fizik
Prof. Dr. Yaşar KİBİCİ	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği
Prof. Dr. İsmail KOCAÇALIŞKAN	Yıldız Teknik Üniversitesi / Moleküler Biy. ve Genetik
Prof. Dr. Mahmut KOÇAK	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Mat.-Bilgisayar
Prof. Dr. Muhsin KONUK	Üsküdar Üniversitesi / Moleküler Biy. ve Genetik
Prof. Dr. Mustafa KURU	Başkent Üniversitesi / Moleküler Biy. ve Genetik
Prof. Dr. Ömer İrfan KÜFREVİOĞLU	Atatürk Üniversitesi / Biyokimya
Prof. Dr. Halim MUTLU	Ankara Üniversitesi / Jeoloji Mühendisliği
Prof. Dr. Ekrem SAVAŞ	İstanbul Ticaret Üniversitesi / Matematik
Prof. Dr. Murat TANIŞLI	Eskişehir Teknik Üniversitesi / Fizik
Prof. Dr. Ali Rehber TÜRKER	Gazi Üniversitesi / Kimya
Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN	Giresun Üniversitesi / Biyoloji
Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT	İstanbul Medeniyet Üniversitesi / Fizik Mühendisliği
Prof. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği
Prof. Dr. Nurettin YAYLI	Karadeniz Teknik Üniversitesi / Eczacılık
Prof. Dr. Yusuf YAYLI	Ankara Üniversitesi / Matematik
Prof. Dr. Elçin YUSUFOĞLU	Uşak Üniversitesi / Matematik
Prof. Dr. Hüseyin Serdar YÜCESU	Gazi Üniversitesi / Otomotiv Mühendisliği
Prof. Dr. Mehmet Tevfik ZEYREK	Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Fizik

JOURNAL OF SCIENTIFIC REPORTS-C

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ / RESEARCH ARTICLES

A Compact 2-Way Multisection Power Divider for Broadband Operations 1-10
Galip Orkun ARICAN*

Effects of Biomass Fly Ash in Municipal Solid Waste Composting 11-17
Hale DOĞAN^{1,*}, Nurdan Gamze TURAN²

DERLEMELER / REVIEW ARTICLES

Alt Ekstremitenin Robotik Rehabilitasyonu 18-31
Lower-Limb Robotic Rehabilitation
Kemal Cem KÖSE*



A COMPACT 2-WAY MULTISECTION POWER DIVIDER for BROADBAND OPERATIONS

Galip Orkun ARICAN*

ASELSAN Inc., Communication and Information Technologies Division, Ankara, goarican@aselsan.com.tr,
ORCID: 0000-0002-9375-886X

Geliş Tarihi (Received Date):29.04.2022

Kabul Tarihi (Accepted Date):16.06.2022

ABSTRACT

This paper represents a broadband 2-ways Wilkinson power divider for S-band (2-4 GHz), C-band (4-8 GHz) and X-bands (8-12 GHz) applications. The broadband design is proposed by dint of a multisection Wilkinson power divider topology with utilizing the microstrip technology on a single layer printed circuit board. The proposed design has a 7-sections to achieve an operating frequency bandwidth of 2-12 GHz. The surface mount resistors are utilized in the design to enhance the isolation between the output ports. In addition, a prototype of the proposed design is manufactured on a Rogers 4003C and the 0402 package surface mount resistors are soldered between the output ports of each section. The prototype has input reflection coefficient better than -15 dB, -20 dB and -10 dB, respectively in the S-, C-, X-bands. Moreover, the prototype has output reflection coefficients better -17 dB, -20 dB and -10 dB, respectively in the S-, C- and X-bands. The measured insertion loss is less than -5 dB. Furthermore, the isolation between the output ports is better than -10 dB, -17 dB and -15 dB, respectively in the S-, C- and X-bands. Furthermore, the total phase variation between the output ports are less than 1.8° in the frequency range from 2 to 12 GHz. The prototyped multisection 2-way power divider illustrates a broadband characteristic with better phase imbalance and the measurement and simulation results are close to each other. The total size of the prototype is 4x41 mm².

Keywords: *Wilkinson power divider, broadband, multisection, coupled line, compact*

1. INTRODUCTION

The power divider is one of the crucial passive device that is widely utilized in the modern communication systems [1]. The advantages of the microstrip power dividers are easy-manufacturing, low-cost, light-weight, low-loss and high electrical performance. In addition, the conventional Wilkinson power divider (WPD) is consisted of three ports, one of them is utilized as an input and the other two ports are utilized as the output ports [2]. In order to accomplish a low-loss characteristic, the output ports of the WPD are matched to the characteristic impedance of Z_0 [3]. Moreover, the WPD splits the incident power into the two output powers with equal phase and equal amplitude [4]. WPD has a simple structure that is formed with two quarter wavelength ($\lambda/4$) transmission line with the characteristic impedance of $\sqrt{2}Z_0$ and $2Z_0$ resistor for isolation between the outputs [5]. These advantages give power dividers opportunity to utilize in a numerous application area such as

amplifiers, mixer, antenna feeding network, phase detectors etc. [6-9]. On the other hand, the conventional power dividers have a narrow frequency bandwidth and mostly designed to operate in a single frequency [10]. However, the narrow band performance is usually undesirable for many of the microwave applications.

In the literature, there are various techniques to enhance the frequency bandwidth such as tapered transmission lines, complementary conducting strip transmission lines, port expansion and multisection [11-14]. Among these techniques, the multisection WPD can be utilized to achieve broadband performance while having a reduced size with optimizing the characteristic impedances of the coupled lines in each section.

In this letter, two-way WPD with 7-sections is designed to work in the frequency range from 2 to 12 GHz. The proposed design has seven sections to achieve the broadband performance and seven isolation resistors at the output ports of each section. The prototype of the proposed design is manufactured on a Rogers 4003C substrate with the relative permittivity of 3.55 and the dielectric thickness of 0.508 mm. In addition, the prototyped WPD has input and output (I/O) reflection coefficients better than -10 dB and -12 dB, respectively in the operating frequency band from 2 to 12 GHz. In addition, the insertion loss is less than -5 dB in the 2-12 GHz, while the isolation is less than -10 dB and -15 dB in the frequency bands from 2 to 12 GHz and from 5 to 12 GHz, respectively.

2. MATERIALS AND METHODS

Wilkinson power divider (WPD) is a passive radio frequency (RF) component that capable of splitting the incident signal into two outputs with equal phase and amplitude by the dint of two symmetrically connected $\lambda/4$ transmission line with the characteristic impedance of $\sqrt{2}Z_0$ and a $2Z_0$ resistor for isolation between the output ports. Since the conventional 2-way WPD has a narrow frequency bandwidth, in the design the 2-way multisection WPD with the coupled lines is utilized to broaden the frequency bandwidth while reducing the total circuit size. Figure 1(a) depicts the schematic of the proposed 7-section WPD. In addition, Figure 1 (b) and 1 (c) depicts the even and odd mode equivalent circuits of the proposed WPD. In the schematics, i denotes the number of the section, Z_{ie} and Z_{io} denote the even/odd impedances of the transmission lines, θ_i denotes the electrical length of the coupled lines and R_i denotes the isolation resistors in each section.

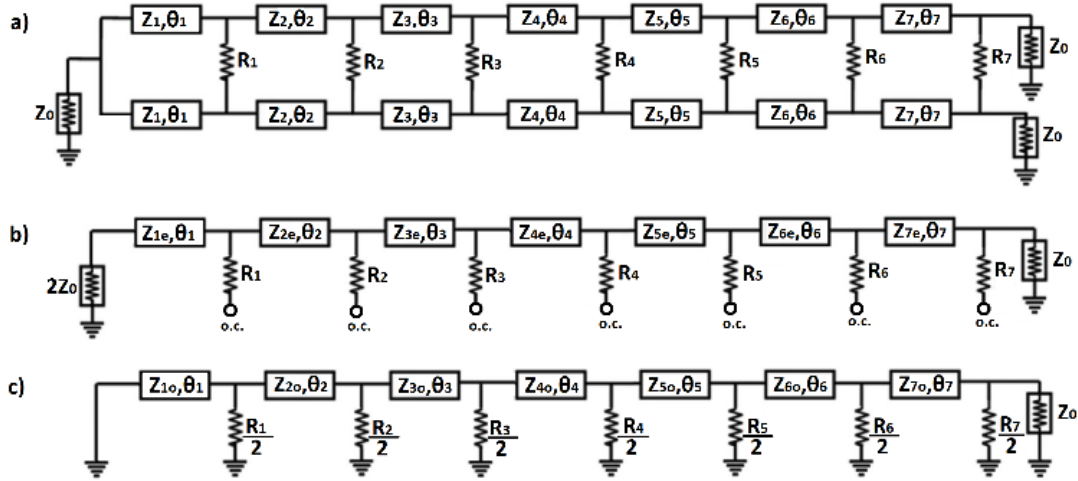


Figure 1. a) The schematic of the proposed WPD b) even- and c) odd-mode equivalent circuit.

In the even mode the input impedance of $2Z_0$ need to be matched to the output characteristic impedance of Z_0 at seven different frequencies. On the other hand, in the odd mode the characteristic output impedance of Z_0 is matched to the short circuit. In the even/odd mode analysis, the characteristic impedances of the equivalent circuit are calculated for center frequency of 7 GHz as in the Table 1. In addition, the coupled lines' impedances are calculated with utilizing the Equation 1.

$$Z_i = \sqrt{Z_{ie}Z_{io}} \quad (1)$$

Table 1. The characteristic impedance of the coupled lines.

i	Z_i (Ω)	Z_{ie} (Ω)	Z_{io} (Ω)	θ_i ($^\circ$)
1	71.04	75.82	66.56	104.6
2	66.76	71.19	62.61	70.05
3	65.49	69.82	61.44	70.15
4	57.79	61.47	54.33	79.61
5	48.98	51.93	46.21	78.74
6	42.60	45.03	40.31	90.35
7	42.12	44.50	39.86	72.34

In the design, each section is designed with the coupled lines and the distance between the each coupled line is kept equal to each other. In addition, the outputs of each section are terminated with the isolation resistor to enhance the isolation performance. Moreover, the Keysight's ADS Momentum tool is utilized to design the layout and the method of moment (MoM) method is utilized in the electromagnetic (EM) simulations. In the layout design, the output ports are located at the different sides of the printed circuit board (PCB) to mount the South West SMA-female connector. Figure 2

depicts the layout of the proposed WPD. Table 2 illustrates the dimension of coupled lines and values of the isolation resistor. In the layout design, W_i , L_i denote, respectively, the width and length of coupled line, S_i denotes the space between coupled line in the i^{th} section and R_i denotes the value of the isolation resistor of the i^{th} section.

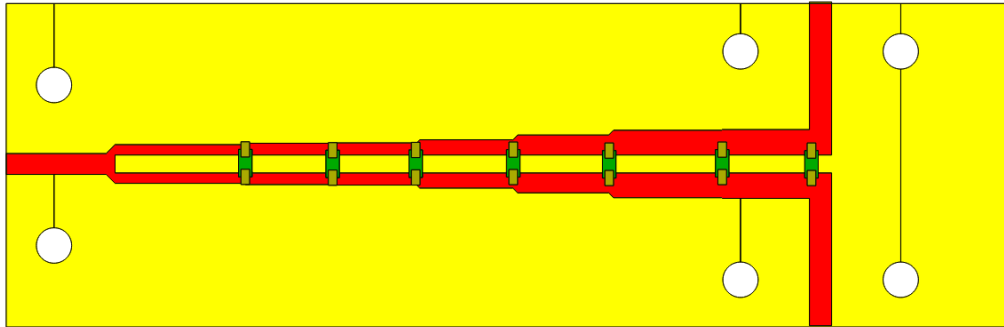


Figure 2. The layout of the proposed WPD.

Table 2. The dimension of the proposed WPD.

i	W_i (μm)	S_i (μm)	L_i (μm)	R_i (Ω)
1	609	1041	7620	10
2	686	1041	5080	10
3	711	1041	5080	10
4	889	1041	5715	10
5	1168	1041	5588	24
6	1448	1041	6350	51
7	1473	1041	5080	150

3. FABRICATION and MEASUREMENTS

To validate the design, the proposed WPD is manufactured on Rogers 4003C with the relative permittivity of 3.55, the thicknesses of the dielectric and copper are 0.508 mm and 35 μm , respectively. In addition, the S-parameter measurement is performed with using Keysight N5224B PNA in ASELSAN Inc. Figure 3 illustrates the photography of the prototyped WPD. The total occupied area of the design without connectors and 50 Ω transmission lines at the I/O ports is 164 mm^2 .

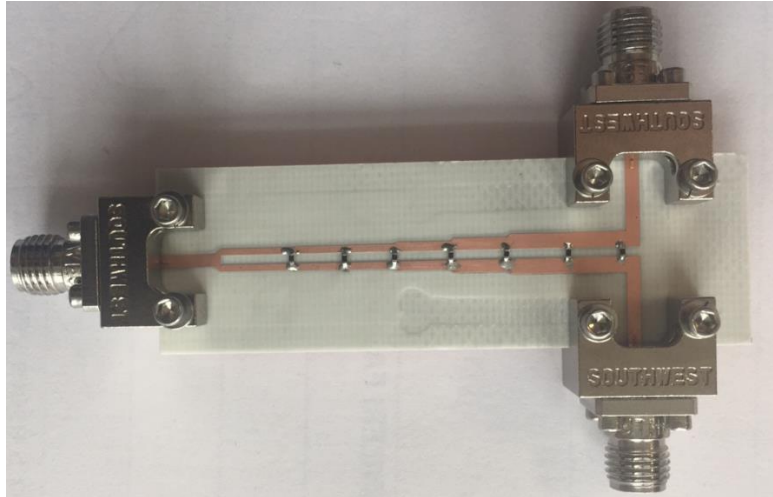


Figure 3. The photography of the prototyped WPD (4x41 mm).

Figure 4 illustrates the simulated and measured input reflection coefficient $|S_{11}|$ of the proposed design. According to the measurement results, it is observed that the measured $|S_{11}|$ of the prototype is better than -15 dB, -20 dB and -10 dB in the S-, C- and X-bands, respectively.

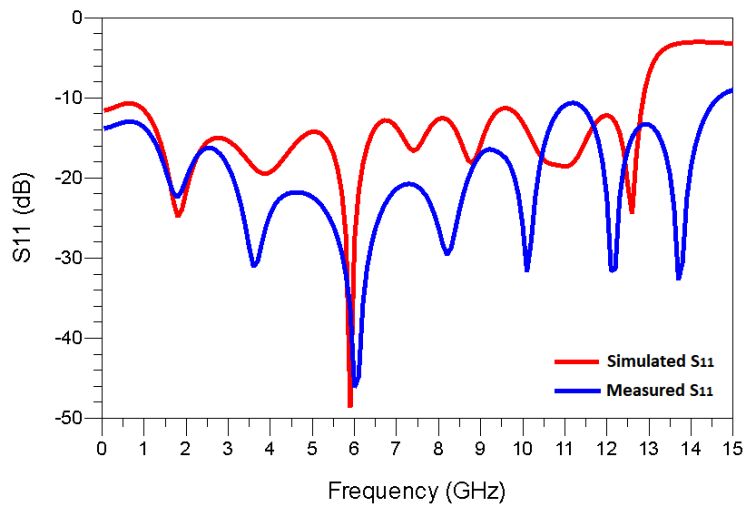


Figure 4. The S-parameter measurement and EM simulation results of the proposed WPD.

Figure 5 illustrates the simulated and measured output reflection coefficients ($|S_{22}|$ & $|S_{33}|$) of the proposed design. According to the measurement results, it is observed that the measured $|S_{22}|$ and $|S_{33}|$ of the prototype is better than -17 dB, -20 dB and -10 dB, respectively in the S-, C- and X-bands.

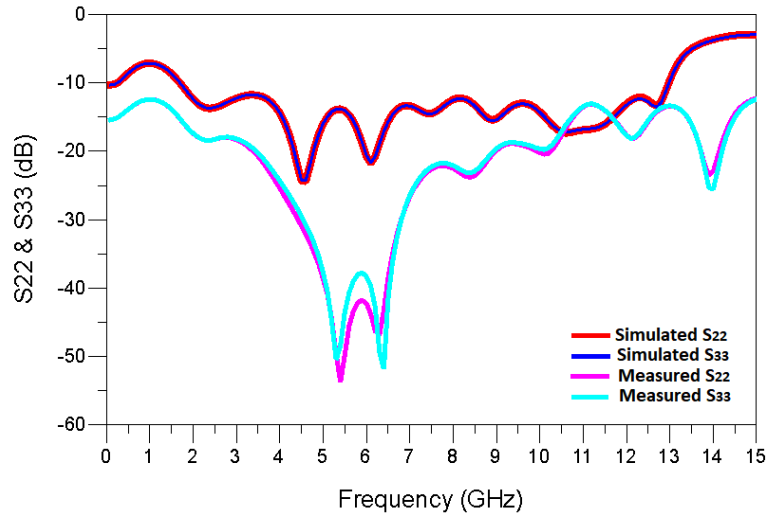


Figure 5. The S-parameter measurement and EM simulation results of the proposed WPD.

Figure 6 illustrates the simulated and measured insertion losses ($|S_{21}|$ & $|S_{31}|$) of the proposed design. According to the measurement results, it is observed that the measured $|S_{21}|$ and $|S_{31}|$ of the prototype is less than -4 dB in the S-, C-bands, and less than -5 dB in the X-band.

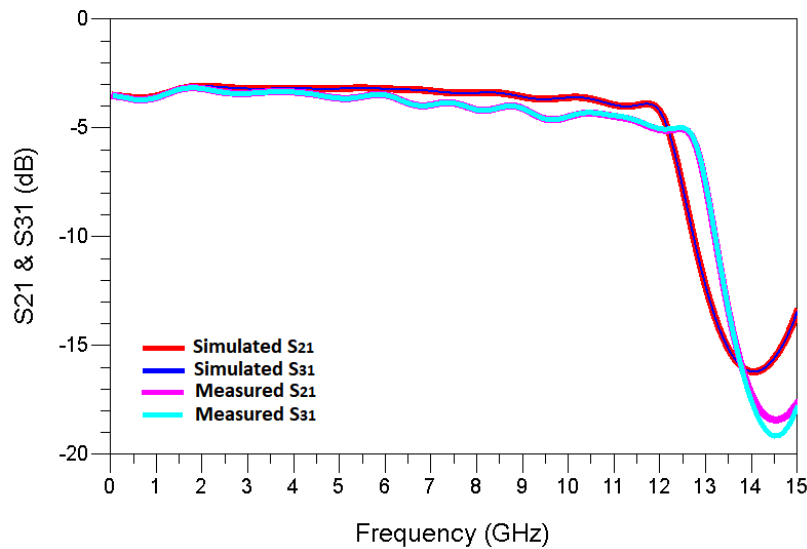


Figure 6. The S-parameter measurement and EM simulation results of the proposed WPD.

Figure 7 illustrates the simulated and measured isolation $|S_{23}|$ of the proposed design. According to the measurement results, it is observed that the measured $|S_{23}|$ of the prototype is better than -10 dB, -17 dB and -15 dB, respectively in the S-, C- and X-bands.

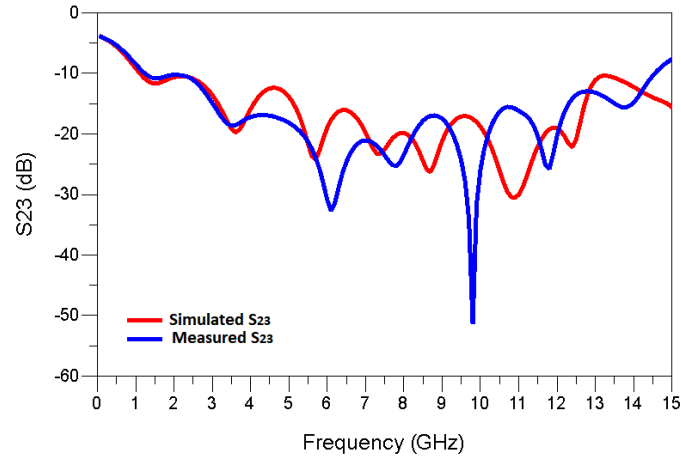


Figure 7. The S-parameter measurement and EM simulation results of the proposed WPD.

Figure 8 illustrates the measured phase variation between the output ports of the proposed design. According to the measurement results, it is observed that the phase variation of the prototype is less than 0.3° , 0.5° and 1° in the S-, C- and X-bands, respectively. Moreover, the total phase variation is less than 1.8° in the bandwidth of 2-12 GHz.

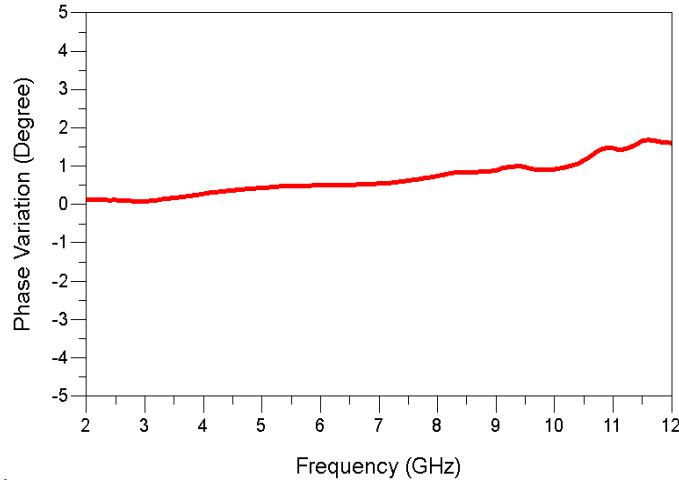


Figure 8. The S-parameter measurement and EM simulation results of the proposed WPD.

Table 3 illustrates the comparison of the simulation and measurement results of WPD. According to the comparison table, it is observed that S-parameter measurement and simulation results are close to each other. On the other hand, the measured bandwidth is approximately 500 MHz broader than the simulated bandwidth. However, the insertion loss is 1 dB higher in the measurements. Nonetheless, the total peak to peak phase variation between the output ports are less than 1.8° in the bandwidth of 2-12 GHz.

Table 3. The comparison of the simulation and measurement results.

	Frequency Bandwidth	Simulation	Measurement
S ₁₁ (dB)	2-4 GHz	-14	-15
	4-8 GHz	-12	-20
	8-12 GHz	-10	-10
S ₂₂ & S ₃₃ (dB)	2-4 GHz	-11	-17
	4-8 GHz	-12	-20
	8-12 GHz	-12	-10
S ₂₁ & S ₃₁ (dB)	2-4 GHz	-3.2	-4
	4-8 GHz	-3.5	-4
	8-12 GHz	-4.2	-5
S ₂₃ (dB)	2-4 GHz	-10	-10
	4-8 GHz	-12	-17
	8-12 GHz	-16	-15
ΔΦ (°)	2-4 GHz	0	0.3
	4-8 GHz	0	0.5
	8-12 GHz	0	1

4. RESULTS

A broadband 2-way multisection Wilkinson power divider is designed with microstrip on printed circuit board technology for S-, C- and X-band applications. The prototyped WPD has I/O reflection coefficients better than -10 dB in the frequency band from 2 to 12 GHz. In addition, the insertion loss is less than -5 dB while the isolation between the output ports is better than -10 dB in the 2-12 GHz. Furthermore, the measured phase variation between the output ports of the prototype is less than 1.8° in the operating frequency bandwidth. The proposed 2-way Wilkinson power divider could be utilized in the broadband RF/microwave applications with its low-cost, compactness and broadband features.

5. DISCUSSION

The measurement results are close to the simulation results. On the other hand, the bandwidth of the prototype is approximately 500 MHz wider than the simulation results. In addition, I/O reflection coefficients of the prototype is better than the measurement results in the S- and C-bands while the measured insertion loss is approximately 1 dB higher than simulation results at the upper frequency bandwidth. It is thought that the slight variation between the simulation and measurement results could be caused by the difference between the resistor model that is utilized in the design and the surface mount resistors that are soldered between the output ports of each section. In addition, the prototyping machine manufacturing tolerances could be caused small variations in the dimension of the coupled lines that can cause small variation in the S-parameter measurements. Moreover, the proposed WPD could be utilized in broadband microwave operations because of having broadband and low-loss characteristics, as well as having an easy and low-cost manufacturing process.

ACKNOWLEDGEMENT

The author would thank ASELSAN Inc. for using the manufacturing and measurement facilities.

REFERENCES

- [1] Jiang, Y., Hu, K., Feng, L., Zhang, H., Shi, Y., Tang, W., & Yu, X. (2021). Ultra wideband lumped Wilkinson power divider on gallium arsenide integrated passive device technology. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31(12), e22898.
- [2] Kasar, Ö., & Kahrıman, M. (2020). A theoretical design of ultra-wideband multisection Wilkinson power divider using Euler polynomials. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(12), 3869-3875.
- [3] Sutbas, B., Ozbay, E., & Atalar, A. (2020). Accurate isolation networks in quadrature couplers and power dividers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68(4), 1148-1152.
- [4] Iqbal, M., Camarchia, V., Pirola, M., & Quaglia, R. (2016, May). A miniaturized wilkinson power divider for ultra wide-band operation. In *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)* (pp. 1-4). IEEE.
- [5] Tas, V., & Atalar, A. (2014). An optimized isolation network for the Wilkinson divider. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 62(12), 3393-3402.
- [6] Mabrok, M., Zakaria, Z., Sutikno, T., & Alhegazi, A. (2019). Wideband power amplifier based on Wilkinson power divider for s-band satellite communications. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 8(4), 1531-1536.
- [7] Yoon, K. C., & Kim, K. G. (2019). Miniaturization of a single-ended mixer using T-shaped Wilkinson power combiner for medical wireless communication applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 61(8), 1977-1982.
- [8] Li, M., Jiang, L., & Yeung, K. L. (2020). A novel wideband decoupling network for two antennas based on the Wilkinson power divider. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(7), 5082-5094.
- [9] Le, T. H., Pham, D. P., Ho, M. C., Dam, X. D., Zhu, X. W., Wang, X., & Liu, P. (2019, October). A two-path output low phase noise local oscillator for RF front-end applications. In *2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)* (pp. 297-301). IEEE.
- [10] Saleh, S., Ismail, W., Abidin, I. S. Z., Jamaluddin, M. H., Bataineh, M. H., & Alzoubi, A. S. (2020). N-way compact ultra-wide band equal and unequal split tapered transmission lines wilkinson power divider. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology (JJCIT)*, 6(3), 291-302.
- [11] Kim, J., & Lee, Y. (2017). A Z -Transform Method for Synthesis of Unequal-Length Multisection Transmission Lines for Multiband Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(9), 3200-3210.

Arican, G.O., Journal of Scientific Reports-C, Sayı 2, 1-10, Aralık 2021.
Arican, G.O, Journal of Scientific Reports-C, Number 2, 1-10, December 2021.

- [12] Kizilbey, O., Bozdemir, S., & Yarman, B. S. (2017, April). 2–10 GHz multisection 2-way Wilkinson power divider with enhanced port match and isolation. In 2017 IEEE 18th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON) (pp. 1-4). IEEE.
- [13] Chen, A., Zhuang, Y., Zhou, J., Huang, Y., & Xing, L. (2018). Design of a broadband Wilkinson power divider with wide range tunable bandwidths by adding a pair of capacitors. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 66(4), 567-571.
- [14] Oraizi, H., & Yousefi, A. (2017). Optimum design of a wideband planar N-way fork power divider with arbitrary power division and input-to-output impedance matching. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 79(1), 83-93.



EFFECTS of BIOMASS FLY ASH IN MUNICIPAL SOLID WASTE COMPOSTING

Hale DOĞAN^{1,*}, Nurdan Gamze TURAN²

¹Ondokuz Mayıs University, Dept. of Environmental Engineering, haledogan@oltankolegluenerji.com, ORCID: 0000-0002-6442-3016

²Ondokuz Mayıs University, Dept. of Environmental Engineering, gturan@omu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6500-6188

Geliş Tarihi (Received Date):08.06.2022

Kabul Tarihi (Accepted Date):21.06.2022

ABSTRACT

In this study, the effect of biomass fly ash (BFA) as co-amendment was assessed on compost maturity and reduction of N loss during municipal solid waste (MSW) composting. Composting experiments were conducted using three ratios of BFA (0, 5 and 10%) in three in-vessel composting reactors for 105 days. MSW showed lower C/N ratio and higher moisture content for composting. Thermophilic temperatures could not be reached in MSW treatment. However, co-amendment of BFA and MSW extended the thermophilic stage and promoted compost maturity. Nitrogen loss from reactors co-amended by BFA and MSW were reduced by compared with the control. While nitrogen loss was 62.75% in MSW treatment, it was 31.58% in 5% BFA treatment and 28.09% in 10% BFA treatment. The results demonstrated that 10% BFA could be a suitable additive to improve the quality of MSW composting.

Keywords: *Biomass fly ash, Municipal solid waste, Composting*

1. INTRODUCTION

Recently, large quantities and various characteristics of wastes have been generated as a result of the changes in consumption habits with the increasing population [1]. The correct management of solid wastes is of great importance in order not to endanger human health and the life of other living things, not to pollute the air, water, and soil, and to use the raw material and energy potential [2]. Living standards of the societies are not affected and sustainable development is ensured with the selection and implementation of the necessary/appropriate method, technology, and management programs (Integrated solid waste management) towards a specific waste management objective [3]. The solid wastes in general consist of organic wastes, metal, paper, plastic, glass and other wastes. The distribution of solid wastes on a globally are 44% organic wastes, 17% paper, 12% plastic, 5% glass, 4% metal and 18% other wastes. It is known that the income level changes the shares in the waste content, and it is observed that the amount of organic waste in the waste composition increases with the decrease in the income level [2].

In the disposal of organic wastes, which have a high share in the solid waste composition, landfilling and incineration ways that are not sustainable are generally applied due to limited space. Composting is gaining importance day by day due to gas and liquid wastes generated in landfills and incineration

processes [4]. Composting is a disposal and recovery method that biodegrades organic materials into a final product called compost [5]. Material mixture and process management factors such as temperature, pH, nutrient content, moisture content, and oxygen content affect the composting process. The nutrient balance, expressed by the C/N ratio, must be between 25 and 35 for the growth and activity of microorganisms [6, 7]. To achieve a good microbial activity, the pH value should be in the range of 5.5 - 8.0 [6, 8]. With regular aeration, the temperature is controlled, while the increase in moisture content and CO₂ content is removed. It is also a source of oxygen for microbial activities. The desired O₂ content in the composting process is 15 -20% [8, 9]. At the beginning of the composting process, the moisture content is expected to be between 50-60% [10]. An increase in moisture content weakens the O₂ transfer between the materials, while its decrease reduces the rate of degradation of organic substances [11]. In the composting process, thermophilic temperatures should be reached to destroy pathogens. However, this temperature must not exceed the tolerance limit (52-60°C) of microorganisms in order to continue microbial activities [6, 8].

By the use of additives in the composting process, it is possible to fast the activity of microorganisms and improve the content of the final compost. Several additive materials have been the focus of research such as hazelnut kernel [12], vermiculite [13], poultry waste [14], zeolite [15], and fly ash [16], etc. Fly ash is a solid waste formed during the combustion of solid fuels, containing metal oxides, unburned carbon, and other inorganic matters [17]. It is known that the use of fly ash in the composting process will improve the quality of the final compost formed due to the carbon in its structure [18].

In the present study, composting of fly ash and municipal solid waste for 105 days was investigated. The scope of the present study is to (i) examine the composting of municipal solid wastes with fly ash, (ii) evaluate the effects of MSW and fly ash mixtures on the physicochemical properties such as temperature, pH, and TN, and (iii) determine the optimum material mixing ratio.

2. MATERIALS and METHOD

2.1. Composting Materials

BFA was obtained from a Biomass Power Plant in Çarşamba, Samsun. Municipal solid waste was collected from a wholesale market hall in Samsun. Organic fraction of municipal solid waste was separated and shredded before the composting. The initial properties of the composting materials were summarized in Table 1.

Table 1. Characteristics of composting materials used in the experiments.

Parameter	BFA	MSW
pH	5.14	7.26
EC (mS/cm)	2.47	2.04
MC (%)	6.13	71.50
Total N (%)	0.11	2.84
TOC (%)	6.29	61.51
C/N	57.18	21.66

2.2. Composting Procedure and Sampling

The composting experiments were carried out in-vessel reactors. The reactors had a volume of 30 L. Air was pumped into each reactor at a rate of 10 L min⁻¹ during the process. A total of three reactors were used in the experiments. The organic fraction of MSW and BFA were mixed at two different ratios. A reactor was filled with only MSW and compared with co-composting reactors. The mixture ratios in reactors are given in Table 2.

Table 2. Mixture ratios in reactors.

Reactor no	Mixture ratio
T1	100% MSW
T2	5% BFA + 95% MSW
T3	10% BFA + 90% MSW

Each composting mixture was turned before every sampling. Temperature was measured daily using a digital dry bulb thermometer within the pile. pH was measured in the aqueous extract (1:10 w/v sample: water extract) using a pH meter with a glass electrode. Moisture content (MC) was determined by drying the sample at 105 °C for 24 h in an oven. All measurements were conducted at least in triplicate, and data are presented as the mean.

3. RESULTS AND DISCUSSION

During the composting process, organic materials are degraded by microorganisms and carbon dioxide and water are formed as aerobic decomposition products. A large amount of energy is released in the form of heat with microbial decomposition. The self-decomposition property of the composting material leads to heat build-up which causes the temperature to rise. The resulting heat ensures the removal of disease-causing microorganisms that are undesirable in the compost. The temperature values observed in the three composting systems examined during the process are shown in Figure 1. Temperature values in all systems increased during the first two weeks. After the second week, the temperature values decreased. There was no significant change was observed in the temperature values after reaching ambient temperature. The pathogenic organisms are generally eliminated at temperatures above 55°C for 1 or 2 days [5]. In MSW treatment the maximum temperature reached to 41.5°C in the thermophilic phase. However, both of the co-amendment treatment reached the required temperature for forced aeration (>55°C). Similar results have been reported by Kabak et al. [14], who indicated that MSW treatment without the addition of any additives failed to reach sufficient thermophilic temperatures in composting.

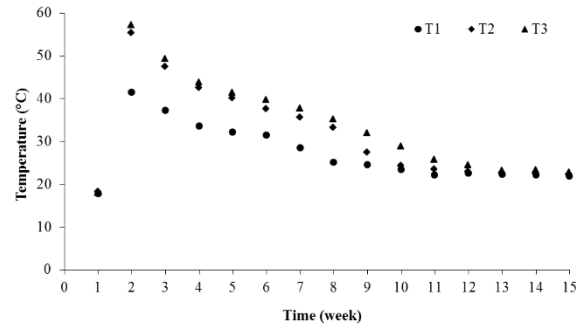


Figure 1. Changes of temperature during the composting process.

The pH values of BFA and MSW were 5.14 and 7.26, respectively. As a result of mixtures of BFA and MSW, the pH values changed between 6.26 and 6.89. The pH change in all systems during the process is graphically shown in Figure 2. In all systems, pH values showed a rapid decrease when the temperature peaked. It is stated that these decreases occur due to the rapid decomposition of organic matter forming CO₂ and organic acids in the thermophilic phase. The pH value increased again in all systems after the second week. The pH changes did not show much oscillation in the last weeks. Optimum pH value for the final compost is between 6.5 and 7.2 [19]. At the end of the composting process, pH value was measured as 8.25, 7.14 and 6.99 in MSW treatment, containing 5% BFA treatment and containing 10% BFA treatment, respectively. Co-amendment treatments provided the optimum pH range in final products. However, pH value of final compost of MSW treatment was not in the optimum range. Similar results have been reported by Turan and Ergun (2008) for MSW composting without any amendment material [15].

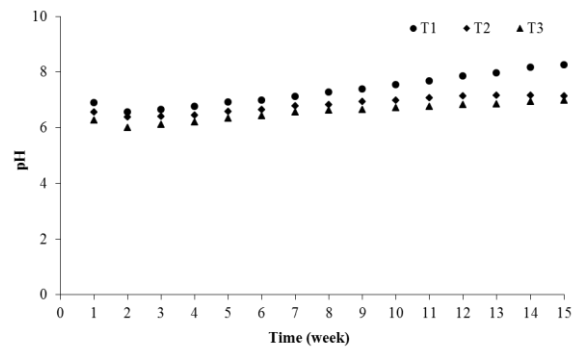


Figure 2. Changes of pH during the composting process.

Nitrogen has an important place in the composting process since it is necessary for the activities and reproduction of microorganisms. Other nutritive elements, which are necessary for the reproduction of microorganisms, are mostly found in organic materials at sufficient levels. Nitrogen content is among the parameters examined in composting processes, since it requires more than inorganic nutrients. The total nitrogen content of MSW and BFA were 2.84 and 0.11, respectively. MSW contains a higher amount of nitrogen than BFA. Total nitrogen content in all treatments decreased during the process.

The most notable reductions were observed at high thermophilic temperatures. The variation of the total nitrogen content observed in the treatments during the composting process is shown in Figure 3.

At the end of the process, the nitrogen loss in each system was calculated. Nitrogen losses are very important due to the potential to pollute underground and surface water resources, to create odor and to reduce the nutrient content of the compost. Approximately 20-77% of the nitrogen contained in animal wastes is lost in the composting process [20] Nutrient losses during composting occur mainly in the form of gas emissions. Martins and Dewes (1992) stated that approximately 47-77% of nitrogen losses are in the gaseous state. An important part of this is in the form of NH_3 , and a small part is in the form of N_2O . Nitrogen losses occur in the form of NH_3 evaporation, especially when the temperature is quite high and the pH is above 7. Low C/N ratio also increases NH_3 losses in poultry waste [21].

The highest nitrogen loss occurred in the system containing 100% MSW with 62.75%. It is thought that nitrogen loss in MSW is due to the high pH and moisture content. Nitrogen loss is reduced by about half in co-amendment treatments compared to control treatment. The nitrogen losses were 31.58% and 28.09% and in the treatments containing 5% and 10% BFA, respectively.

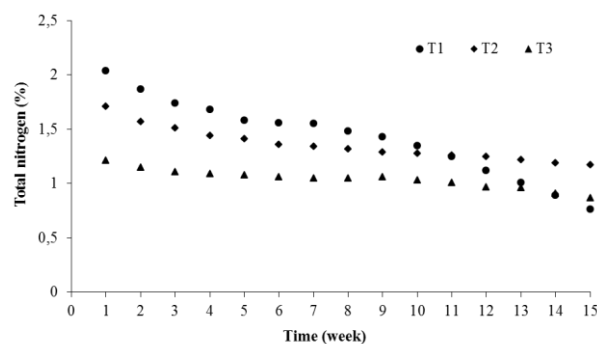


Figure 3. Changes of total nitrogen content during the composting process.

4. CONCLUSIONS

Composting is one of the recommended treatment methods for MSW. However, MSW requires amendments to adjust process conditions for composting. In this study, the effects of BFA as an amendment were investigated in MSW composting. The results showed that BFA as an amendment was obviously effective in improving compost quality and maturity. In addition, it reduced nitrogen loss during the composting process and provided higher thermophilic temperatures. Among different BFA and MSW treatments, 10% BFA treatment obviously decreased TN losses during the composting process. Hence, BFA can be recommended in MSW composting because it both improves the compost properties and does not cost as a waste.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by the scientific research numbered PYO.MUH.1904.21.024 by Ondokuz Mayıs University.

REFERENCES

- [1] Xiao, R., Awasthi, M.K., Li, R., Park, J., Pensky, S.M., Wang, Q., Wang, J.J., Zhang, Z., (2017), Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: A review. *Bioresour. Technol.* 246, 203–213.
- [2] Alshehrei, F., Ameen, F., (2021), Vermicomposting: A management tool to mitigate solid waste. *Saudi J. Biol. Sci.* 28, 3284–3293.
- [3] Tabasaran, O., Kranert, M., Öztürk, İ., (2016), *Katı Atık Yönetimi ve Teknolojileri*. İstac, İstanbul/Turkey.
- [4] Reyes-Torres, M., Oviedo-Ocaña, E.R., Dominguez, I., Komilis, D., Sánchez, A., (2018), A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies. *Waste Manag.* 77, 486–499.
- [5] Haug, R.T., (1993), *The practical handbook of compost engineering*. Lewis Publisher, Florida.
- [6] Bernal, M.P., Albuquerque, J.A., Moral, R., (2009), Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresour. Technol.* 100, 5444–5453.
- [7] Bishop, P.L., Godfrey, C., (1983), Nitrogen transformation during sewage composting. *Biocycle* 24, 34–39.
- [8] Miller, F., (1992), Composting as a process based on the control of ecologically selective factors, in: In: Metting, F.B., Jr. (Ed.), *Soil Microbial Ecology, Applications in Agricultural and Environmental Management*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 515–544.
- [9] Rynk, R., (1992), *On-Farm Composting Handbook*, Monographs of the Society for Research in Child Development. Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, Ithaca, New York.
- [10] Gajalakshmi, S., Abbasi, S.A., 2008. Solid waste management by composting: State of the art, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*.
- [11] Das, K., Keener, H.M., (1997), Moisture Effect on Compaction and Permeability in Composts. *J. Environ. Eng.* 123, 275–281.
- [12] Aycan, N., Turan, N.G., Ozgonenel, O., (2014), Optimization of process parameters for composting of pulp/paper mill sludge with hazelnut kernel using a statistical method. *Environ. Prot. Eng.* 40, 127–138.
- [13] Aycan Dümenci, N., Cagcag Yolcu, O., Aydın Temel, F., Turan, N.G., (2021), Identifying the maturity of co-compost of olive mill waste and natural mineral materials: Modelling via ANN and multi-objective optimization. *Bioresour. Technol.* 338.
- [14] Tuğçe Kabak, E., Cagcag Yolcu, O., Aydın Temel, F., Gamze Turan, N., (2022), Prediction and

optimization of nitrogen losses in co-composting process by using a hybrid cascaded prediction model and genetic algorithm. Chem. Eng. J. 437, 135499.

- [15] Turan, N.G., Ergun, O.N., (2008), Improving the quality of municipal solid waste compost by using expanded perlite and natural zeolite. Clean - Soil, Air, Water 36, 330–334.
- [16] Wong, J.W.C., Fung, S.O., Selvam, A., (2009), Coal fly ash and lime addition enhances the rate and efficiency of decomposition of food waste during composting. Bioresour. Technol. 100, 3324–3331.
- [17] Alterary, S.S., Marei, N.H., (2021), Fly ash properties, characterization, and applications: A review. J. King Saud Univ. - Sci. 33, 101536.
- [18] Manyapu, V., Mandpe, A., Kumar, S., (2018), Synergistic effect of fly ash in in-vessel composting of biomass and kitchen waste. Bioresour. Technol. 251, 114–120.
- [19] Singh, S., Singh, B., Mishra, B.K., Pandey, A.K., Nain, L., (2012), Microbes in Agrowaste Management for Sustainable Agriculture. In: Satyanarayana, T., Johri, B.N., Prakash, A. (Eds.), Microorganisms in Suitable Agriculture and Biotechnology. Springer, Dordrecht, New York, pp. 127–152.
- [20] Tiquia, S.M., Tam, N.F.Y., Hodgkiss, I.J., (1996), Microbial activities during composting of spent pig-manure sawdust litter at different moisture contents, Bioresour. Technol. 55 (3) 201–206.
- [21] Martins, O., Dewes, T., (1992), Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes, Bioresource Technology, 42(2), 103-111.



ALT EKSTREMİTENİN ROBOTİK REHABİLİTASYONU

Kemal Cem KÖSE*

*Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya, kcem.kose@dpu.edu.tr,
ORCID:0000-00022705-9075

Geliş Tarihi (Received Date):01.06.2022

Kabul Tarihi (Accepted Date):06.06.2022

ÖZ

İnme, omurilik yaralanmaları, serebral palsi gibi rahatsızlıklar nedeni ile alt ekstremitte lokomotor fonksiyonlarının bir kısmı veya tamamı kaybedilebilmektedir. Bu tip hastalarda doğru ve uygun rehabilitasyon programları uygulandığında lokomotor fonksiyonlarda pozitif artış sağlanabilmektedir. Özellikle hemiplejik vakalarda erken dönemde uygulanan rehabilitasyon programları yardımı ile başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

Teknolojide meydana gelen gelişmeler ile birlikte robotik sistemlerin rehabilitasyon süreçlerinde kullanımı fikri ortaya atılmıştır. Süreç içerisinde farklı teknik ve stratejilere sahip robotik rehabilitasyon cihazları üretilmiş ve aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada inme, omurilik yaralanmaları, serebral palsi gibi rahatsızlıklar nedeni ile alt ekstremitte fonksiyon kaybına uğramış hastaların rehabilitasyonunda kullanılan robotik rehabilitasyon cihazlarının teknolojileri, çalışma prensipleri ve tedavi proseslerine getirdiği katkılar değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: *Robotik Rehabilitasyon, Yürüme Rehabilitasyonu, Alt Ekstremitte Rehabilitasyonu,*

LOWER-LIMB ROBOTIC REHABILITATION

ABSTRACT

Due to complications such as stroke, spinal cord injuries, and cerebral palsy, some or all of the lower extremity locomotor functions may be lost. With such patients; when correct and appropriate rehabilitation programs are applied in, a positive increase in locomotor functions can be achieved. Especially in hemiplegic cases, successful results are obtained with the help of early rehabilitation programs.

Thanks to the developments in technology, the idea of using robotic systems in rehabilitation processes has been put forward. During the process, robotic rehabilitation devices with different techniques and strategies were produced and started to be used actively. In this study, technologies, working principles and contributions to the treatment processes of robotic rehabilitation devices used in the rehabilitation of patients who have lost lower extremity function due to stroke, spinal cord injuries, and cerebral palsy were evaluated.

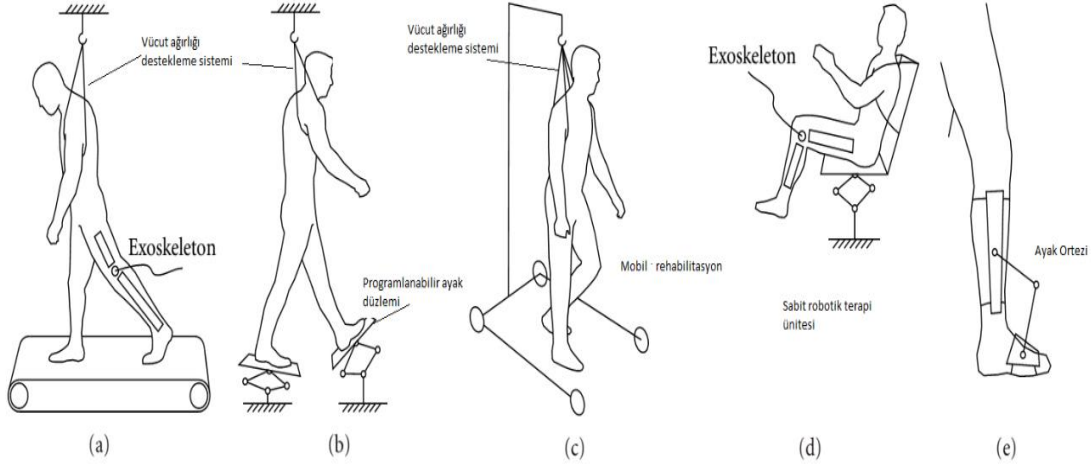
Keywords: *Lower Limb Robotic Rehabilitation, Robotic Rehabilitation, Gait Rehabilitation*

1. GİRİŞ

İnme, omurilik yaralanmaları, serebral palsi gibi rahatsızlıklar hastalarda yürüme kabiliyetinin bir kısmının veya tamamının kaybına sebebiyet vermektedir. Yürüme kaybının dışında farklı semptomlarında ortaya çıktığı bu tip rahatsızlıklardan özellikle inme, ölüm nedenleri arasında dünya çapında görülen üçüncü en sık ölüm nedenidir [1]. Bu rahatsızlıklar hastalarda mobilite kaybı oluşturmakta ve yaşam kalitelerini düşürmektedir. İnme sonrası, vücudun bir tarafında hemiparezi veya kısmi felce yol açan ve hastanın günlük yaşam aktivitelerini gerçekleştirme kabiliyetini etkileyen nörolojik bozukluklar sıklıkla ortaya çıkmaktadır [2]. Bu vb. nörolojik bozuklukların giderilmesinde rehabilitasyon süreçlerinin doğru ve etkili olarak yönetilmesi büyük önem taşımaktadır. Rehabilitasyon süreçleri yardımı ile hastanın yeniden yürüyebilmesi bağımsız bir hayat sürdürebilmesi açısından çok önemlidir. Doğru ve etkili bir rehabilitasyon programı hastaların hızlıca toparlanıp, iyileşmesine olanak sağlayabilecektir. Fizik tedavi ve rehabilitasyon süreçleri kaybedilen işlevlerin iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır [3,4]. Burada fizik tedavi ve rehabilitasyon sürecinin asıl amacı, spesifik hareketler yardımı ile hastada motor plastisiteyi tetiklemek ve böylelikle motor iyileşmeyi sağlamak olarak ifade edilebilir. Hareket uzvu etkilediğinden uzuv çalıştırılmalıdır [2,4]. Yürüme hareketi, “vücudu istenen ilerleme çizgisi boyunca aynı anda ilerleten ve aynı zamanda sabit bir ağırlık taşıma postürünü koruyan bir dizi hareketin alt uzuvları tarafından tekrarlanan performansdır” şeklinde ifade edilebilir[5]. Normal yürüyüş karakterize edilmek istenirse ana unsurlar ilerleme, ayakta durma dengesi ve enerji tasarrufudur. Patolojik durumlar yürümenin etkinliğini değiştirip bozacaktır. İleri yönde ilerleme ve duruş kararlılığı korunabildiği takdirde oluşan kontrol kaybının giderilmesi gerekir [6]. Hasta hareketlerinin vücudun belli bir bölgesine doğru yoğunlaştırılması vücutta sezgisel ve bütünsel iyileşme sağlayabilir[7]. Yürüme rehabilitasyonunda terapötik egzersizler öncelikle bağımsız yürüme kabiliyetini eski haline getirmeyi amaçlar. Modern terapötik yaklaşımlar büyük ölçüde tekrarlı uygulamalara dayanır[8]. Bu görev odaklı eğitimler motor öğrenmenin temel prensiplerine dayanmaktadır[9,10]. Bu nedenle rehabilitasyon sırasında tekrarlı ve doğru egzersiz kalıplarının yoğun bir şekilde hastaya uygulanması gerekmektedir. Nörolojik kökenli problemlerin yoğun, tekrarlayan ve görev odaklı eğitimle azaltılabileceği ve benzer şekilde bu yaklaşımın kısa ve uzun vadeli kortikal organizasyona yol açtığına dair ortaya çıkan kanıtlar bulunmaktadır [11,12,13,14,15]. Rehabilitasyon, kontrollü tekrarlayan ve değişken modeller sağlayarak nöronal plastisiteyi etkileyen bir motor iyileşme sağlayabilir[6]. Fizik tedavi ve rehabilitasyon süreçleri hastalarda nöronal plastisiteyi tetikleyerek iyileşme sağlayabilir. Plastisite, insan yaşamı boyunca nöral bileşenlerin organizasyonunun değiştirme kapasitesidir[16]. Adaptif modifikasyonlar, beyindeki anatomik veya fonksiyonel değişikliklere yanıt olarak ortaya çıkan nöral plastik oluşumlardır [17,18]. Rehabilitasyon süreçleri nöroplastisiteyi tetikleyerek hastalarda iyileşme sağlayabilecektir. Geleneksel terapi yöntemlerinde fizyoterapistlerin iş yükü çok fazladır. Aynı zamanda geleneksel terapide tekrarlı hareketlerin aynı seviyede yaptırılması ve ölçülmesi, rehabilitasyonu gerçekleştiren uzmanın tecrübe ve kabiliyetlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu durum tedaviden elde edilen verimi değiştirmektedir. Robotik teknolojideki gelişmeler ile birlikte, rehabilitasyon sürecinde robotların etkin olarak kullanılması ile ilgili çok ciddi çalışmalar yürütülmüş ve bu anlamda farklı teknik ve stratejileri kullanan cihazlar geliştirilmiştir. Alt ekstremitenin rehabilitasyonunda yürüme kabiliyetinin yeniden kazanılabilmesi amacıyla rehabilitasyon süreci üç faza ayrılabilir [19].

1. Yürüyemeyecek durumdaki hastaların tekerlekli iskemle ile mobilizasyonu.
2. Yürüme kabiliyetinin tekrar kazanılması.
3. Günlük hayat aktivitelerini gerçekleştirmek üzere yürümenin iyileştirilmesi.

Şekil 1’ de alt ekstremitenin robotik rehabilitasyonu için kullanılan yöntemler verilmiştir.



Şekil 1. Alt ekstremitenin robotik rehabilitasyonu için kullanılan yöntemler [2].

Şekil 1’ de gösterilen sistemler[2].

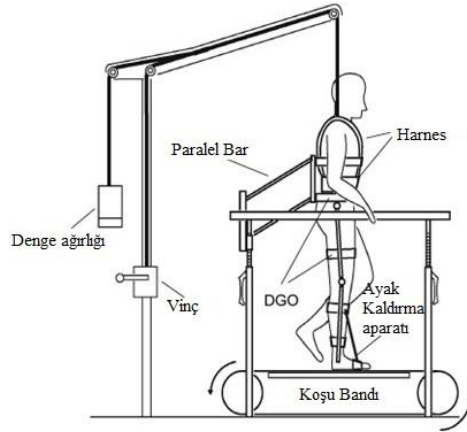
- Kayar zemin (koşu bandı) destekli rehabilitasyon cihazı,
- Programlanabilir ayak düzlemi destekli rehabilitasyon cihazı,
- Mobil rehabilitasyon cihazı,
- Sabit robotik terapi cihazı,
- Ayak ortezi,

Şeklinde gruplandırılabilir.

2. ALT EKSTREMİTENİN ROBOTİK REHABİLİTASYONUNDA KULLANILAN CİHAZLAR

2.1. Kayar Zemin (Koşu Bandı) Destekli Yürüme Rehabilitasyon Cihazları

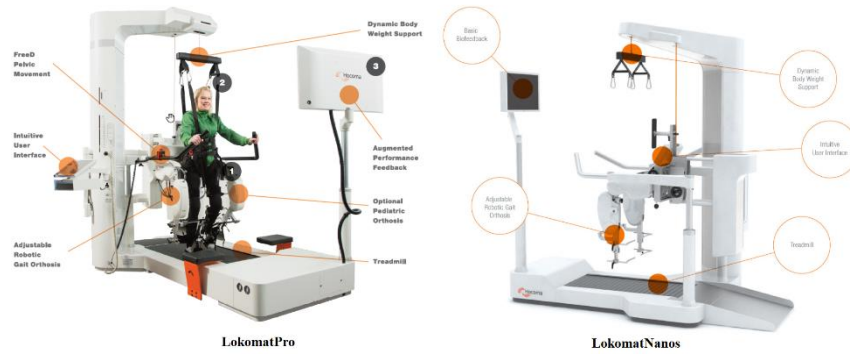
Kayar zemin yardımcı yürüme rehabilitasyon cihazları, rehabilitasyon sırasında doğru yürüme kalıbını aktarmak amacı ile hastaya hareket aktarımı yaparken, aynı zamanda hasta hareketlerini sürekli izleyerek raporlamaktadır. Bu yöntemi kullanarak rehabilitasyon gerçekleştiren cihazların çalışma prensibi şekil 2’ de sunulmuştur. Hasta, cihazda bulunan ağırlık eksiltici mekanizmaya şekil 2’ de gösterildiği gibi koşum kıyafeti (harness) aracılığı ile bağlanmıştır. Kalça ve bacak hareketi bacaklara bağlanan robotik unsur yardımı ile sağlanmaktadır. Ayrıca dik duruşun sağlanabilmesi için bir bel desteği bulunmaktadır. İleri gitme hareketi altta bulunan yürüme bandı sayesinde simüle edilmektedir. Sistem hasta tepkilerini ölçümleyip raporlarken üzerinde bulunan sensörlerden gelen verileri kullanmaktadır. Bu konuda geliştirilen cihazların bir kısmı ticarileşirken, bir kısmı sadece prototip düzeyinde üretilmiş ve ticari olarak satışa konu olmamıştır. Bu tipteki cihazlardan ticarileşmiş ve en yaygın olarak bilinen cihaz Hocoma firmasının geliştirmiş olduğu Lokomat isimli cihazdır. LOKOMAT gibi benzer yaklaşımla çalışan diğer rehabilitasyon sistemleri temelde adaptif ortak tork geri bildirim fikrine göre çalışmaktadır [20].



Şekil 2. Kayar zemin destekli robotik rehabilitasyon cihazları çalışma prensibi [21].

2.1.1. Lokomat

Bu cihaz Hocoma firması tarafından geliştirilmiş ve ticari olarak satışta bulunan bir cihazdır. Bu cihaz robotik bir yürüyüş ortezi, gelişmiş bir vücut ağırlık destek sistemi ve koşu bandından oluşmaktadır[21]. Cihaz üzerinde bulunan sensörler yardımı ile diz ve kalça ekleminde meydana gelen torkları ölçümleyip raporlayabilmektedir. LokomatPro ve LokomatNano olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Cihaz üzerinde hastanın karşısında konumlandırılmış monitör ile sesli ve görsel geribildirim yapılmakta ve hasta yönlendirilebilmektedir[22]. Lokomat ile yapılan klinik çalışmada elde edilen sonuçlar omurilik yaralanmasını takiben birçok motor bozukluğun tedavisinde faydalı etkileri olduğuna dair kanıtlar bulunmuştur [23].



Şekil 3. Lokomat robotik rehabilitasyon cihazı modelleri [24].

2.1.2. LokoHelp

Woodway firması tarafından üretilen LokoHelp isimli rehabilitasyon cihazı end-efektör tipinde bir cihaz olarak kabul edilir. Elektromekanik yapıda olan bu cihazın geliştirilme amacı ağırlıklı olarak beyin travmaları sebebiyle oluşan yürüme problemlerini gidermektir [25]. LokoHelp rehabilitasyon cihazında, kayar bandın ön tarafına sabitlenmiş pedal sistemi, kayar zemin (koşu bandı) orta ekseninde yüzeye paralel yürüme doğrultusunda yerleştirilmiştir. Cihaz üzerinde ayrıca vücut ağırlığı

dengeleme sistemi bulunmaktadır. Freivogel vd. tarafından yapılan klinik çalışmalarda cihazın fizibilite ve etkinliği değerlendirilmiştir [26].



Şekil 4. Lokohelp robotik rehabilitasyon cihazı [27].

2.1.3. ReoAmbulator

Motorika firması tarafından üretilmiş bir rehabilitasyon cihazı olan ReoAmbulator, benzer cihazlarda olduğu gibi vücut ağırlığı dengeleme sistemine sahip kayar zemin destekli robotik sistemdir [28]. Cihaz yapısal olarak diğer cihazlar ile benzer karakteristikte çalışmaktadır.



Şekil 5. ReoAmbulator robotik rehabilitasyon cihazı [29].

2.1.4. RoboGait

Türkiye’ de Bama teknoloji firması tarafından geliştirilip üretilmiş bir cihaz olan RoboGait, ticarileşmiş ve fizik tedavi ve rehabilitasyon merkezlerinde kullanımda olan bir cihazdır. Yapısal olarak diğer kayar zemin yardımcı robotik cihazlar ile aynı özellikleri taşımaktadır. Benzerlerinden farklı olarak yetişkin ve pediatrik için ayrı ünite kullanım zorunluluğu bulunmamaktadır. Ayarlanabilir yapısı sayesinde hem yetişkin hem pediatrik hastalarda aynı ünite kullanılabilir.



Şekil 6. RoboGait robotik rehabilitasyon cihazı [30].

2.1.7. Walkbot

Güney koreli P&S mekanik şirketi tarafından üretilmiş olan Walkbot, Walkbot-K, Walkbot-S, Walkbot-G şeklinde üç ayrı model olarak üretilmektedir. Walkbot- K pediatrik hastalar için geliştirilmiş bir modeldir. Walkbot-S standart model olarak piyasaya sürülmüştür. Sistemin çalışma yapısı diğer kayar zemin yardımcı robotik cihazlar ile aynı yapıdadır.



Şekil 7. Walkbot robotik rehabilitasyon cihazı modelleri [31].

2.2. Programlanabilir Ayak Düzlemi İle Robotik Yürüme Rehabilitasyon Cihazı

Yürüme rehabilitasyonu için geliştirilen cihazların bazılarında ayak, tabandan hareketin aktarıldığı programlanabilen bir düzlem yardımı ile hareket ettirilmektedir. Bu tip cihazlara aynı zamanda end-efektör cihazlarda denilmektedir. Hareketin ayak tabanından aktarılması sayesinde bacak üzerine robotik ortez yerleştirme zorunluğu ortadan kalkmaktadır. Hastanın fonksiyon kaybına göre, bacakları ve duruşu desteklemek için bazı ortezler kullanılabilir. Kayar zemin yardımcı cihazlarda olduğu gibi bu cihazlarda da vücut ağırlığı destekleme sistemi kullanılmaktadır.

2.2.1. Geo- system evolution

Reha technology tarafından İsviçre de üretimi yapılmaktadır. End-efektör tipinde bir cihaz olup hareket ayak tabanından hastaya aktarılmaktadır. Bu cihaz, vücut ağırlığını destekleyen koşum takımı ile birlikte iki ayak için ayrı ve bağımsız programlanabilen ayak düzlemi ve bilgisayar ara yüzünden oluşmaktadır. Kalça ve gövde ayak tabanından aktarılan harekete göre serbestçe hareket eder. Cihaz ayrıca merdiven çıkma programı ile farklı bir rehabilitasyon imkanı tanımaktadır. Firmanın G-EOs, G-EO_L ve G-EO₁ olmak üzere toplam üç farklı modeli bulunmaktadır.



Şekil 8. G-EO robotik rehabilitasyon cihazı modelleri [32].

Thera-trainer Iyra

Bu cihaz da end-efektör tipinde bir cihaz olup, rehabilitasyon sırasında hareket ayak tabanında, ayağın bağlandığı düzlem tarafından hastaya aktarılmaktadır. Bu cihaz da vücut ağırlığını destekleyen ve iki ayak için bağımsız programlanabilen ayak düzlemi ve bilgisayar ara yüzünden oluşmaktadır.



Şekil 9. Thera-trainer Iyra robotik rehabilitasyon cihazı modelleri [33].

2.2.2. Gangtrainer (GT)

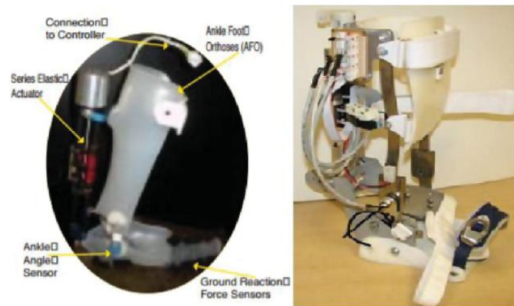
Gangtrainer GT I reha-stim firması tarafından ticarileştirilmiştir [2]. Cihaz rehabilitasyon sırasında ağırlık eksilterek ve hastanın bireysel kapasitesi ve hızına uyumlu bir şekilde hareket özgürlüğünü yeniden kazandırmaktadır [34]. Hastanın dengesi kuşak (harness) sistemi yardımı ile sağlanmaktadır. Ayak bağlantı plakaları yardımı ile yürüyüş simüle edilmektedir. Klinik olarak bu cihaz yardımı ile yapılan rehabilitasyon süreçleri ve etkileri üzerine dünyada çok sayıda çalışma yapılmıştır [35,36]. Reha – stim firması Gait trainer GT I' i ürettikten sonra, bu cihazda elde edilen bilgi birikimini kullanarak Gait trainer GT II modelini geliştirmiştir.



Şekil 9. Gait trainer GT II robotik rehabilitasyon cihazı modelleri [37].

2.3. Ayak Ortezi ve Rehabilitasyon Robotları

Ayak bileğinde meydana gelen rahatsızlıklar sonucunda bireyde mobilite kaybı sıkça görülmektedir. Bu tip hastalarda, rehabilitasyon sürecinde ayak bileğini destekleyecek ve ayak bileğinin hareket yapısına uygun hareketleri aktarabilecek ortezler ve platform temelli cihazlar kullanılmaktadır. Aktif ortez terimi, tipik olarak kullanıcı veya terapist talimatları altında bir veya daha fazla eklemden gücü artırmayı amaçlayan antropomorfik bir cihazı tanımlamak için kullanılır[38]. İlk aktif ortezler 1935 yılında tescil edilmiştir[39]. Aktif ortezlerde MIT yüksek sürtünme ve gürültü gibi problemleri gidermek üzere, vidalı mil ve spiral yay kullanarak bir seri elastik aktüatör ekleyerek alternatif bir tasarım gerçekleştirmiştir [40]. Şekil 10'da MIT ve Arizona State Üniversitesi tarafından tasarlanmış olan aktif ortezler verilmiştir.



Şekil 10. MIT ve Arizona State Üniversitesi tarafından tasarlanmış olan aktif ortezler [41,42]

İlk olarak 1952’ de McKibben tarafından geliştirilen pnömatik aktüatörler, yapay pnömatik kas oluşturmada kullanılmıştır [43]. Bu yapı kullanılarak daha hafif ve kolay üretilen aktif ortezler tasarlanmıştır. Şekil 11’ de Gordon ve arkadaşları tarafından tasarlanmış olan ve çift pnömatik kas kullanılmış aktif ortez gösterilmiştir [44].



Şekil 11. Gordon ve arkadaşlarının tasarlamış olduğu aktif ortez [44].

Aktif ortezler ile yapılan çalışmalar ile birlikte ayak bileği rehabilitasyonunda, platform temelli cihazlar geliştirilmiştir. Yapısal olarak hastanın ayağının yerleştirildiği bir platform aracılığı ile hareket aktarımının yapıldığı cihazlardır. Bu kategorideki ilk robot Rutgers Ankle olarak ifade edilir [45]. Ayrıca Liu ve arkadaşları [46], Yoon ve arkadaşları [47] prototip cihazlar geliştirmişlerdir. Bu kategoride geliştirilen pek çok robotik cihaz, tasarımında Gough-Stewart platformundan esinlenmiştir [48]. Şekil 12’ de Rutgers Ankle, Liu ve arkadaşları, Yoon ve arkadaşları tarafından tasarlanan cihazların görselleri paylaşılmıştır



Rutgers Ankle



Liu prototip cihazı



Yoon prototip cihazı

Şekil 12. Rutgers Ankle, Liu ve arkadaşları, Yoon ve arkadaşları tarafından tasarlanan prototipler [45,46,47]

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada, alt ekstremitenin robotik rehabilitasyonunda kullanılan cihazlar ve teknikleri hakkında bilgi paylaşılmıştır. Geleneksel rehabilitasyon yöntemlerinde rehabilitasyonun başarısı, rehabilitasyonu gerçekleştiren uzmanın tecrübesi ve uygulamaya bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ayrıca rehabilitasyon sürecinin ve hastada meydana gelen düzelmelerin ölçülmesi fizyoterapistler açısından zahmetli süreçler içermektedir. Robotik rehabilitasyon ile zamanın daha verimli kullanılabilmesi ve daha fazla hastanın rehabilite edilebilmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca fizyoterapistlerin iş yükünü azaltması sayesinde, uzmanların hastalar ile daha rahat ilgilenebilmesine imkan tanımıştır. Mehrholz ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, fizyoterapi ile birlikte robotik yürüyüş eğitiminin inme sonrası hastalarda bağımsız yürümeyi iyileştirebileceğini gösterdi[49]. Lo ve arkadaşları hafif ve şiddetli bozuklukları olan hastaların bir alt grup analizini gerçekleştirmiştir; robotik cihazlarla tedavi edilen ciddi rahatsızlıkları olan hastaların, geleneksel tedavi ile tedavi edilen hastalara göre daha iyi gelişme gösterdiği sonucuna ulaştılar [50]. Bruni ve arkadaşları 2018'de end-efektör robotların bir kontrol grubuna kıyasla yürüme hızını iyileştirmede önemli ölçüde daha etkili olduğunu bulmuş ve dış iskelet robotlarının geleneksel terapiden daha etkili olduğuna dair hiçbir kanıt bulamamışlardır[51].

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada, alt ekstremitenin robotik rehabilitasyonunda kullanılan cihazlar ve yöntemleri, yürüme rehabilitasyonu açısından değerlendirilerek genel özellikleri ve rehabilitasyon yaklaşımları hakkında bilgi verilmiştir. Geleneksel yöntemlere kıyasla robotik rehabilitasyonun avantajlarından bahsedilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, alt ekstremitenin robotik rehabilitasyonunda kullanılan cihazlar ve yöntemleri değerlendirilmiştir. Bu vesileyle, robotik rehabilitasyon süreçlerinin geliştirilmesinde emeği olan tüm bilim insanlarına teşekkür etmek isterim.

KAYNAKÇA

- [1] Lloyd-Jones, D., Adams, R. J., Brown, T. M. et al., (2010), "Heart disease and stroke statistics—2010 update: a report from the American heart association," *Circulation*, vol. 121, no. 7, pp. e46–e215.
- [2] Diaz, I., Gil, J.J., Sanchez, E., (2011), *Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges*, Hindawi Publishing Corporation *Journal of Robotics* Volume 2011,
- [3] Smith, D.S., Goldenberg, E., Ashburn, A., et al., (1981) "Remedial therapy after stroke: a randomised controlled trial," *The British Medical Journal*, vol. 282, no. 6263, pp. 517–520.
- [4] Dam, M., Tonin, P., Casson S., et al., (1993) "The effects of long-term rehabilitation therapy on poststroke hemiplegic patients," *Stroke*, vol. 24, no. 8, pp. 1186–1191.

- [5] Perry J, Burnfield JM.,(2010) Gait Analysis, Normal and Pathological Function. 2nd ed. Thorofare, NJ: Slack Inc;.
- [6] Molteni, F., Gasperini, G., Cannaviello, G., Guanziroli, E., (2018), Exoskeleton and End-Effector Robots for Upper and Lower Limbs Rehabilitation: Narrative Review, Innovations Influencing Physical Medicine and Rehabilitation, 174- 188.
- [7] Morasso P, Casadio M, Mohan V, Rea F, Zenzeri J. (2015), Revisiting the body-schema concept in the context of whole-body postural-focal dynamics. *Front Hum Neurosci*;9:83.
- [8] Taub E, Uswatte G, Elbert T. (2002), New treatments in neurorehabilitation founded on basic research. *Nature Reviews Neuroscience*;3:228–236
- [9] Majsak MJ. (1996), Application of motor learning principles to the stroke population. *Topics in Stroke Rehabilitation*;3:27–59.
- [10] Carr JH, Shepherd R., (1987), A motor relearning programme for stroke. London: Heinemann;.
- [11] Van Peppen RP, Kwakkel G, Wood-Dauphinee S, Hendriks HJ, Van der Wees PJ, Dekker J., (2004), The impact of physical therapy on functional outcomes after stroke: What’s the evidence? *Clinical Rehabilitation*;18:833–862
- [12] Nilsson L, Carlsson J, Danielsson A, Fugl-Meyer A, Hellstrom K, Kristensen L, Sjolund B, Sunnerhagen KS, Grimby G.,(2001), Walking training of patients with hemiparesis at an early stage after stroke: A comparison of walking training on a treadmill with body weight support and walking training on the ground. *Clinical Rehabilitation*;15: 515–527.
- [13] Classen J, Liepert J, Wise SP, Hallett M, Cohen LG., (1998), Rapid plasticity of human cortical movement representation induced by practice. *Journal of Neurophysiology*;79: 1117–1123.
- [14] Liepert J, Bauder H, Wolfgang HR, Miltner WH, Taub E, Weiller C.,(2000), Treatment-induced cortical reorganization after stroke in humans. *Stroke* ;31:1210–1216.
- [15] Luft AR, Forrester L, Macko RF, McCombe-Waller S, Whittall J, Villagra F, Hanley DF., (2005), Brain activation of lower extremity movement in chronically impaired stroke survivors. *Neuroimage*;26:184–194.
- [16] Sale A, Berardi N, Maffei L., (2009), Enrich the environment to empower the brain. *Trends Neurosci* ;32:233-239.
- [17] Gerloff C, Bushara K, Sailer A, et al., (2006), Multimodal imaging of brain reorganization in motor areas of the contralesional hemisphere of well recovered patients after capsular stroke. *Brain*; 129(pt 3):791-808
- [18] Nudo RJ., (2007), Postinfarct cortical plasticity and behavioral recovery. *Stroke*;38(2 suppl):840-845.

- [19] Carr J., Shepherd R. (1987). A Motor Relearning Program for Stroke, Aspen Publishers.
- [20] Ott, C., Albu-Schäffer, A., Kugi, A., Hirzinger, G. (2008), On the passivity-based impedance control of flexible joint robots. IEEE Transactions on Robotics; 24(2):416–29.
- [21] Colombo G., Joerg M., Schreier R., Dietz V. (2000). Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis, Journal of Rehabilitation Research and Development, C.37, No. 6, s. 693–700.
- [22] Sucuoğlu, H., (2018), Robotik Rehabilitasyon, Güneş Yayınevi,35.
- [23] Anas R. Alashram, Giuseppe Annino, Elvira Padua, (2021)Robot-assisted gait training in individuals with spinal cord injury: A systematic review for the clinical effectiveness of Lokomat, Journal of Clinical Neuroscience, Volume 91,Pages 260-269.
- [24] <https://www.hocoma.com/solutions/lokomat/>
- [25] Freivogel, S., Mehrholz, J., Husak-Sotomayor, T., Schmalohr D. (2008). Gait training with the newly developed “LokoHelp”-system is feasible for non-ambulatory patients after stroke, spinal cord and brain injury. A feasibility study,” Brain Injury, C.22, no. 7-8, s.625– 32.
- [26] Freivogel, S., Schmalohr, D., Mehrholz, J., (2009). Improved walking ability and reduced therapeutic stress with an electromechanical gait device, Journal of Rehabilitation Medicine, C. 41, no. 9, s.734–739,
- [27] <https://www.woodway.com/products/loko-help/>
- [28] West, G. R. (2004). Powered gait orthosis and method of utilizing same, Patent number 6689 075.
- [29] <https://exoskeletonreport.com/product/reoambulator/>
- [30] <https://www.bamateknoloji.com/urunlerimiz/robotik-rehabilitasyon/robogait/>
- [31] <http://walkbot.co.kr/introduction/>
- [32] <https://www.rehatechnology.com/en/>
- [33] <https://thera-trainer.com/en-us/thera-trainer-products/gait/thera-trainer-lyra>
- [34] Surdilovic, D., Bernhardt. R., (2004). “STRING-MAN: a new wire robot for gait rehabilitation,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, May, C.2, s. 2031–2036.
- [35] Werner, C., Von Frankenberg, S., Treig, T., Konrad, M., Hesse, S. (2002). Treadmill training with partial body weight support and an electromechanical gait trainer for restoration of gait in subacute stroke patients: a randomized crossover study, Stroke, C.33, no. 12, s.2895–2901.

- [36] Peurala, S. H., Airaksinen, O., Huuskonen, P., Jäkääla, P., Juhakoski, M., Sandel, K., Tarkka I. M., Sivenius, J., (2009). Effects of intensive therapy using gait trainer or floor walking exercises early after stroke, *Journal of Rehabilitation Medicine*, C.41, no. 3, s.166–173.
- [37] <https://reha-stim.com/gt-ii/>
- [38] Marian G. Alvarez-Perez, Mario A. Garcia-Murillo & J. Jesús Cervantes- Sánchez (2020) Robot-assisted ankle rehabilitation: a review, *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 15:4, 394-40
- [39] Cobb G. Walking Motion. 1935. <https://patents.google.com/patent/US2010482>
- [40] Blaya JA, Herr H., (2004), Adaptive control of a variable-impedance ankle-foot orthosis to assist drop-foot gait. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.*;12:24–31.
- [41] Dollar AM, Herr H., (2008), Lower extremity exoskeletons and active orthoses: challenges and state of the art. *IEEE Trans Robot.*;24:144–158.
- [42] Boehler AW, Hollander KW, Sugar TG, et al., (2008), Design, implementation and test results of a robust control method for a powered ankle foot orthosis (AFO). *Robotics and automation, 2008. IEEE International Conference; Pasadena, CA, United States; p. 2025–2030*
- [43] Chou C-P, (1994), Hannaford B. Static and dynamic characteristics of McKibben pneumatic artificial muscles. *Robotics and automation. 1994 IEEE International Conference; San Diego, CA, USA; p. 281–286.*
- [44] Gordon KE, Sawicki GS, Ferris DP., (2006), Mechanical performance of artificial pneumatic muscles to power an ankle-foot orthosis. *J Biomech.*;39:1832–1841.
- [45] Girone MJ, Burdea GC, Bouzit M., (1999), The "Rutgers ankle" orthopaedic rehabilitation interface. *Proc ASME Haptics Symp.*;67:305–312
- [46] Liu G, Gao J, Yue H, et al., (2006), Design and kinematics analysis of parallel robots for ankle rehabilitation. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China; p. 253–258.*
- [47] Yoon J, Ryu J, Lim KB., (2006), Reconfigurable ankle rehabilitation robot for various exercises. *J Robot Syst.*;22:15–33.
- [48] Dasgupta B, Mruthyunjaya TS., (2000), Stewart platform manipulator: a review. *Mech Mach Theory.*;35:15–40
- [49] Mehrholz J, Thomas S, Werner C, Kugler J, Pohl M, Elsner B., (2017), Electromechanical-assisted training for walking after stroke. *Cochrane Database Syst Rev*;5:CD006185.

- [50] Lo K, Stephenson M, Lockwood C.,(2017), Effectiveness of robotic assisted rehabilitation for mobility and functional ability in adult stroke patients: A systematic review. JBI Database System Rev Implement Rep 2017;15:3049-3091.
- [51] Bruni MF, Melegari C, De Cola MC, Bramanti A, Bramanti P, Calabro` RS., (2018), What does best evidence tell us about robotic gait rehabilitation in stroke patients: A systematic review and metaanalysis. Clin Neurosci;48:11-17