

MAKÜ FEBED

e-ISSN: 1309-2243

CİLT (VOLUME): 15 • SAYI (ISSUE): 2 • YIL (YEAR): 2024



Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

The Journal of
Graduate School of Natural and Applied Sciences of
Mehmet Akif Ersoy University

 dergipark.org.tr/makufebed

MAKÜ FEBED

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University

CİLT / VOLUME 15

SAYI / NUMBER 2

YIL / YEAR 2024

e-ISSN: 1309-2243

İmtiyaz Sahibi / Owner

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi adına / On behalf of Burdur Mehmet Akif Ersoy University

Prof. Dr. Hüseyin DALGAR

Rektör / (Rector)

Sorumlu Müdür / Journal Manager

Prof. Dr. Yasin ARSLAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü / Director, Institute of Science and Technology

Dergi Yayın Kurulu / Editorial

Board Editör / Editor-in-Chief

Prof. Dr. Cengiz YÜCEDAĞ *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Dr. Öğr. Üyesi Bora BİNGÖL *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇELİK *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Alan Editörleri / Section Editors

Prof. Dr. Mehmet ÇETİN *Ondokuz Mayıs Üniversitesi*

Prof. Dr. Sadık ÇOĞAL *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Prof. Dr. Ali Hakan IŞIK *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Prof. Dr. Nurettin KÖRÖZLÜ *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Doç. Dr. Canan ÇİMŞİT *Kocaeli Üniversitesi*

Doç. Dr. Tuğba GÜRKÖK TAN *Çankırı Karatekin Üniversitesi*

Doç. Dr. Asım Gökhan YETGİN *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Dr. Öğr. Üyesi Gonca BUYRUKOĞLU *Çankırı Karatekin Üniversitesi*

Dr. Öğr. Üyesi Nuray ÇİÇEK *Çankırı Karatekin Üniversitesi*

Dr. Öğr. Üyesi Betül TEYMUR *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi*

İngilizce Dil Editörleri / Foreign Language Editors

Doç. Dr. Bojan SIMOVSKI *Üsküp Ss. Cyril ve Methodius University*

Dr. Öğr. Üyesi Seyit YÜZÜAK *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Teknik Editörler / Technical Editors

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa BATAR *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Araş. Gör. Aylin DURAK *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Dizgi Editörleri / Layout Editors

Dr. Öğr. Üyesi Kadir MERCAN *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*
Araş. Gör. Ayşe Betül GÖK *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*
Araş. Gör. Medine RASIMGİL *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi*

Uluslararası Yayın Kurulu / International Editorial Board

Prof. Dr. Mohd Ezree Bin ABDULLAH *Malezya Tun Hussein Onn Üniversitesi (Malezya)*
Prof. Dr. Tapani ALATOSSAVA *Helsinki Üniversitesi (Finlandiya)*
Prof. Dr. Rodrigo AMORIM GARCIA *Fluminense Üniversitesi (Brezilya)*
Prof. Dr. Yasin ARSLAN *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi (Türkiye)*
Prof. Sadık C. ARTUNÇ *Mississippi State Üniversitesi (ABD)*
Prof. Dr. Ebru Gül ASLAN *Süleyman Demirel Üniversitesi (Türkiye)*
Prof. Dr. Uğur BOZKAYA *Hacettepe Üniversitesi (Türkiye)*
Prof. Dr. Feyza CANDAN *Manisa Celal Bayar Üniversitesi (Türkiye)*
Prof. Dr. Yasser Gaber DESSOUKY *Stavanger Üniversitesi (Mısır)*
Prof. Dr. Oliver GAILING *Göttingen Üniversitesi (Almanya)*
Prof. Dr. Oğuz GÜRSOY *Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi (Türkiye)*
Prof. Dr. Rabah KHENATA *Mascara Üniversitesi (Cezayir)*
Prof. Dr. Ali Cihat KÜTÜK *Ankara Üniversitesi (Türkiye)*
Prof. Dr. Martin NERUDA *Jan Evangelista Purkyně Üniversitesi (Çek Cumhuriyeti)*
Prof. Dr. Maria OMASTOVA *Slovak Bilimler Akademisi (Slovakya)*
Prof. Dr. Kemal POLAT *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi (Türkiye)*
Prof. Dr. Nazire Papatya SEÇKİN *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi (Türkiye)*
Prof. Dr. Çağatay TAVŞANOĞLU *Hacettepe Üniversitesi (Türkiye)*
Prof. Dr. Erol TUTUMLUER *Illinois at Urbana-Champaign Üniversitesi (ABD)*
Doç. Dr. Zikri ARSLAN *Jackson State Üniversitesi (ABD)*
Doç. Dr. Muhammad ASİF *National Textile Üniversitesi (Pakistan)*
Doç. Dr. Burçin KAYMAZ *Ege Üniversitesi (Türkiye)*
Doç. Dr. İnci TÜNEY KIZILKAYA *Ege Üniversitesi (Türkiye)*
Doç. Dr. Hasan OGUL *Sinop Üniversitesi (Türkiye)*
Doç. Dr. Onur ÜLKER *Eskişehir Teknik Üniversitesi (Türkiye)*
Dr. Wei FAN *Jilin Üniversitesi (Çin)*
Dr. Ali Umut ŞEN *Lizbon Üniversitesi (Portekiz)*
Dr. Ruijie Tian *Dalian Maritime Üniversitesi (Çin)*

İletişim / Contact

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi

Adres: İstiklal Yerleşkesi Fen Edebiyat Fakültesi 1. Kat, 15030, Burdur

Web: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/makufebed>

E-mail: febeddergi@gmail.com

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University

Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, yılda iki kez (Haziran ve Aralık) yayımlanan ve uluslararası alan indeksleri tarafından taranan "Uluslararası Hakemli" akademik bir dergidir. Derginin amacı, ulusal ve uluslararası düzeyde fen bilimleri alanında çalışan bilim insanlarının ve araştırmacıların DOI numaralı bilimsel araştırma makalelerini ücretsiz olarak yayımlamaktır.

Dergiye sunulan makalelerin değerlendirme sürecinde çift kör hakem değerlendirme sistemi kullanılmaktadır. Dergide mühendislik ve mimarlık bilimleri, temel bilimler ile tarım ve orman bilimleri alanlarında özgün ve yenilikçi bilgiler sunan araştırma makaleleri yayımlanır. Dergimiz Türkçe veya İngilizce dilinde makaleleri kabul eden ve yayımlayan açık erişimli bir dergidir. Dergiye yayımlanmak üzere sunulan makalelerden herhangi bir makale işlem ücreti alınmamaktadır.

The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University is an academic journal published twice a year (June and December) and indexed by international field indexes as an "International Peer-Reviewed" journal. The aim of the journal is to publish scientific research articles from scholars and researchers in the field of natural sciences at national and international levels, providing them with DOI numbers.

The double-blind peer review system is used in the evaluation process of articles submitted to the journal. The journal publishes research articles presenting original and innovative information in the fields of engineering and architecture sciences, basic sciences, as well as agriculture and forestry sciences. Our journal is an open access journal that accepts and publishes articles in Turkish or English. No article processing fee is charged for articles submitted to the journal for publication.

Değerli Okuyucular,

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Editörlüğü olarak, Haziran 2024'te yayınladığımız dergimizin ilk sayısından sonra, şimdi de Aralık 2024 sayımızı sizlerle paylaşmanın gururunu yaşıyoruz.

Dergimizin bu yeni sayısında 13 yazar tarafından hazırlanmış 5 araştırma makalesi yer almaktadır. Bu makaleler; tarım, mühendislik, biyoteknoloji ve çevre bilimleri alanlarındaki çeşitli problemlere ve çözüm önerilerine odaklanarak, bilimsel araştırmaların gücünden faydalanarak günümüzün doğa ile uyumlu yenilikçi çözümler ve sürdürülebilir uygulamalar arayışında önemli bir rol oynamaktadır.

Bu sayının yayınında emeği geçen başta Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü Prof. Dr. Yasin ARSLAN'a ve yayın kurulunda bulunan tüm dergi ekibine katkı ve emeklerinden ötürü teşekkür ederiz. Ayrıca dergimize yayınlarını göndererek katkı veren yazarlarımıza olduğu kadar yayınların değerlendirilmesinde değerli görüşlerini ve zamanlarını paylaşan hakemlerimize de şükranlarımızı sunarız.

Ayrıca, bu dergide yer alan çalışmalardan okuyucularımızın ilham alarak daha fazla araştırma yapmalarını ve dergimize katkı sağlamalarını temenni ederiz.

Dear Readers,

As the Editorial Board of the Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Burdur Mehmet Akif Ersoy University, we take great pride in sharing the December 2024 issue of our journal with you, following the publication of the first issue of 2024 in June.

This new issue features five research articles authored by 13 researchers. These articles address various challenges and propose solutions in fields such as agriculture, engineering, biotechnology, and environmental sciences. By leveraging the power of scientific inquiry, they play a significant role in the pursuit of innovative, nature-compatible solutions and sustainable practices for contemporary problems.

We extend our gratitude to the Director of the Graduate School of Natural and Applied Sciences, Prof. Dr. Yasin ARSLAN, and all members of the editorial team for their invaluable contributions to this publication. We also wish to thank the authors who enriched our journal with their submissions and the reviewers who generously shared their time and expertise during the evaluation process.

Furthermore, we hope that the studies presented in this issue will inspire our readers to conduct further research and contribute to our journal in the future.

Prof. Dr. Cengiz YÜCEDAĞ
Editör / *Editor in Chief*

Dr. Öğr. Üyesi Bora BİNGÖL, Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇELİK
Yardımcı Editörler / *Associate Editors*

DECEMBER 2024

İçindekiler / Contents

Araştırma Makaleleri / Research Papers

-
- Antalya'da Doğal Olarak Yetişen Yabani Keçiboynuzu Genotiplerinde Farklı Lokasyonların Meyve ve Tohum Özellikleri Üzerine Etkileri** 74-80
Effects of Different Locations on Fruit and Seed Characteristics of Wild Carob Genotypes Growing Naturally in Antalya
Recep BALKIÇ, İlknur POLAT, Hamide GÜBBÜK
-
- Döngüsel Taşıma Sistemi Yan Kısıtlarına Sahip Konteyner Yükleme Problemi için Bir Model Önerisi** 81-102
A Mathematical Model for Container Loading Problem with Milkrun Transportation Side Constraints
Tevfik ALTINALEV, Alpaslan FIĞLALI
-
- Evaluation of The Effect of Metalaxyl-M and Chlorothalonil Against Downy Mildew in Cucumber and Investigation of Their Residues** 103-110
Metalaxyl-M ve Chlorothalonil'in Hıyarda Tüylü Küf Hastalığına Karşı Etkisinin Değerlendirilmesi ve Kalıntılarının Araştırılması
Saifuldeen Jasim Mohammed MOHAMMED, Gülşen GÜÇLÜ, Danial KAHRİZİ, Tuğba GÜRKÖK TAN
-
- Çanakkale Florasında Doğal Olarak Yetişen Bazı Geofit Türlerinin Süs Bitkisi Olarak Kullanılabilirliğinin AHP ve TOPSIS Yöntemi ile Değerlendirilmesi** 111-124
Evaluation of the Usability of Some Geophyte Species Growing Naturally in Çanakkale Flora as Ornamental Plants by AHP and TOPSIS Method
Necmettin GÜR, Özgür KAHRAMAN
-
- Bağımsız Güç Türbinli Süperkritik Kapalı Bir Çevrimin İncelenmesi** 125-136
Investigation of a Supercritical Closed Cycle with Independent Power Turbine
Eda AYDEMİR POLAT, Şehnaz ŞENER
-

Antalya'da Doğal Olarak Yetişen Yabani Keçiboynuzu Genotiplerinde Farklı Lokasyonların Meyve ve Tohum Özellikleri Üzerine Etkileri

Effects of Different Locations on Fruit and Seed Characteristics of Wild Carob Genotypes Growing Naturally in Antalya

Recep BALKIÇ¹, İlnur POLAT², Hamide GÜBBÜK^{2*}

¹ Akdeniz Üniversitesi, Elmalı Meslek Yüksekokulu, Bitkisel ve Hayvansal Üretim Bölümü, Antalya, Türkiye

² Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü, Antalya, Türkiye

Article Info

Research Article

DOI: 10.29048/makufebed.1454370

Corresponding Author

Hamide GÜBBÜK

Email: gubbuk@akdeniz.edu.tr

Article History

Received: 18.03.2024

Revised: 12.06.2024

Accepted: 04.07.2024

Available Online: 26.12.2024

To Cite

Balkıç, R., Polat, İ., & Gübbük, H. (2024). Antalya'da doğal olarak yetişen yabani keçiboynuzu genotiplerinin meyve ve tohum özellikleri. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 15(2), 74–80. <https://doi.org/10.29048/makufebed.1454370>

Öz: Türkiye; İspanya, Portekiz, İtalya ve Yunanistan gibi ülkelerin aksine, doğal keçiboynuzu popülasyonu açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Son yıllarda keçiboynuzu, meyvesinden ziyade tohumu için ticareti yapılan bir tür konumuna geçmiş ve yeni kurulan bahçelerde tohum özelliklerinden dolayı yabani genotipler tercih edilmeye başlanmıştır. Türkiye'de, başta Antalya ve Mersin olmak üzere Muğla'da yabani ve kültür tiplerinde seleksiyon çalışmaları yapılmıştır. Bununla birlikte, Antalya'nın ilçelerinde sadece yabani genotiplere ait meyve ve tohumların fiziksel özelliklerine yönelik bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle yürütülen bu çalışmada, Antalya ve ilçelerinden seçilen yabani genotiplerin meyve ve tohumlarının fiziksel özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda meyve uzunluğu, meyve eni, meyve kalınlığı ve meyve ağırlığı ile tohum sayısı, ortalama tohum ağırlığı ve tohum randımanının ilçelere göre farklılıkları ortaya konmuştur. İncelenen tüm özellikler açısından Demre lokasyonunun ön plana çıktığı tespit edilmiştir. Demre ilçesinde incelenen en önemli kriterlerden meyve uzunluğu 19,03 cm, meyve ağırlığı 10,93 g ve tohum randımanı %26,80 olarak belirlenmiştir. Tüm kriterler dikkate alındığında bu lokasyonu Kumluca lokasyonu izlemiştir. Ayrıca tohum randımanı, güneyde bulunan ve rakımı düşük olan lokasyonlarda, kuzeyde ve denizden yüksek olan lokasyonlara göre daha yüksek saptanmıştır. Bu araştırma sonucunda, özellikle tohum üretimine yönelik yeni kurulacak bahçelerde Demre lokasyonundan alınacak çoğaltma materyallerinin kullanımı önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Ceratonia siliqua*, tohum randımanı, E-410, yabani genotip, Demre

ABSTRACT: Turkey has significant potential regarding natural carob populations, unlike Spain, Portugal, Italy, and Greece. Recently, carob has shifted to being primarily traded for its seeds rather than its fruit, leading to a preference for wild genotypes in newly established orchards due to their favorable seed characteristics. While selection studies on wild and cultivated types have been conducted in Antalya, Mersin, and Muğla, no specific studies on the physical properties of fruits and seeds from wild genotypes in Antalya's districts exist. Therefore, in this planned study, the physical properties of fruits and seeds of wild genotypes were selected from Antalya and its districts. In this context, the differences in fruit length, fruit width, fruit flesh thickness, fruit weight, seed number, average seed weight and seed yield were determined according to the districts. Indeed, in Demre district, the most important criteria examined, fruit length was determined as 19.03 cm, fruit weight as 10.93 g, and seed yield as 26.80%. Additionally, seed yields were higher in southern districts compared to those at higher altitudes. As a result of this research, it is recommended to use the propagation materials obtained from Demre location in the new orchards to be established especially for seed production.

Keywords: *Ceratonia siliqua*, seed yield, E-410, wild genotypes, Demre

1. GİRİŞ

Türkiye’de kapama keçiboynuzu bahçesi tesisi son yıllarda artmaya başlamıştır. Bu artışta, hazine ve vasfını yitirmiş orman arazilerinin gerçek ve tüzel kişilere uzun yıllar kiraya verilmesi ile keçiboynuzu meyvesinin fiyatındaki artışın katkısı büyüktür. Bahçe tesisindeki bu artış toplam üretim alanı ve üretim miktarına da pozitif yönde yansımıştır. Zira 2019 yılında 7.652 da olan üretim alanı, 2023’te 19.358’e ulaşmıştır (TÜİK, 2023). Bununla birlikte üretim miktarında da artışlar gerçekleşmiş olup, 2019 yılında 16.256 ton olan keçiboynuzu üretimi, 2023 yılında 24.561 tona yükselmiştir.

Keçiboynuzu üretiminin önemli bir kısmı Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti ve Akdeniz Bölgesinin Antalya, Mersin ve Adana illerinde gerçekleşmektedir. Son yıllarda özellikle Adana’da önemli artışlar olmuş ve bu artışın ilerleyen yıllarda toplam üretim üzerine de yansımaları beklenmektedir. Antalya ise, 6.648 dekar üretim alanı ve 12.581 ton üretim miktarı ile tüm iller arasında ön plana çıkmıştır (TÜİK, 2023). Türkiye’de keçiboynuzu üretimi bu üç ilde yaygın olmasına rağmen, keçiboynuzu yetiştiriciliği Urla/İzmir’den başlayarak, Samandağ/Hatay’a kadar çok uzun bir kıyı şeridinde yapılmaktadır (Vardar vd., 1980). Denizden 0-600 m yüksekliğe kadar keçiboynuzu ağaçlarına rastlanmakla beraber, yoğunluk 20-100 m’ye kadar olan kıyı şeridinde bulunmaktadır. Denizden yüksekliği 200-500 m’den sonra olan yerlerde ise ağaç yoğunluğu azalmaktadır. Pekmezci vd. (2004) tarafından yürütülen bir seleksiyon çalışmasında, en yoğun keçiboynuzu popülasyonlarına Adana’nın Kozan ilçesinde, Mersin’in Silifke, Erdemli, Anamur ve Bozyazı ilçelerinde, Antalya’nın Alanya, Gazipaşa, Serik, Manavgat, Kumluca, Demre ve Kaş ilçelerinde, Ege Bölgesi’nde ise Muğla’nın Bodrum, Datça, Marmaris ve Fethiye ilçelerinde rastlandığı bildirilmiştir.

Ülkemiz genelinde keçiboynuzunun doğal yayılım alanlarında en çok yabancı tiplere rastlanırken, aşılı veya kültür formu olan etli tiplere daha az rastlanmaktadır. Aşılı veya kültür formuna ait keçiboynuzu meyveleri sofralık ve sanayiye yönelik olarak kullanılırken, yabancı genotiplere ait meyvelerin ise daha çok tohumu değerlendirilmektedir.

Keçiboynuzu meyvesi, geleneksel olarak yıllardır pekmez yapımında değerlendirilmektedir. Buna ilave olarak, meyvesi öğütülerek un elde edilmekte, kahve ve kakao ya alternatif ürün olarak kullanılmaktadır. Keçiboynuzu tohumları ise galaktomannanca zengin olması nedeni ile zambak üretiminde değerlendirilmektedir. Elde edilen keçiboynuzu zambak E-410 gıda katkı maddesi olarak piyasa da yaygın olarak kullanılmaktadır (Gübbük vd., 2016). Kültür formundaki keçiboynuzlarında meyve ağırlığı, meyve eti kalınlığı ve şeker içeriği gibi meyve özellikleri ön plana çıkmaktadır. Yabancı keçiboynuzunda ise tohum özellikleri ve özellikle tohum randımanının yüksek olması bu tip meyvelerin tercih edilmesinde önem arz etmektedir (Makris ve Kefalas, 2004; Gübbük vd., 2010; Matthaus ve Özcan, 2011; Oziyici vd., 2014; Korkmaz vd., 2020).

Keçiboynuzu yetiştiriciliği yapılan ülkelerde meyve ve tohum özelliklerinin incelenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar morfolojik ve fiziksel özelliklerin coğrafi konumlara göre değişiklik gösterdiğini vurgulamıştır (Barracosa vd., 2007; Haddarah vd., 2013; El Kahkahi vd., 2014; Mahfoud vd., 2018; Boublenza vd., 2019; Kyrtzis vd., 2021; Kassout vd., 2023).

Haddarah vd. (2014), Lübnan’ın farklı lokasyonlarından toplanan dokuz keçiboynuzu çeşidinde tohum ve meyvelerde morfolojik ve kimyasal özellikleri incelemişlerdir. Araştırmacılar, incelenen kriterlerin coğrafi konuma göre farklılık gösterdiğini bildirmişlerdir. Özellikle morfolojik kriterlerin, yapılan temel bileşen analizi sonucunda iki grup altında toplandığını ve bu grupları oluşturan çeşitlerin Lübnan’ın kuzey ve güneyindeki lokasyonlar olduğunu vurgulamışlardır. El Kahkahi vd. (2014), Fas’ta farklı 47 keçiboynuzu popülasyonu üzerinde yürüttükleri çalışmada, meyve ve tohumlardaki genetik varyasyonları değerlendirmişlerdir. Araştırmada, incelenen parametrelerin önemli bir kısmının lokasyonlara göre istatistiksel olarak farklılık gösterdiğini bildirmişlerdir. Araştırmacılar bu durumun coğrafi konum ve genetik farklılıktan kaynaklanabileceğini bildirmişlerdir. Ayrıca korelasyon analizi sonucunda, incelenen kriterlerin birbirileri ile ilişkileri de ortaya konulmuştur. Korelasyon analizine göre; incelenen parametrelerden meyve uzunluğunun artması ve meyve etinin azalmasının tohum sayısını pozitif olarak etkilediği saptanmıştır. Benzer şekilde, Boublenza vd. (2019) Cezayir’in kuzeyinde 10 farklı bölgede meyve ve tohumlarda morfolojik farklılıklar ve kimyasal özellikleri incelemişlerdir. Araştırmacılar, yapılan temel bileşen analizi sonucunda örnek alınan 10 bölgeyi üç gruba ayırmışlardır. Oluşan grupların coğrafi konumlarının birbirinden farklı olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar morfolojik özelliklerin coğrafi konumun yanı sıra çevresel etmenlerden de etkilendiğini bildirmişlerdir.

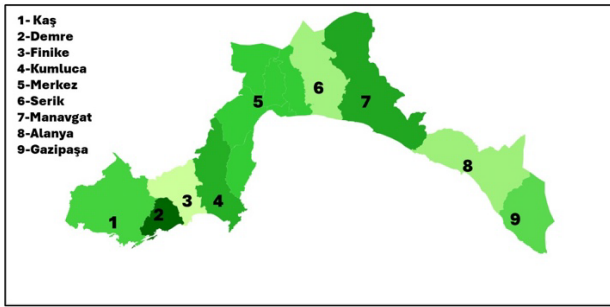
Türkiye’de Korkmaz vd. (2020) Marmaris/Muğla’dan seçilen 36 yabancı genotipte, ağaç, yaprak, meyve ve tohumların morfolojik özellikleri ile meyvelerin biyokimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, incelenen özelliklerin genotiplere göre farklılık gösterdiğini bildirmişlerdir. Bu durumu, ileride yürütülecek ıslah programları ve Türkiye’nin gen kaynakları açısından önemli olduğunun bir işareti olarak göstermişlerdir.

Yukarıda da bildirildiği gibi Türkiye’de keçiboynuzu meyvesi uzun yıllardır sanayinin farklı alanlarında işlenerek kullanılmaktadır. Ancak keçiboynuzu tohumunu işleyen fabrika sayısı daha sınırlıdır. Bununla birlikte, son yıllarda tohumu işleyen fabrika sayısının artması, özellikle tohumundan elde edilen keçiboynuzu zambak veya keçiboynuzu gamı olarak adlandırılan ve katma değeri yüksek bu ürünlere talebi ve yanı sıra yabancı keçiboynuzu meyvelerine olan talebi de arttırmıştır. Günümüzde özellikle gıda, kozmetik, eczacılık, tekstil ve petrokimya olmak üzere farklı alanlarda kullanılan gam (E410) katkı maddesi üretiminde ön plana çıkmaya başlamıştır (La Malfa vd. 2014).

Yabani genotiplerin tohum özellikleri açısından ön plana çıkması nedeniyle, ülkemiz genetik çeşitliliğinin yabani genotipler açısından belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Mevcut durumun ortaya konmasının, yeni kurulacak bahçelerde amacına uygun genotip seçimi açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle yapılan bu çalışmada, ülkemizde yabani popülasyon açısından önemli bir potansiyele sahip Antalya ve çevresinde farklı lokasyonlardan seçilen yabani genotiplere ait meyve ve tohum özelliklerinin tespit edilerek üretici ve araştırmacıların bu konuda bilgilendirilmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu araştırma 2022-2023 yılları arasında Antalya Merkez ile doğu ve batı ilçelerinde (lokasyon) yürütülmüştür. Araştırmada, Antalya'nın; Kaş, Demre, Finike, Kumluca, Serik, Manavgat, Alanya, Gazipaşa ilçeleri ile Merkez ilçelerine ait 9 ilçeden toplanan yabani keçiyoynuzu meyveleri kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Araştırmada kullanılan 9 farklı lokasyon

Araştırmanın laboratuvar çalışmaları Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Bahçe Bitkileri Bölümü Fizyoloji Laboratuvarı'nda yürütülmüştür.

Her bir lokasyona ait birbirine uzak olmayan en az 10 farklı konumdan toplanan yabani keçiyoynuzu meyvelerinde aşağıdaki özellikler incelenmiştir (Çetinay vd., 2013).

Meyve uzunluğu (cm): Meyveler tam sırt kısmından bir şerit metre yardımı ile ölçülmüştür. Ölçümlerde meyvenin uç kısmından meyve sapının başlangıcına kadar olan mesafe baz alınmıştır.

Meyve kalınlığı (mm): Meyvenin iki ucu ve orta kısmı olmak üzere üç farklı yerinden ölçülmüş aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Meyve eni (mm): Meyve kalınlığında olduğu gibi meyvenin üç farklı noktasından ölçülmüş ve ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Meyve ağırlığı (g): Meyveler teker teker hassas terazide tartılarak belirlenmiştir.

Tohum sayısı (adet): Meyvelerde oluşan tohumlar sayılarak belirlenmiştir.

Ortalama tohum ağırlığı (g): Her meyveden en az 5 tohum hassas terazide tartılmış, aritmetik ortalamaları alınarak hesaplanmıştır.

Tohum randımanı (%): Tohum randımanı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

Tohum Randımanı (%) = (1 meyvedeki tohum sayısı x ortalama tohum ağırlığı x 100) / Meyve Ağırlığı

2.1. İstatistiksel Analizler

Araştırmada her lokasyonu temsilen ilgili lokasyona ait 10 farklı konumdan toplanan meyveler kullanılmıştır. Bu konumların her biri 1 tekerrür olarak değerlendirilmiş ve her konumdan en az 10 meyve çalışmaya dahil edilmiştir (9 lokasyon x 10 farklı konum x 10 meyve). Tesadüf parsellerinde faktöriyel düzen deneme desenine göre planlanan çalışma sonucunda, elde edilen tüm verilerin varyans analizi XLSTAT programında yapılmış ve ortalamaların karşılaştırılmasında LSD testi kullanılmıştır. Ayrıca Microsoft Office (2016) programlarından Excel ile araştırmaya konu olan lokasyonlar ait harita üzerinden grafik oluşturulmuş incelenen kritere ait en yüksek değer koyu renk, en düşük değer ise açık renk olacak şekilde görseller elde edilmiştir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Antalya'nın farklı ilçelerinde doğal olarak yetişen yabani keçiyoynuzu genotiplerine ait meyve uzunluğu, meyve eni, meyve kalınlığı ve meyve ağırlığı değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Meyve fiziksel özelliklerine ait incelenen tüm kriterler istatistiksel olarak önemli bulunmuştur (Tablo 1).

Tablo 1. Antalya'nın farklı ilçelerinde yabani keçiyoynuzu genotiplerinde saptanan meyve fiziksel özellikleri

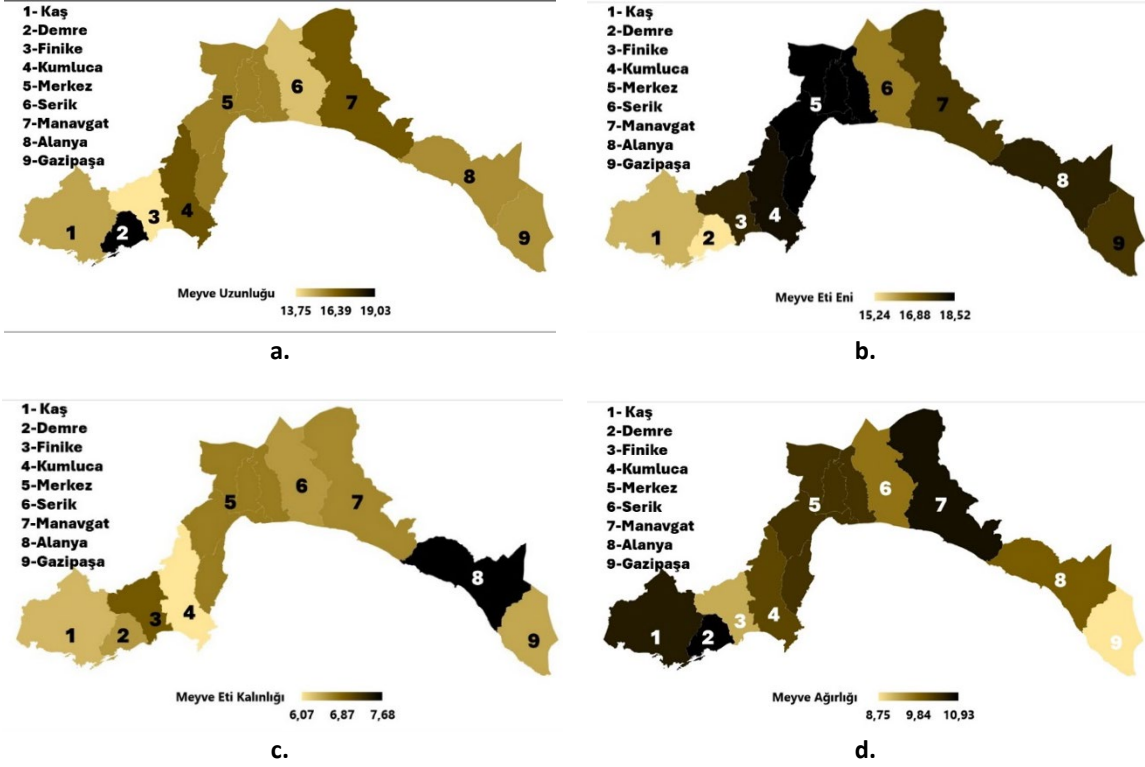
İlçeler	Meyve Uzunluğu (cm)	Meyve Eni (mm)	Meyve Kalınlığı (mm)	Meyve Ağırlığı (g)
Kaş	15,05 de	15,87 e	6,35 cd	10,62 abc
Demre	19,03 a	15,24 f	6,53 c	10,93 a
Finike	13,75 f	17,83 bc	6,93 b	9,22 fg
Kumluca	16,73 b	18,26 ab	6,07 d	10,13 cde
Merkez	15,74 c	18,52 a	6,70 bc	10,34 bcd
Serik	14,49 e	16,53 d	6,54 c	9,68 ef
Manavgat	16,62 b	17,51 c	6,63 bc	10,74 ab
Alanya	15,49 cd	17,93 abc	7,68 a	9,88 de
Gazipaşa	15,39 cd	17,60 c	6,45 cd	8,75 g
LSD _{5%}	0,58	0,59	0,40	0,50

İncelenen kriterlerden meyve uzunluğu değerleri lokasyonlara göre farklılık göstermiştir. En düşük meyve uzunluğu (13,75 cm) Finike lokasyonunda saptanırken, en yüksek (19,03 cm) Demre lokasyonunda belirlenmiştir. Meyve enine ait en düşük değer (15,24 mm), meyve uzunluğu en yüksek olan Demre lokasyonunda belirlenmiş, bunu 15,87 mm ile Kaş, 16,53 mm ile Serik lokasyonları izlemiştir. En yüksek meyve eni ise merkez ilçelerden toplanan genotiplerden elde edilmiştir. Meyve kalite özellikleri içerisinde sofralık ve sanayiye yönelik kullanımda en önemli kriterlerden birisi olan meyve kalınlığı değerleri 6,07 mm (Kumluca) ile 7,68 mm (Alanya) arasında değişim göstermiştir. Lokasyonların coğrafi konumlarının meyve ağırlığı üzerine etkileri, incelendiğinde en düşük meyve ağırlığının Gazipaşa lokasyonunda (8,75 g) belirlenirken, en

yüksek meyve ağırlığı ise 10,93 g ile meyve uzunluğunun en yüksek olan Demre lokasyonunda saptanmıştır (Tablo 1).

Antalya'da doğal olarak yetişen yabancı keçiboynuzu genotiplerinde, lokasyonların meyve özellikleri üzerine etkilerine ait rakamsal değerlerin grafiksel görünümü Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'den de anlaşılacağı gibi en yüksek değerler koyu renk, en düşük değerler ise açık renkler ile ifade edilmektedir. Meyve uzunluğu değerleri incelendiğinde Tablo 1'e paralel olarak en yüksek değerin Demre (2) ilçesine ait olduğu Şekil 2a'da açıkça

görülmektedir. Lokasyonların meyve eni üzerine etkileri incelendiğinde ise en yüksek meyve enine sahip meyvelerin Merkez ilçelerden (5) toplanan meyvelerde olduğu tespit edilmiş ve bunu sırası ile Kumluca (4), Alanya (8) ve Finike (3) ilçeleri izlemiştir (Şekil 2b). En yüksek meyve kalınlığına sahip genotipler Alanya'da (8), en düşük meyve kalınlığına sahip genotipler ise Kumluca (4) ilçesinde belirlenmiştir (Şekil 2c). Şekil 2d'de farklı lokasyonların meyve ağırlığı üzerine etkiler verilmiş olup en yüksek meyve ağırlığı Demre (2) ve daha sonra Manavgat'ta (7), en düşük meyve ağırlığı ise Gazipaşa (9) da belirlenmiştir (Şekil 2d).



Şekil 2. Lokasyonlara göre meyve uzunluğu (a) meyve eni (b) meyve kalınlığı (c) ve meyve ağırlığı (d) değerlerindeki değişimler

Farklı lokasyonların, doğal olarak yetişen yabancı keçiboynuzu genotiplerinin tohum özellikleri üzerine etkileri Tablo 2'de verilmiştir. Tohum özellikleri açısından, incelenen tüm kriterler istatistiksel olarak önemli bulunmuştur. İncelenen kriterlerden tohum sayısı 9,28 adet ile 14,95 adet arasında değişmiş ve en yüksek tohum sayısı Demre ilçesinde tespit edilmiştir. Ortalama tohum ağırlığı üzerine ilçelerin etkisi de istatistiksel olarak önemli bulunmuş ve değerler 0,163 g ile 0,198 g arasında değişim göstermiştir. Finike (0,198 g), Demre (0,196 g) ve Alanya (0,196 g) ilçelerine ait ortalama tohum ağırlıkları aynı istatistiksel grup içerisinde yer almış ve en yüksek ortalama tohum ağırlığı Finike'de saptanmıştır. Tohum özellikleri içerisinde en önemli kriter olan tohum randımanına ait değerler incelendiğinde, istatistiksel olarak 4 ana grup olduğu Tablo 2'de görülmektedir. En düşük tohum randımanı %16,22 ile Antalya merkezinden toplanan genotiplerde belirlenirken, en yüksek tohum randımanı %26,80 ile Demre'de saptanmıştır (Tablo 2).

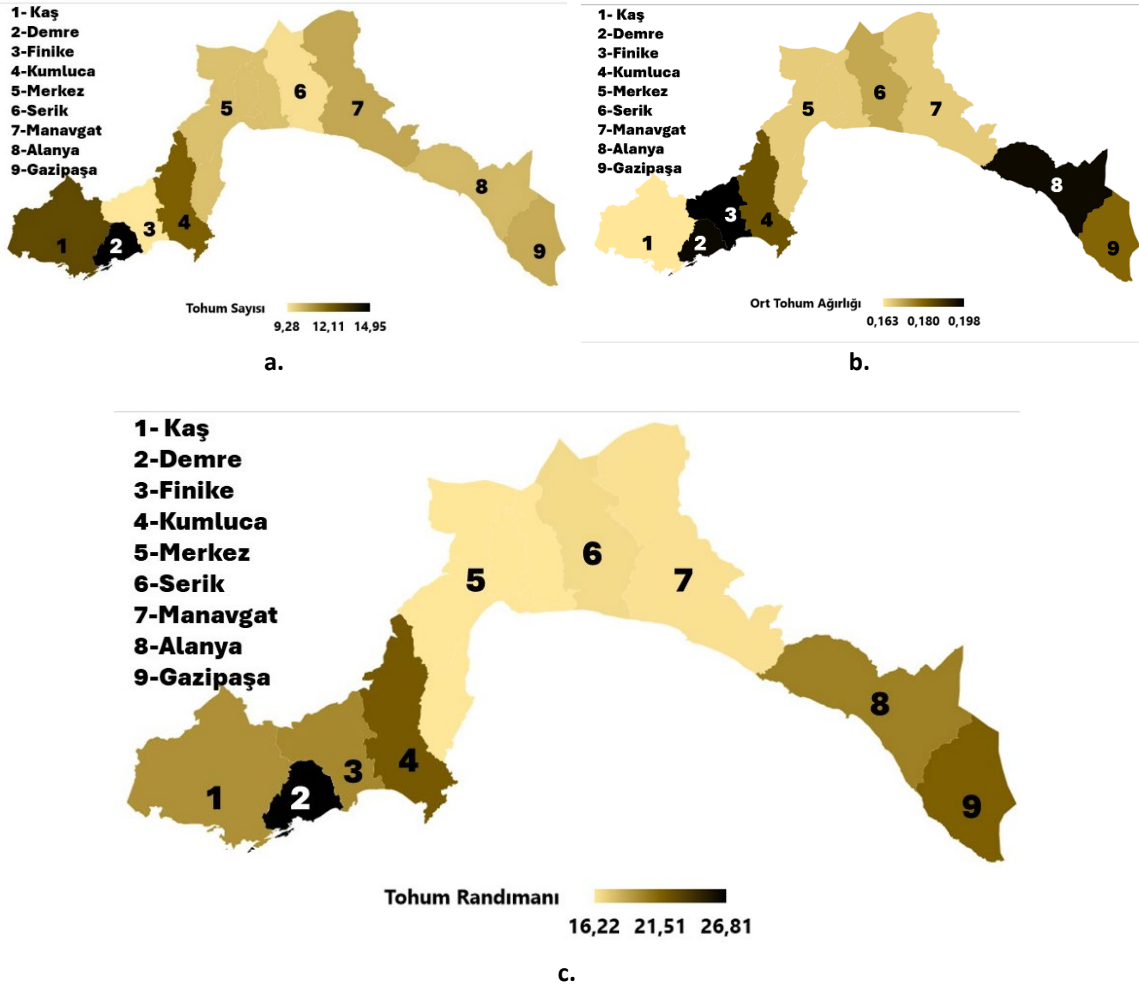
Tablo 2. Antalya'nın farklı ilçelerinde yabancı keçiboynuzu meyvelerinin tohumlarında saptanan meyve tohum özellikleri

İlçeler	Tohum Sayısı (adet)	Ortalama Tohum Ağırlığı (g)	Tohum Randımanı (%)
Kaş	12,79 b	0,163 d	19,62 c
Demre	14,95 a	0,196 a	26,80 a
Finike	9,28 f	0,198 a	19,90 c
Kumluca	12,12 c	0,182 b	21,85 b
Merkez	10,07 e	0,166 cd	16,22 d
Serik	9,44 f	0,171 c	16,69 d
Manavgat	10,60 d	0,166 cd	16,43 d
Alanya	10,24 de	0,196 a	20,26 c
Gazipaşa	10,52 de	0,180 b	21,60 b
LSD _{5%}	0,48	0,005	0,84

Tablo 2'de verilen rakamsal değerlerin, ilçelere göre görselleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu şekilde de görüleceği üzere, en yüksek tohum sayısının Demre (2) ilçesinde, en

yüksek ortalama tohum ağırlığının ise Finike (3) ilçesinde saptandığı görülmektedir. Bunu, Demre (2) ve Alanya (8) ilçeleri izlemiştir (Şekil 3a ve b). Bunlara ilave olarak, en önemli tohum özellikleri kriterinden birisi olan tohum randımanı değerlerindeki değişimler Şekil 3c' de verilmiş

olup, en yüksek tohum randımanının Demre (2) de olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 3. İlçelere göre tohum sayısı (a) ortalama tohum ağırlığı (b) ve tohum randımanı (c) değerlerindeki değişimler

Doğal olarak yetişen yabani keçiboynuzuna ait meyveler, kültür formlarına ait meyvelerin aksine sanayilik olarak değerlendirilmemektedir. Yabani keçiboynuzu meyvelerinin ise daha çok tohumları değerlendirilmekte olup bu tohumların özellikleri bölgelere göre değişmektedir (Makris ve Kefalas, 2004; Barracosa vd., 2007; Gubbuk vd., 2010; Mahfoud vd., 2018; Boublenza vd., 2019; Kyrtzis vd., 2021). Yürütülen bu çalışmalarda, incelenen meyve ve tohum özelliklerinin bulgularımızda olduğu gibi lokasyonlara göre farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Yukarıda da bildirildiği gibi ilçelere göre saptanan farklılıkların, coğrafi konumlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu kapsamda elde edilen bulgular, Barracosa vd. (2007), Mahfoud vd. (2018), Boublenza vd. (2019) ile Kyrtzis vd. (2021)'in bulguları ile uyum göstermektedir. Meyvelere ait incelenen özelliklerinden meyve uzunluğu ve meyve ağırlığının en yüksek Demre lokasyonunda belirlenirken en düşük değerlerin Finike lokasyonundan elde edildiği Tablo 1'de görülmektedir. İki lokasyonun birbirine yakın olmasına rağmen, meyve

özelliklerindeki farklılıklar dikkat çekmektedir. Bu durum lokasyonların coğrafi özelliklerinden kaynaklanmasının yanı sıra, Boublenza vd. (2019)'nin de bildirdiği gibi ilçenin çevresel koşullarının ve toprak özelliklerinin de birbirinden çok farklı olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Nitekim Demre lokasyonunda yabani keçiboynuzlarının doğal yayılımı denizden uzak, dere kenarlarındaki tarıma elverişli ve derinliği fazla olan toprak yapısına sahip alanlardır. Finike lokasyonunda ise yabani keçiboynuzlarının doğal yayılım alanı denize yakın, tarıma elverişsiz ve toprak derinliği olmayan alanlardır.

Yabani keçiboynuzu genotiplerine ait meyvelerde, meyve eni ve meyve kalınlığı da ilçelere göre farklılık göstermiştir. Meyve kalınlığının en yüksek olduğu lokasyon Alanya olarak tespit edilmiştir (Tablo 1, Şekil 2c). Meyve kalınlığının yüksek olması özellikle kültür formuna ait keçiboynuzu meyvelerinde istenen bir kriterdir (Tous vd., 2009). Nitekim araştırmaya konu olan lokasyonlardan Alanya, kültür formuna ait keçiboynuzunun en çok yetiştiği lokasyon olup, yapılan çalışmalar bu ilçeden ümit var olarak

seçilen genotiplerin meyve kalınlığının yüksek olduğunu göstermektedir (Pekmezci vd., 2008). Alanya lokasyonunda meyve kalınlığının yüksek olması, keçiboynuzunun açık tozlanmasından ve Alanya'da kültür formlarının yaygın olarak yetişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yabani keçiboynuzu genotiplerinin, meyvelerinden ziyade tohumları değerlendirilmektedir. Keçiboynuzu tohumundan elde edilen zambak, sanayinin birçok alanında kullanılmaktadır. Bu sebepten dolayı keçiboynuzu meyvelerinde bulunan tohum sayısı, ortalama tohum ağırlığı ve meyvedeki tohum randımanı özellikle keçiboynuzu tohumu ticareti yapan kişiler tarafından önem arz etmektedir. Tohum özelliklerine ait incelenen tüm kriterler göz önüne alındığında, her üç özellik bakımından Demre lokasyonunun ön plana çıktığı Tablo 2 ve Şekil 3'ten anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmalar tohum sayısı, ortalama tohum ağırlığı ve tohum randımanının meyve uzunluğu ve meyve ağırlığı ile pozitif, meyve eni ile negatif bir korelasyon gösterdiğini ortaya koymaktadır (Makris ve Kefales, 2004; El Kahkahi vd., 2014; Boublenza vd., 2019).

Nitekim tohum özellikleri bakımından ön plana çıkan Demre ilçesinde meyve uzunluğu ve ağırlığının yüksek, meyve eninin düşük olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, bulgularımızın Makris ve Kefales (2004), El Kahkahi vd. (2014) ve Boublenza vd. (2019)'nin bulguları ile uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca tohum ticareti açısından önem arz eden tohum randımanı, tüm ilçelere göz önüne alınarak incelendiğinde, enlem dereceleri daha güneyde olan ilçelerde tohum randımanının daha yüksek olduğu Şekil 3c'de açıkça görülmektedir. Bu durumun ekolojik faktörler ile çevresel etmenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim Bouzouita vd. (2004) ile Naghmouchi vd. (2009), Tunus'ta, Haddarah vd. (2013) Lübnan'da farklı lokasyonlardan toplanan meyvelerde yaptıkları çalışmalarda güney lokasyonlara ait bölgelerin tohum randımanının daha yüksek olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Antalya'nın farklı ilçelerine ait yabani keçiboynuzu genotiplerinin kullanıldığı bu çalışmada, incelenen meyve ve tohum özelliklerinin ilçelere göre farklılık gösterdiği

KAYNAKLAR

- Barracosa, P., Osorio, J., & Cravador, A. (2007). Evaluation of fruit and seed diversity and characterization of carob (*Ceratonia siliqua* L.) cultivars in Algarve region. *Scientia Horticulturae*, 114(4), 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.06.024>
- Boublenza, I., Ghezlaoui, S., Mahdad, M., Vasaï, F., & Chemat, F. (2019). Algerian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological and chemical variability of their fruits and seeds. *Scientia Horticulturae*, 256, 108537. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.064>
- Çetinay, Ş., Güler, S., Çoşgun, S., Şahin, M., & Güngöroğlu, C. (2013). Doğal ve aşıllı keçiboynuzu (*Ceratonia siliqua* L.) ağaçlarının meyve ve tohum özellikleri bakımından karşılaştırılması (Köprülü Kanyon Milli Parkı Örneği).

belirlenmiştir. Bu durumun, her ilçenin kendine özgü coğrafi ve iklimsel özelliklerin farklılığından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. İncelenen tüm meyve ve tohum özellikleri bakımından, Demre lokasyonunun ön plana çıktığı, özellikle çalışmanın amaçları arasında yer alan ve tohuma ait kriterler göz önüne alındığında ise Demre ilçesini Kumluca ilçesinin izlediği belirlenmiştir.

TEŞEKKÜRLER

Bu araştırma makalesi, TÜBİTAK-122N042 No'lu projeden üretilmiştir. Yazarlar, proje desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirler.

YAZAR KATKILARI

Recep BALKIÇ: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntemi, (c) Literatür Taraması, (f) Veri Toplama, İşleme, (g) Analiz, Yorum, (h) Metin Yazma

İlknur POLAT: (b) Çalışma Tasarısı, Yöntemi, (c) Literatür Taraması, Analiz, (h) Metin Yazma, (i) Eleştirel İnceleme

Hamide GÜBBÜK: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntemi, (d) Danışmanlık, (f) Veri Toplama, İşleme, (g) Analiz, (h) Metin Yazma, (i) Eleştirel İnceleme

ETİK BEYAN

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17(1), 64-69.

El Kahkahi, R., Zouhair, R., Ait Chitt, M., & Errakhi, R. (2014). Morocco carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, 2(4), 38-47.

Gubbuk, H., Kafkas, E., Guven, D., & Gunes, E. (2010). Physical and phytochemical profile of wild and domesticated carob (*Ceratonia siliqua* L.) genotypes. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(4), 1129-1136. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010084-1209>

Gübbük, H., Tozlu, İ., Doğan, A., & Balkıç, R. (2016). Çevre, endüstriyel kullanım ve insan sağlığı yönleriyle keçiboynuzu.

- Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 21(2), 207-215.
- Haddarah, A., Ismail, A., Bassal, A., Hamieh, T., Ioannou, I., & Ghoul, M. (2013). Morphological and chemical variability of Lebanese carob varieties. *European Scientific Journal*, 9(18), 353-369.
- Kassout, J., Hmimsa, Y., Fatehi, S. E., Kadaoui, K., Houssni, M., Chakkour, S., & Ater, M. (2023). Aridity gradients shape intraspecific variability of morphological traits in native *Ceratonia siliqua* L. of Morocco. *Plants*, 12(19), 3447-3465. <https://doi.org/10.3390/plants12193447>
- Korkmaz, N., Akin, M., Koc, A., Eydurhan, S. P., İlhan, G., Sagbas, H. I., & Ercisli, S. (2020). Morphological and biochemical diversity among wild-grown carob trees (*Ceratonia siliqua* L.). *Folia Horticulturae*, 32(1), 69-78.
- Kyrtzias, A. C., Antoniou, C., Papayiannis, L. C., Graziani, G., Roupheal, Y., & Kyriacou, M. C. (2021). Pod morphology, primary and secondary metabolite profiles in non-grafted and grafted carob germplasm are configured by agro-environmental zone, genotype, and growing season. *Frontiers in Plant Science*, 11, 612376. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.612376>
- La Malfa, S., Currò, S., Douglas, A. B., Brugaletta, M., Caruso, M., & Gentile, A. (2014). Genetic diversity revealed by EST-SSR markers in carob tree (*Ceratonia siliqua* L.). *Biochemical Systematics and Ecology*, 55, 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2014.03.022>
- Mahfoud, H., Ameen, T., Kazngi, F., & Nasser, S. (2018). Morphological and genetic variability of natural Syrian carob (*Ceratonia siliqua* L.). *SSRG International Journal of Agriculture & Environmental Science*, 5, 70-76.
- Makris, D. P., & Kefalas, P. (2004). Carob pods (*Ceratonia siliqua* L.) as a source of polyphenolic antioxidants. *Food Technology and Biotechnology*, 42(2), 105-108.
- Matthaus, B., & Özcan, M. M. (2011). Lipid evaluation of cultivated and wild carob (*Ceratonia siliqua* L.) seed oil growing in Turkey. *Scientia Horticulturae*, 130(1), 181-184. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.06.034>
- Naghmouchi, S., Khouja, M. L., Romero, A., Tous, J., & Boussaid, M. (2009). Tunisian carob (*Ceratonia siliqua* L.) populations: Morphological variability of pods and kernel. *Scientia Horticulturae*, 121(2), 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.02.026>
- Oziyci, H. R., Tetik, N., Turhan, I., Yatmaz, E., Ucgun, K., Akgul, H., Gubbuk, H., & Karhan, M. (2014). Mineral composition of pods and seeds of wild and grafted carob (*Ceratonia siliqua* L.) fruits. *Scientia Horticulturae*, 167, 149-152. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.01.00>
- Pekmezci, M., Gübbük, H., Eti, S., Erkan, M., Onus, N., Biner, B., Adak, N., & Karaşahin, I. (2004). Akdeniz Bölgesinde Yetiştirilen Keçiboynuzu Tiplerinin Seleksiyonu ve Seçilen Tiplerin Muhafazası. *Proje Sonuç Raporu, Proje No/TARP-2523*, 47 s.
- Tous, J., Romero, A., Hermoso, J. F., Ninot, A., Plana, J., & Battle, I. (2009). Agronomic and commercial performance of four Spanish carob cultivars. *HortTechnology*, 19(2), 465-470. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.19.2.465>
- TÜİK. (2023). Türkiye İstatistik Kurumu. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Bitkisel-Uretim-Istatistikleri-2023-49535>
- Vardar, Y., Seçmen, Ö., & Öztürk, M. (1980). Some distributional problems and biological characteristics of *Ceratonia* in Turkey. *Portugaliae Acta Biologica*, 16(1-4), 75-86.

Döngüsel Taşıma Sistemi Yan Kısıtlarına Sahip Konteyner Yükleme Problemi için Bir Model Önerisi

A Mathematical Model for Container Loading Problem with Milkrun Transportation Side Constraints

Tevfik ALTINALEV^{1*} , Alpaslan FIĞLALI² 

¹ Hava Elektronik Sanayi A.Ş., Komuta-Kontrol ve Savunma Teknolojileri Genel Müdür Yardımcılığı, İstanbul, Türkiye

² Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Article Info

Research Article

DOI: 10.29048/makufebed.1447960

Corresponding Author

Tevfik ALTINALEV

Email: taltinalev@hotmail.com

Article History

Received: 06.03.2024

Revised: 24.06.2024

Accepted: 06.09.2024

Available Online: 26.12.2024

To Cite

Altınalev, T., & Fiğlalı, A., (2024). Döngüsel taşıma sistemi yan kısıtlarına sahip konteyner yükleme problemi için bir model önerisi. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 15(2), 81-102.
<https://doi.org/10.29048/makufebed.1447960>

Öz: Konteyner Yükleme Problemi, Kesme ve Paketleme Problemleri altında incelenen ve taşımacılıkta yaygın olarak kullanılan problemlerden biridir. Özellikle fazla sayıda yan kısıtlara sahip versiyonları NP-zor problemler kategorisindedir. Bu çalışmada, bir lojistik firmasının yedek parça taşıma problemini çözen özgün bir Konteyner Yükleme Problemi modellenerek çözülmüştür. Ana problemin içermiş olduğu değişken ve kısıt sayısı fazla olduğu için çözüm süresi çok uzamaktadır. Bu nedenle ana problem ikiye bölünerek ardışık olarak çözülmeye çalışılmıştır. Birinci problem, konteynerler içerisine konulacak kutuların ayırımı ve kullanılacak tırların turlarını bulurken, ikinci problem, ayrılan kutuların konteynerlerin içerisine yerleşimini sağlamaktadır. İki problem ardışık olarak çözüldükçe, birinci problemin çıktısı, ikinci probleme girdi olarak verilmektedir. Daha sonra bulunan sonuç, bütün paketlerin yüklenmesi için gerekli olan konteyner sayısının alt sınırıyla karşılaştırılarak sonuçların performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Sentetik olarak oluşturulan orta ölçekli test problemi, iki model ile ardışık olarak çözülmüş ve makul bir sürede çözülebilen, en iyi çözüme çok yakın uygun bir çözüm bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Araç rotalama problemi, dikdörtgenel konteyner yükleme problemi, kesme ve paketleme problemi, sırt çantası problemi, stok kesme problemi, döngüsel taşıma sistemi

ABSTRACT: Container Loading Problem is one of the common problems encountered in logistics under Cutting and Packing Problem category. Particularly, the versions with more side constraints are considered as Non-Deterministic Polynomial-Time (NP) Hard problem. In this research, an original Container Loading Problem, which finds a solution to the spare-part transportation problem of a company, is modeled and solved. Since the main problem has lots of variables and constraints, the solving time of the problem gets larger. Therefore, the main problem is divided into two parts and tried to be solved sequentially. Whereas the first problem is used for the allocation of the boxes into the containers and the tours of the trucks, the second problem is used for the stowage of the boxes into the used containers. When both problems are solved sequentially, the output of the first problem is provided as the input to the second problem. Finally, the results are benchmarked with the lower bound on the required number of containers. The medium size test problem, built with synthetic data, is solved with the two models sequentially and a feasible near-optimal solution is found in the reasonable time.

Keywords: Vehicle routing problem, rectangular container loading problem, cutting and packing problem, knapsack problem, cutting stock problem, milkrun system

1. GİRİŞ

Günümüzde tedarik zinciri uygulamalarının, lojistik alanında yaygınlaşmasıyla birlikte, üretici firmalar ile müşterileri arasında, döngüsel taşıma sistemlerine (milkrun) ve konteyner taşımacılığına olan ilgi artmıştır. Lojistik şirketleri, maliyetlerini düşürebilmek ve kaliteli taşımacılık yapabilmek amacıyla araç rotalama ve konteyner yükleme konularına önem vermeye başlamıştır. Bunun sonucunda da son yıllarda literatürde deterministik-olmayan polinomsal-zamanda çözülemeyen zor (NP Hard) problemler kategorisinde olan Araç Rotalama ve Konteyner Yükleme Problemi konusundaki çalışmalara yönelim artmıştır.

Konteyner Yükleme Problemi (KYP), Kesme ve Paketleme Problemleri altında incelenmekte olup, belirli kriterlere göre sınıflandırılabilen çok fazla sayıda tipe sahiptir (Wascher vd., 2007). Modelin tipi ve model içerisinde kullanılan yan kısıtların, karar değişkenlerinin çeşitliliği ve sayısına bağlı olarak problemin zorluk derecesi değişmektedir.

1.1. Problemin Tanımlanması

Bu çalışmada, tedarikçileriyle üretici firma veya üretici firma ile müşterileri arasındaki malzeme akışını düzenlemek amacıyla döngüsel taşıma sistemlerinde kullanılan konteynerlerin rotalanması ve optimum yüklemesi üzerine bir matematiksel model oluşturulmuştur.

Değişik boyutlara sahip, dikdörtgenler prizması şeklinde kutular halinde paketlenen yedek parçalar, tedarikçi kapılarından alınarak tırlar vasıtasıyla müşteri veya talep kapılarına taşınmaktadır. Değişik tip ve boyuttaki paketler hem tedarikçi hem de müşteri tarafında farklı kapılardan alınıp, farklı kapılara bırakılmaktadır. Kapılarda yığılma olmasının engellenmesi için talep ayırmaya izin verilebilir. Paketlerin konteynerlere atanması sırasında paketlerin geometrik olarak konteyner içerisinde bulunmasına ve konteynerin ağırlık olarak alabileceği maksimum yük ve hacim sınırına uyulması gerekmektedir. Bunun yanında, aynı konteynerde olması gereken paket tiplerine veya farklı konteynerde bulunması gereken paket tiplerine yüklemeler sırasında dikkat edilmelidir. Paketlerin konteyner içerisine yerleştirilmesinde de öncelikle paketlerin XY, YZ veya XZ düzlemlerinin en az bir tanesinde üst üste çakışmaması gerekmektedir. Paketlerin ortogonal olarak oryantasyonları her şekilde olabilir. Yani paketlerin üç boyutu (en, boy, yükseklik) yer değiştirebilir. Bu durumda bir paket için altı farklı oryantasyona izin verilmektedir. Ancak paketler ortogonal (konteyner yüzeylerine dik olmalı) olarak yerleştirilmeli, herhangi bir açıyla dönmesine izin verilmemelidir. Bunun yanında dikey kararlılık ve ağırlık dağılım kısıtları da dikkate alınmalıdır. Dikey kararlılık kısıtları ile yerleştirilen paketlerin dikey olarak sağlam bir şekilde durmaları sağlanırken, ağırlık dağılım kısıtları ile paketlerin konteynerin ağırlık merkezine göre dengeli bir şekilde dağılımları sağlanmaktadır. Amaç

fonksiyonu bütün yedek parça paketlerini yerleştirebilecek şekilde minimum sayıda konteyner kullanmak olarak belirlenmiştir.

Bir önceki paragrafta tanımlanan, tedarikçilerle üretici firma arasındaki döngüsel malzeme akışını optimize etmek amacıyla özgün bir KYP tasarlanarak, matematiksel modeli oluşturulmuş ve çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir.

Kurulan matematiksel modelin çözülmesi sonucunda, çeşitli tedarikçilerden toplanacak değişik boyutlu paketlerin belirlenen kısıtlar altında konteyner taşıyan tırların rotalanması, taşınacak paketlerin konteynerlere atanması ve paketlerin konteynerler içerisine yerleşim planları çıkarılmaktadır.

1.2. KYP için Yazın Taraması

Bu kısımda, "Konteyner Yükleme Problemi (KYP)'nin çeşitleri, kısıtlamaları ve çözüm yaklaşımları literatürden alınan örneklerle anlatılmıştır. Yapılan taramada, 2012 yılında yayımlanan araştırma makalesi temel alınmıştır (Bortfeldt ve Wascher, 2012).

1.2.1. Tanım ve sınıflandırma

KYP; bir çeşit geometrik atama problemi olarak yorumlanabilir. Daha açık ifadeyle; kargo ya da yük ismi verilen üç boyutlu küçük nesnelerin konteyner adı verilen çoğunlukla dikdörtgen prizması şeklindeki büyük nesnelere atanmasıdır. Atama yapılırken aşağıda verilen iki uygunluk şartı (feasibility conditions) mutlaka sağlanmalıdır:

- Bütün küçük nesnelere fiziksel olarak konteynerin içerisinde olmalıdır,
- Konteynerin içerisine yerleştirilen küçük nesnelere en az bir düzlemde (XY, XZ veya YZ düzlemi) üst üste çakışmamalıdır.

2007 yılında yapılan sınıflandırmaya (Wascher vd., 2007) göre KYP iki gruba ayrılır:

- Küçük nesnelere tamamına yer sağlanacak yeterli sayıda konteynerin olduğu,
- Küçük nesnelere bir kısmına yer sağlandığı sınırlı sayıda konteynerin olduğu problemlerdir.

Birinci grup problemler atama tipine göre girdi minimizasyonu, ikinci grup problemler çıktı maksimizasyonu problemlerdir. Birinci grup problemlerde, kullanılan konteyner sayısı minimum yapılmak istenirken, ikinci grup problemlerde yüklenen küçük nesne sayısı veya konteyner hacim faydası maksimum yapılmaya çalışılır.

1.2.2. Konteyner yükleme probleminde kısıtlar

Bu bölümde, KYP'de kullanılan kısıt setleri kategorilere ayrılarak anlatılacaktır: KYP kısıtlamaları sıkı (hard) ve gevşek (soft) olarak da sınıflandırılabilir. Sıkı kısıtlamalar, problemin çözümü olan bir yükleme paterni tarafından mutlaka sağlanmalıdır. Başka bir deyişle sıkı kısıtları sağlamayan bir yükleme paterni uygun bir çözüm olamaz. Gevşek kısıtlarda ise kısıt ihlalleri belirli seviyelerde kabul edilebilir.

1.2.2.1. Ağırılık limiti kısıtlamaları

Literatürde yer alan problemlerin yaklaşık %14'ünde dahil edilen (Gehring ve Bortfeldt, 1997; Terno vd., 2000; Chan vd., 2006; Egeblad vd., 2010; Liu vd., 2011; Nascimento vd., 2021) bir konteynerin belirli ağırılık sınırını aşmadığı sürece küçük nesnelere yüklenebileceğini ifade eden kısıtlardır. Bu kısıtlar, Doğrusal Sirt Çantası (Linear Knapsack) kısıtı olarak modellenirler. Yüklenen küçük nesnelere toplam ağırılığının, konteynerin taşıyabileceği toplam ağırılık sınırından fazla olamayacağını ifade eder.

Yüklenen parçaların ağırılıkları toplamı \leq Konteynerin ağırılık sınırı

1.2.2.2. Ağırılık dağılım kısıtlamaları

Ağırılık Dağılım (Yük Denge) Kısıtlamaları, yük ağırılıklarının konteyner tabanına dengeli bir şekilde dağılımını ifade eden kısıtlardır. Bu sayede hareket esnasında yatay eksende yüklerin kayma riski azaltılmış olur. Ağırılık Dağılım Kısıtlamaları, literatürde mevcut problemlerin yaklaşık %12'sinde kapsanmıştır (Davies ve Bischoff, 1999; Techanitisawad ve Tangwiwatwong, 2004; Deplano vd., 2021).

Ağırılık dengesini sağlayabilmek için yükün ağırılık merkezine konteyner tabanının geometrik olarak orta noktasına yakın olması ya da geometrik merkezden sapmanın belirli bir mesafeyi geçmemesi gerekmektedir.

1.2.2.3. Yükleme öncelikleri kısıtlamaları

Bu tarz kısıtlar sadece çıktı maksimizasyonu amaçlı problemlerde kullanılırlar. Konteyner hacmi bütün küçük nesnelere alabilecek kadar büyük olmadığı durumlarda, hangi parçaların yüklenmesi gerektiğine, hangi parçaların geride kalması gerektiğine karar verilmelidir. Bu nedenle her bir parça için yükleme önceliği belirlenebilir. Bu öncelikler ürünlerin teslim zamanı, raf ömürleri vb. şekilde belirlenebilir.

Yükleme öncelikleri kısıtlamaları önemli kısıtlar olarak görülse de konteyner yükleme algoritmalarının tasarımında çok az direkt olarak göz önüne alınmıştır. Bu zamana kadar az sayıda makale bu konuya değinmiştir.

Bir çalışmada sıkı ve gevşek yükleme önceliklerini göz önüne alan bir genetik algoritma önerilmiştir (Bortfeldt ve Gehring, 1999). Bu algoritmada her bir yük için yüksek veya alçak olmak üzere iki öncelik belirlenmiştir. Algoritma önce yüksek öncelikli kargoların yüklenmesi için tasarlanmıştır. Alçak önceliklerin yüklenmesi de amaç fonksiyonu aracılığıyla yapılmıştır.

Diğer bir çalışmada, yeni bir algoritma önerilmemiş olup, amaç fonksiyonu katsayılarını ayarlayarak öncelikleri dahil etmeye çalışılmıştır (Bischoff ve Ratcliff, 1995).

Son olarak, bir lojistik firmasının karşılaştığı gerçek hayat problemi için bir matematiksel model önerilmiş ve bu modelde müşteri öncelikleri ve gereksiz kargo hareketlerini

azaltma kısıtlamaları da eklenmiştir (Gajda vd., 2022). Ancak model; çok sayıda yan kısıt içerdiğinden optimum olarak çözülememiş, rassal yapıcı sezgisel bir yöntem ve rahatlatma teknikleri uygulanmıştır.

1.2.2.4. Oryantasyon kısıtlamaları

Dikdörtgenler prizması şeklindeki bir kutunun dikey veya yatay oryantasyonu boyutlarıyla (en, boy ve yükseklik) tanımlanır. Kutunun boyutlarından birisi yükseklik olabilir. Bu nedenle herhangi bir kutunun üç farklı dikey oryantasyonu olabilir. Herhangi bir boyut yükseklik olarak seçildiğinde geri kalan iki boyuttan herhangi birisi yatay oryantasyon olarak seçilebilir. Bu durumda, bir kutunun 3x2=6 adet farklı oryantasyonu olabilir.

Oryantasyon kısıtları genelde bir kutunun dikey oryantasyonunu bir veya iki boyuta kısıtlar. Örneğin uzun, alçak ve dar kutularda, kutunun en küçük yüzey üzerine yerleştirilmesini kısıtlar. Bir kutunun taşıyıcı kuvveti dikey oryantasyonuna bağlıdır. Dikey oryantasyon kısıtları ürünlerin ve paketlemenin hasar görmesini engellemek ve yük dengesini sağlamak için eklenirler.

Dikey oryantasyon kısıtlarına ek olarak, kutuların yatay oryantasyonunu sınırlayan kısıtlamalar da eklenebilir. Oryantasyon kısıtları literatürde en çok kullanılan kısıtlamalardır. Yazılan makalelerin %71'inde oryantasyon kısıtlamaları kullanılmıştır. Yazılan makalelerin bir kısmında yatay ve dikey olarak sadece bir oryantasyona (Morabito ve Arenelas, 1994; Martello vd., 2000; Amossen ve Psinger, 2010; Junqueira vd., 2012), bir kısmında dikeyde bir, yatayda bütün oryantasyonlara (Hemminki vd., 1998; Chien ve Deng, 2004; Fuellerer vd., 2010), bir kısmında da dikey ve yatayda bütün oryantasyonlara (Parreno vd., 2008; He ve Huang, 2011) izin verilmiştir.

1.2.2.5. Yığma kısıtları

Yığma ya da taşıyıcı kısıtlar, kutuların birbirlerinin üzerine nasıl yerleştirilmesi gerektiğini sınırlar. Kutuların sınırlı taşıma kuvvetlerinden ortaya çıkmıştır. Kutunun parçalanmadan önce ne kadar ağırılık veya basınca dayanacağını ifade eden kısıtlardır. Kutuların birbirleri üzerine konmasını engelleyen ve kırılabilirliği önlemeye yönelik kısıtlamalardır. Literatürdeki problemlerin %15'inde bağlayıcı kısıt olarak dahil edilmişlerdir (Terno vd., 2000; Junqueira vd., 2012).

1.2.2.6. Tam yükleme kısıtları

Bu kısıtlar fonksiyonel olarak birbirine bağlı kargo setlerinin beraber olarak konteynerde yüklenmesini sağlar. Eğer kargo alt kümesinin herhangi bir parçası yüklendiyse diğer parçalar da yüklenmelidir. Eğer kargo setinin bir parçası yüklenmediyse diğer parçalar da yüklenmemelidir. Tam yükleme kısıtları, çıktı maksimizasyonu tipi problemlerde geçerli olup, sıkı kısıtlardır. Bu tarz kısıtlar iki farklı durumda incelenebilir. Birinci durumda, bütün kargo seti aynı sevkியatta olmalı, ancak aynı konteynerde olmasına gerek yoktur. İkinci durumda ise bütün kargo seti aynı konteynerde olmalıdır.

Tam yükleme kısıtları literatürde nadiren yer almıştır. Bir çalışmada dahil edilmiş olup, yukarıda anlatılan birinci duruma örnek oluşturmaktadır (Eley, 2003).

2023 yılında yapılan bir çalışmada, zor paketleme, talep ayırma ve tam yükleme kısıtlamalarını içeren bir matematiksel model önerilmiştir (Gimenez-Palacios vd., 2023). Ancak sadece çok küçük ölçekli modelleri optimum çözebilmişlerdir. Bütün problemleri çözebilmek için, rahatlatma ve sezgisel yöntemleri birleştiren bir dekompozisyon prosedürü önermişlerdir.

1.2.2.7. Paylaştırma kısıtları

Paylaştırma kısıtları, çoklu konteyner yükleme problemlerinde dahil edilir. İki tip paylaştırma kısıtı vardır: Bağlantı Kısıtları ve Ayırma Kısıtları. Bağlantı Kısıtları (Terno vd., 2000; Liu vd., 2011) durumunda belirli bir kargo seti aynı konteynerde yüklenmelidir. Bu durum, aynı varış noktasına giden kargolarda ya da bir müşteri tarafından tek sevkiyatla teslim alınmak istenen kargolarda uygulanmaktadır. Diğer tarafta, Ayırma Kısıtları (Eley, 2003) ise aynı konteynerde yüklenmemesi gereken parçalarda uygulanmaktadır. Örneğin parfüm ve yiyecek kargoları aynı konteynerde olmamalıdır.

Paylaşım kısıtları, Birleşik Konteyner Yükleme ve Araç Rotalama Problemlerinde de standart bir kısıt seti olarak kullanılır ve sıkı kısıt olarak kabul edilirler.

1.2.2.8. Yerleştirme kısıtları

Yerleştirme kısıtları parçanın konteynerin içerisindeki yerini kısıtlar. Mutlak veya göreceli olarak ifade edilebilirler.

Bu kısıtlar belirli parçaların konteynerin belirli bir yerine veya alanına yerleştirilmesini sağlar. Örneğin iri ve hacimli parçalar konteyner kapısının yakınına yerleştirilmelidir. Uçucu sıvılar ve patlayıcılar gerektiğinde çabuk ulaşılabilmesi için paletin dış yüzüne yakın paketlenmelidir.

Bu tarz kısıtlar belirli bir parça kümesinin birbirine yakın veya belirli bir mesafe içerisinde yerleştirilmesini, aynı müşterinin parçalarının birbirine yakın yerleştirilmesini ya da belirli bir grup parçanın birbirine yakın yerleştirilmemesini ifade eder.

Birçok yere dağıtım yapıldığı durumlarda mutlak (Hodgson, 1982) ve göreceli (Terno vd., 2000; Egeblad vd., 2010; Makarem ve Haraty, 2010) yerleştirme kısıtlarının kombinasyonu kullanılabilir. Farklı müşterilere giden ürünler farklı alt kümeleri temsil ederler. Her küme konteynerin içerisinde birbirine yakın yerleştirilirler. Aynı zamanda kümelerin konteyner içerisindeki sıralaması yükleme ve boşaltma sırasındaki gereksiz operasyonları azaltacak şekilde düzenlenebilir. Her bir durakta boşaltılacak parçalar diğer parçaları yeniden düzenlemeye mahal vermeyecek şekilde hazır bulundurulabilir. Bu durum eğer parçalar Last-In-First-Out (LIFO) stratejisine göre yerleştirildiyse mümkün olabilir. Örneğin i parçasının

gideceği yer j parçasının gideceği yerden önce ziyaret edilecekse, o zaman j parçası i parçasının üzerine ya da konteyner kapısı ile i parçası arasına yerleştirilmemelidir.

1.2.2.9. Kararlılık (denge) kısıtları

Literatürde yük dengesi, en önemli konulardan biri olarak göze çarpar. Dengesiz yüklemeler kargonun zarar görmesi, yükleme/boşaltma sırasında meydana gelen kazalar ve insan yaralanmaları gibi durumlarla sonuçlanabilir. Görünen önemine rağmen, yük kararlılığı konuları konteyner yükleme makalelerinde direkt olarak ele alınmaz. Yazarlar genelde yüksek konteyner boşluk faydası garanti edildiğinde kararlılığın bunun sonucu olarak sağlanabileceğini düşünüyorlar (Pisinger, 2002; Parreno vd., 2008). Pratikte yük dengesi kalan küçük boşluklara dolgu maddesi doldurularak sağlanabilir. Üç boyutlu palet yüklemede yüklerin düşmesini engellemek için daralan levhalar kullanılabilir (Junqueira vd., 2012).

Yük dengesi, eksenlere göre dikey ve yatay olarak ikiye ayrılabilir. Dikey kararlılık yüklerin konteyner tabanına veya birbirlerinin üzerine düşmesini engeller. Alternatif olarak, her kutunun ağırlık merkezi başka bir kutunun üst yüzeyi ya da konteyner tabanı tarafından desteklenmelidir. %100 destek istendiğinde destekleyen alanın dolaylı olarak bağlı olması istenir (Ngoi vd., 1994; Bischoff ve Ratcliff, 1995; Abdou ve Elmasry, 1999; Fanslau ve Bortfeldt, 2010; Goncalves ve Resende, 2012). Az sayıda makalede destekleyen alan tek bir kutudan meydana gelmektedir. Üzerine konan kutunun ise alttaki kutunun iki boyutundan daha küçük olması gerekir. Alternatif olarak destekleyen alan farklı ve bağlı olmayan üstte konulduğunda köprü oluşturan parçalardan oluşabilir.

Bazı makalelerde bütün kutuların öz ağırlıklarının aynı olduğu varsayılarak ağırlıkları hacimlerine göre orantılı olmuştur. Bu durumda bütün kutuların ağırlık merkezi çakışmaktadır. Böylece kuvvet ve döndürme momentlerine göre, yazarlar dikey olarak kararlı yük dengesi sağlayacak geometrik merkezlerin yerleri için denge şartlarını formüle edebilmişlerdir.

Yatay kararlılık konteyner hareket ederken içinde bulunan malzemelerin kaymamasını ve yer değiştirmemesini sağlar. Eğer paketlenen malzemeler birbirine ya da konteyner duvarına komşu olarak yerleştirilirse tam yatay kararlılık sağlanmış olur. Üç boyutlu palet yüklemede, paletin yatay kararlılığı çeşitli kutu katmanlarını birbirine bağlayarak ya da kenetleyerek geliştirilebilir.

Yapılan bir çalışmada kenetlenme seviyesini ölçmek için üç kriter belirlenmiştir (Carpenter ve Dowland, 1985).

a) Destekleyici Kriter: Her kutunun tabanı en az iki kutunun üst yüzeyi ile temasta olmalıdır.

b) Taban Temas Kriteri: Her kutunun taban alanının en az belirli bir yüzdesi aşağıdaki tabaka tarafından desteklenmelidir.

c) Giyotin Olmayan Kriter: Yiğinin içerisinde geçiş

bağlantı yerinin uzunluğu, yığının maksimum uzunluk veya genişliğinin belirli maksimum yüzdesini geçmemelidir.

1.2.2.10. Karmaşıklık kısıtları

Karmaşıklık Kısıtları, teknolojik ve insan kaynakları yönünden kaynaklanan sınırlamaları yansıtır. Sıkı kısıt olarak kabul edilirler.

İlk olarak 1985 yılında, yükleme boşaltma operasyonları sırasında, kargonun Sıkıştırma Kamyonu (Clamp Truck) vasıtasıyla yığın formunda hareket ettirildiği bir durumu incelemiştir (Carpenter ve Dowsland, 1985). Sıkıştırılabilir olması için, yığının en azından birbirine zıt yönde iki mükemmel düz yüzü olmalıdır ve en azından sıkıştırma düzlemine paralel bütün kutu kenarlarının uzunluğunun belirli bir yüzdesi diğer kutularla temas halinde bulunmalıdır (sıkıştırılabilirlik kriteri).

Yazarlar tarafından sıklıkla göz önünde bulundurulmuş başka bir Karmaşıklık Kısıtı da Giyotin Kesme kısıtlarıdır. Giyotin patern bir çeşit yükleme paternidir (Girlich ve Tarnowski, 1994; Hifi, 2004). Eğer bir yükleme, konteyner yüzlerine paralel bir şekilde seri olarak yapılan kesimlerden elde ediliyorsa Giyotin patern adını alır. Başka bir ifadeyle, konteyneri herhangi bir yerinden giyotin ile kestiğimizde, paketler zarar görmüyorsa giyotin paterne göre yerleştirilmiştir. Giyotin patern konteyner yüklemede her zaman uygun olmayabilir. Çünkü nakliye işlemi sırasında kararsız olabilirler. Özellikle palet yükleme operasyonlarında kabul edilemezler. Çünkü yükleri güvenli hale getirebilmek için daralan-paketleme ve kavrama gibi ilave operasyonlar gerektirir.

Diğer bir yükleme şekli de robot tarafından paketlenen paternidir. Bu paternde, konteynerin arkasındaki sol köşeden başlayarak parçaları sırayla bir önce yerleştirilen parçanın ya önüne ya sağına ya da üstüne yerleştirerek yükleme devam edilir.

2024 yılında yapılan bir çalışmada, robot yükleme sistemi kullanan bir Konteyner Yükleme Problemi modeli önerilmiştir (Jiao vd., 2024). Önerilen modelde, bir KYP modelinde bulunan standart kısıtlara ek olarak, robot yükleme sisteminden dolayı, Palet Süreklilik ve Robot Konum kısıtlamaları eklenmiştir.

1.2.3. Modelleme ve çözüm yaklaşımları

1.2.3.1. Modelleme yaklaşımları

Konteyner Yükleme Problemleri için ilk modelleme yaklaşımı 1987 yılında yapılmıştır (Tsai, 1987). Bu makalede, yazar bir palet üzerine üç boyutta değişik şekil ve boyuttaki kutuların düzenlenmesi için bir model önermiştir. Bu modelde yazar sadece kutuların birbirleri üzerine çakışmaması kısıtlarını göz önüne almıştır.

Daha sonra yapılan bir çalışmada kısıt olmayan üç boyutlu paketleme problemi için bir karmaşık tam sayılı programlama modeli önerilmiştir (Padberg, 2000). 2009 yılında yapılan bir çalışmada, birleşik araç rotalama ve konteyner yükleme problemi için bir karmaşık tam sayılı

programlama modeli geliştirilmiştir (Moura ve Oliveira, 2009). Son olarak da 2012 yılında kararlılık, oryantasyon ve yığma kısıtlarını içeren ikili tam sayılı programlama modeli önerilmiştir (Junqueira vd., 2012).

KYP'de, genellikle iki çeşit modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Birinci yaklaşımda, yerleştirilecek küçük nesnelerin sol ön veya sol arka köşesi sürekli karar değişkenleri olarak seçilmiş, nesnelere, boyutlarına göre kartezyen koordinat sisteminde konteyner içerisine yerleştirilmiştir (Chen vd., 1995). Üst üste çakışmama ve dikey kararlılık gibi kısıtlamalar yardımcı karar değişkenleri ile sağlanmaya çalışılmıştır. Uzak İndeks Formülasyonu (Space Index Formulation) adı verilen yaklaşımda uzayda nesnelerin yerleşebileceği her nokta ikili karar değişkeni olarak seçilmiş, daha sonra modelin içerisinde küçük nesnelerin boyutlarına ve kısıtlara göre uzayda kapsamı gereken noktalar bulunmaya çalışılmıştır (Junqueira vd., 2012). Bunların içerisinde birinci yaklaşım sürekli değişkenler içerdiği için diğerine göre daha etkindir. Ancak ikinci yaklaşımda da sadece noktaların kaplanıp, kaplanmadığı kontrol edildiği için kısıtların yazımı diğerine göre daha kolaydır. Bizim çalışmamızda karar değişkenleri tanımlamasında birinci yaklaşım kullanılmıştır.

1.2.3.2. Tam ve yaklaşım algoritmaları

Çok boyutlu KYP deterministik olmayan polinomsal zamanda çözülemeyen (NP Hard) kombinatorik problemler sınıfındadır. Çözümleri oldukça zor olduğundan az sayıda tam çözüm algoritması mevcuttur.

Belirli tipteki problemler için dal ve sınır algoritması önerilmiştir (Martello vd., 2000). Bu problemde, sadece sabit oryantasyon kısıtları dahil edilmiştir. Yazarlar en fazla 90 parçalık problemleri çözebilmişlerdir.

2004 yılında belirli tipteki bir problemi çözebilmek için Önce-Derinlik Araması (Depth-First Search) ve Dinamik Programlama algoritması önerilmiştir (Hifi, 2004). Bu problemde, oryantasyon ve giyotin kesme kısıtları dahil edilmiştir. Tipe göre kutu sayısında sınır yoktur. Yazar en fazla 50 parçaya ulaşan 64 problemde performans testleri yapmıştır. Çoğu problem için en iyi çözümü bulmasına rağmen hepsi için bulamamıştır.

2007 yılında, iki seviyeli Ağaç Arama Algoritması önerilmiştir (Fekete vd., 2007). Yaklaşımları uygun yükleme paternlerindeki kutuların göreceli pozisyonlarına ağ teorik yaklaşımla çözmüştür. 150 problemin %70'inden fazlasında en iyi çözümü bulmuşlardır.

Çoklu Konteyner Yükleme Problemlerini çözmek için de matematiksel modeller önerilmiştir (Alonso vd., 2019). Bu matematiksel modellerde, geometrik, ağırlık limiti ve dinamik kararlılık kısıtlamaları dahil edilmiştir. Önerilen modeller problemlerin birçoğunda en iyi çözümü bulmuş, geri kalanında ise en iyiye oldukça yakın çözümler bulmuşlardır.

Yaklaşım algoritmaları en iyi çözümü garanti etmese de belirli bir performansı garanti ederler. İlk olarak bu

metotların çoğu sabit nesne oryantasyonlarını göz önüne almış olsa bile, daha sonraki çalışmalar serbest bir şekilde döndürülebilen parçaları da içermiştir. Bugüne kadar yapılan yaklaşım algoritmaları çalışmalarında oryantasyon kısıtları haricinde diğer kısıtlar dahil edilmemiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Giriş bölümünde tanımı yapılan ve tasarlanan KYP; öncelikle tam algoritmalar kullanılarak optimum olarak çözülmek istenmiştir. Bu nedenle, KYP'nin matematiksel modeli kurulmuştur. Problemin gerçek hayat problemine yakınlığını artırmak maksadıyla, literatürde KYP'nde kullanılan çok sayıda yan kısıt tipi modele eklenmiştir. Bunlar; ağırlık limiti, ağırlık dağılımı, paylaşırma, tüm opsiyonları içeren yatay, dikey oryantasyon ve dikey kararlılık kısıtlamalarıdır. Problemin modelinin kurulmasını basitleştirmek için, problem ikiye bölünmüş ve iki ayrı problem olarak modellenmiştir. Daha sonra iki model ardışık olarak çözülmüştür. Ardışık çözüm yönteminde, önce birinci model çözülmüş, birinci problemin çözümü ikinci modele girdi olarak girilmiştir. Daha sonra ikinci model çözülmüş ve bulunan çözümün en iyi çözüme olan yakınlığı gözlenmiştir.

2.1 Problemin Matematiksel Modeli

Tasarlanan problem modelinin kurulmasını basitleştirmek maksadıyla, ana problem birbirini tamamlayan iki ayrı probleme bölünmüştür. Birinci problemde, küçük nesnelere ağırlık ve hacim sınırlamalarına dikkat ederek (yerleştirme kısıtları dahil edilmeden) kaç adet konteyner dağılacığı ve bu konteynerleri taşıyan tırların hangi tedarik kapılarından, hangi talep kapılarına uğrayacağı belirlenmiştir. İkinci problemde ise, dikey ve yatay oryantasyon, dikey kararlılık ve ağırlık dağılım kısıtlamalarını da içerecek şekilde konteynerlere dağılan paketlerin, konteynerlerin içerisine nasıl yerleştirileceği bulunmuştur. Birinci problemin sonuçları ikinci probleme veri olarak girilmiş ve iki problem ardışık olarak çözülmüştür. Bu bölümün diğer kısımlarında, önce birinci problemin, daha sonra ikinci problemin matematiksel modelleri verilmiştir.

2.1.1. Birinci problem

Tanımlanan KYP'de; küçük nesnelere kaç adet konteyner

kullanılarak taşınacağını, konteynerleri taşıyan tırların hangi tedarik ve talep kapılarına uğrayacağını ve bu kapılardan hangi tip ve kaç adet küçük nesne alıp, bırakacağını belirleyen bölümü "Birinci Problem" olarak tanımlanır. Bu probleme ana problemde tanımlanan ağırlık ve hacim limiti kısıtlamaları, küçük nesnelere aynı veya farklı konteynerde olma kısıtlamaları (paylaşırma) dahil edilmiştir. Bu problemin amacı, küçük nesnelere tamamını kapsayacak minimum sayıda konteyner kullanırken, kullanılan araçların da gereksiz kapılara uğramasını azaltmaktır. Sonraki kısımlarda birinci problemde kullanılan indeks kümeleri, parametreler, karar değişkenleri ve matematiksel model verilmiştir.

2.1.1.1. Birinci problemin indeks kümeleri

Birinci problemde kullanılan kümelerin anlamları, indeksleri ve alabileceği değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Birinci problemde kullanılan kümelerin anlamları ve indeksleri

Küme İsmi	Kümenin Anlamı (İndeksi)	Kümenin Alabileceği Değerler
C	Konteynerlerin index kümesi (i)	1..numConts
T	Paket tipi kümesi, (k)	1..numBoxTypes

2.1.1.2. Birinci problemin parametreleri

Birinci problemde kullanılan parametreler ve anlamları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Birinci problemde kullanılan parametreler

Parametre Adı	Parametrenin Anlamı
numConts	Kullanılabilecek maksimum konteyner sayısı
numBoxTypes	Paket tipi sayısı
numOs	Tedarik kapısı sayısı
numDs	Talep kapısı sayısı
numGates	Toplam kapı sayısı
sameCont	[numBoxTypes X numBoxTypes] boyutunda kare matris. Aynı konteynerde olması gereken kutu tiplerini ifade etmek için kullanılır.
diffCont	[numBoxTypes X numBoxTypes] boyutunda kare matris. Farklı konteynerde olması gereken kutu tiplerini ifade etmek için kullanılır.
cL	Konteyner uzunluğu

Tablo 2. Birinci problemde kullanılan parametreler (devam)

Parametre Adı	Parametrenin Anlamı
cW	Konteyner genişliği
cH	Konteyner yüksekliği
cM	Konteynerin taşıyabileceği maksimum ağırlık
tableData	[numBoxTypes X 7] boyutunda matris. Paket tiplerine ait özellikleri göstermek için kullanılır. Her satır bir paket tipine karşılık gelmekte olup, sütunlar sırasıyla paket tipine ait adet, ağırlık, uzunluk, genişlik, yükseklik, tedarik kapısı ve talep kapısı bilgilerini içerir.
demand	[numBoxTypes] boyutunda bir vektör olup, her paket tipinden ne kadar talep olduğunu ifade eder.
massArr	[numBoxTypes] boyutunda bir vektör olup, her paket tipinin ağırlığını ifade eder.

2.1.1.3. Birinci problemin karar değişkenleri

Birinci problemde tanımlanan karar değişkenlerinin gösterimi ve anlamları Denklem (1)-(5)'te verilmiştir.

$$y_i = \begin{cases} 1, & i. \text{ konteynere yükleme yapılırsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \forall i \in C \quad (1)$$

$$legCont_{i,g1,g2} = \begin{cases} 1, & i \text{ konteyneri } g1 \text{ tedarik kapısından} \\ & g2 \text{ talep kapısına gidecekse} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall g1 \in \{0..numGates\} \\ g2 \in \{1..(numGates + 1)\} \end{matrix} \quad (2)$$

$$loadBox_{i,g,k}: i \text{ konteynerine } g \text{ tedarik kapısından,} \\ k \text{ paket tipinde, yüklenen paket sayısı} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall k \in T \\ g \in \{1..numOs\} \end{matrix} \quad (3)$$

$$dropBox_{i,g,k}: i \text{ konteynerinden, } g \text{ talep kapısına} \\ k \text{ tipinde bırakılan paket sayısı} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall k \in T \\ g \in \{1..numDs\} \end{matrix} \quad (4)$$

$$pickupBox_{i,g,k} = \begin{cases} 1, & i \text{ konteynerine } g \text{ talep kapısından} \\ & k \text{ tipinde paket yüklenirse} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall k \in T \\ g \in \{1..numOs\} \end{matrix} \quad (5)$$

2.1.1.4. Birinci problemin matematiksel modeli

Birinci problem için kurulan matematiksel modelin, amaç

fonksiyonu ve kısıtlamaları aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$Min \sum_{i=1}^{numConts} y_i + M \sum_{i=1}^{numConts} \sum_{g1=0}^{(numOs+numDs)} \sum_{g2=1}^{(numOs+numDs+1)} legCont_{i,g1,g2} \quad (6)$$

s.t.

$$y_i = \sum_{g2=1}^{numOs} legCont_{i,0,g2} \quad \forall i \in C \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{g_0=0 \\ g_0 \neq g_1}}^{numOs} legCont_{i,g_0,g_1} = \sum_{\substack{g_2=1 \\ g_2 \neq g_1}}^{(numOs+numDs)} legCont_{i,g_1,g_2} \quad \forall \begin{matrix} i \in C \\ g_1 = 1..numOs \end{matrix} \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{g_0=1 \\ g_0 \neq g_1}}^{(numOs+numDs)} legCont_{i,g_0,g_1} = \sum_{\substack{g_2=(numOs+1) \\ g_2 \neq g_1}}^{(numOs+numDs+1)} legCont_{i,g_1,g_2} \quad \forall \begin{matrix} i \in C \\ g_1 = (numOs + 1).. \\ (numOs + numDs) \end{matrix} \quad (9)$$

$$\sum_{g_1=(numOs+1)}^{(numOs+numDs)} legCont_{i,g_1,(numOs+numDs+1)} = y_i \quad \forall i \in C \quad (10)$$

$$pickupBox_{i,g_2,k} \leq \sum_{\substack{g_1=0 \\ g_1 \neq g_2}}^{numOs} legCont_{i,g_1,g_2} \quad \forall \begin{matrix} i \in C \\ k \in T \\ g_2 = 1..numOs \\ origs[k] = g_2 \end{matrix} \quad (11)$$

$$legCont_{i,g_1,g_2} \leq \sum_{\substack{k=1 \\ origs[k]=g_2}}^{numBoxTypes} pickupBox_{i,g_2,k} \quad \forall \begin{matrix} i \in C \\ g_1 = 0..numOs \in T \\ g_2 = 1..numOs \\ g_1 \neq g_2 \end{matrix} \quad (12)$$

$$dropBox_{i,g_2,k} \leq \sum_{\substack{g_1=1 \\ origs[k]=g_1}}^{numOs} loadBox_{i,g_1,k} \quad \forall \begin{matrix} i \in C \\ k \in T \\ g_2 = (numOs + 1).. \\ (numOs + numDs) \\ g_2 = dests[k] \end{matrix} \quad (13)$$

$$dropBox_{i,g_2,k} \leq demand_k \sum_{\substack{g_1=1 \\ g_1 \neq g_2}}^{(numOs+numDs)} legCont_{i,g_1,g_2} \quad \forall \begin{matrix} i \in C \\ k \in T \\ g_2 = (numOs + 1).. \\ (numOs + numDs) \\ g_2 = dests[k] \end{matrix} \quad (14)$$

$$\sum_{\substack{g_2=1 \\ origs[k]=g_2}}^{numOs} loadBox_{i,g_2,k} = \sum_{g_2=(numOs+1)}^{(numOs+numDs)} dropBox_{i,g_2,k} \quad \forall \begin{matrix} i \in C \\ k \in T \end{matrix} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{numConts} dropBox_{i,g_2,k} = demand_k \quad \forall \begin{matrix} k \in T \\ g_2 = (numOs + 1).. \\ (numOs + numDs) \\ g_2 = dests[k] \end{matrix} \quad (16)$$

$$y_{i_1} \geq y_{i_2} \quad \forall \begin{matrix} i_1 \in C \\ i_2 \in C \\ i_1 < i_2 \end{matrix} \quad (17)$$

$$loadBox_{i,g_2,k} \geq pickupBox_{i,g_2,k} \quad \forall \begin{matrix} i \in C \\ k \in T \\ g_2 = 1..numOs \\ origs[k] = g_2 \end{matrix} \quad (18)$$

$$loadBox_{i,g2,k} \leq demand_k pickupBox_{i,g2,k} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ k \in T \\ \forall g2 = 1..numOs \\ origs[k] = g2 \end{array} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^{numConts} \sum_{\substack{g2=1 \\ origs[k]=g2}}^{numOs} loadBox_{i,g2,k} = demand_k \quad \forall k \in T \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^{numBoxTypes} \sum_{\substack{g2=1 \\ origs[k]=g2}}^{numOs} massArr_k loadBox_{i,g2,k} \leq (cM)y_i \quad \forall i \in C \quad (21)$$

$$\sum_{k=1}^{numBoxTypes} \sum_{\substack{g2=1 \\ origs[k]=g2}}^{numOs} (boxL_k)(boxW_k)(boxH_k)loadBox_{i,g2,k} \leq (cL)(cW)(cH)y_i \quad \forall i \in C \quad (22)$$

$$\sum_{\substack{g2=1 \\ origs[k1]=g2}}^{numOs} pickupBox_{i,g2,k1} - \sum_{\substack{g2=1 \\ origs[k2]=g2}}^{numOs} pickupBox_{i,g2,k2} \leq 1 - sameCont_{k1,k2} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall k1 \in T \\ k2 \in T \end{array} \quad (23)$$

$$\sum_{\substack{g2=1 \\ origs[k1]=g2}}^{numOs} pickupBox_{i,g2,k1} + \sum_{\substack{g2=1 \\ origs[k2]=g2}}^{numOs} pickupBox_{i,g2,k2} \leq 2 - diffCont_{k1,k2} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall k1 \in T \\ k2 \in T \end{array} \quad (24)$$

$$y_i = 0/1 \quad \forall i \in C \quad (25)$$

$$legCont_{i,g1,g2} = 0/1 \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall g1 \in \{1..numOs\} \\ g2 \in \{1..numDs\} \end{array} \quad (26)$$

$$loadBox_{i,g,k} \geq 0, \text{ tamsayı} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall k \in T \\ g \in \{1..numOs\} \end{array} \quad (27)$$

$$dropBox_{i,g,k} \geq 0, \text{ tamsayı} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall k \in T \\ g \in \{1..numDs\} \end{array} \quad (28)$$

$$pickupBox_{i,g,k} = 0/1 \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall k \in T \\ g \in \{1..numOs\} \end{array} \quad (29)$$

Problemin amaç fonksiyonu (6) numaralı denklem ile ifade edilmiş olup, iki ayrı terimden meydana gelmektedir. İlk terim, kullanılan konteyner sayısını minimum yapmağı sağlarken, ikinci terim konteynerlerin kapılara yapacağı gereksiz uğramaları azaltmaya yardımcı olur. Öncelikli amacımız konteyner sayısını minimum yapmak olduğu için, amaç fonksiyonunda ikinci terimdeki M katsayısını birden küçük seçmemiz gerekecektir. Böylece, öncelikli amacımızı

baskılamayacak şekilde bir yandan da ikincil amaç olan tırların gereksiz kapılara uğramamasını da dengelemiş olacağız. Bu nedenle büyük M parametresini aşağıdaki şekilde seçmek yeterli olacaktır.

$$M = \left\{ \frac{1}{[(numOs+numDs+2)(numOs+numDs+1)]-1} \right\} \quad (30)$$

Modelin sınırlamalarına baktığımızda, (7) numaralı denklem, garajdan (0 numaralı kapı) çıkarak yükleme yapacak her aracın ilk olarak tedarik kapılarından birisine uğraması gerektiğini ifade eder. (8) Numaralı kısıt, tedarik kapısından ayrılan bir aracın ya başka bir tedarik kapısına ya da talep kapısına gideceğini ifade eder. (9) Numaralı kısıt, talep kapısından ayrılan bir aracın ya başka bir talep kapısına ya da garaja (numGates+1 numaralı kapı) gideceğini ifade eder. (10) Numaralı kısıt, kullanılan her aracın garaja döneceğini ifade eder. (11) Numaralı denklem, sadece kullanımda olan araçların tedarik kapısına gitmesini sağlar. (12) Numaralı kısıt, eğer herhangi bir araç tedarik kapısına uğruyorsa, oradan mutlaka paket yüklemesi gerektiğini, (13) numaralı denklem de eğer herhangi bir araç talep kapısına uğruyorsa orada paket indirmesi gerektiğini ifade eder. (14) numaralı kısıt ile talep noktasına uğrayan bir aracın, o kapıda en fazla talep kadar paket bırakabileceği ifade edilmiştir. (15) Numaralı kısıt, bir araca yüklenen bütün paketlerin indirilmesi gerektiğini ifade eder. (16) Numaralı denklem, herhangi bir paket tipinden eldeki mevcudun tamamının talep kapılarına indirileceğini ifade eder. (17) Numaralı denklem, araçların sıra ile kullanılmasını ifade eder. (18) Numaralı kısıt, herhangi bir araç seçilirse, o konteynere yükleme yapılabileceğini ifade eder. (19) Numaralı denklemde, herhangi bir konteyner yükleme için seçilirse, seçilen konteynere herhangi bir paket tipinden en fazla elde mevcut adet paket yüklenebileceği ifade edilmiştir. (20) Numaralı kısıt, herhangi bir paket tipinden yüklenmemiş bir parça kalmadığını garanti eder. (21) Numaralı denklem, konteynere yüklenen paketlerin ağırlıkları toplamının, konteynerin ağırlık sınırını geçmeyeceğini ifade eder. (22) Numaralı denklem, konteynere yüklenen paketlerin ağırlıkları hacimleri toplamının, konteynerin toplam hacmini geçmeyeceğini ifade eder. (23) Numaralı kısıt, aynı konteynere yüklenmesi gereken paketleri, (24) numaralı kısıt da farklı konteynere yüklenmesi gereken paketlerin yerleştirilmesini sağlar. (25)-(29) Numaralı denklemler modelin karar değişkenlerini ifade ederler.

2.1.2. İkinci problem

Bir önceki kısımda tanımlanan birinci problem çözüldükten sonra, küçük nesnelerin tamamını taşıyacak şekilde kaç adet konteynere ihtiyaç duyulduğu ve hangi konteynere hangi nesnelerin yüklenmesi gerektiği bilgisi elde edilmiştir. Bir sonraki aşamada yapılması gereken iş, birinci problemi çözerken dahil edemediğimiz kısıtları da içerecek şekilde küçük nesnelerin konteynerler içerisine nasıl yerleştirildiklerini bulmaktır. Bizim araştırmamızda küçük nesnelerin konteynerlerin içerisine nasıl yerleştirildiğini bulan problem "İkinci Problem" olarak adlandırılmıştır. İkinci probleme birinci problemin çözümü, yani hangi nesnelerin hangi konteynerde olduğu ve kaç adet konteyner kullandığı bilgisi girdi olarak verilir. Daha sonra problemin modellenme işlemi, kolaydan zora doğru olacak şekilde yapılmıştır. Öncelikle, sadece uygunluk ve oryantasyon kısıtları modele eklenmiştir. Problem bu haliyle çözüldüğü zaman, modellenen probleme göre uygun, ancak gerçek probleme göre uygun olmayan çözümler elde edildi. Örneğin; ilgili kısıtlar modelde olmadığı için, konteyner içerisine yerleştirilen bazı nesneler havada asılı kaldı. Daha sonra sırasıyla zor olan kısıtlar (dikey kararlılık ve ağırlık dağılım kısıtları) eklendi. Bu haliyle çözümler gerçek probleme de uygun olan çözümler elde edildi. İkinci problem aslında bir uygunluk problemi (feasibility problem) olup, kukla bir amaç fonksiyonuna sahip sadece kısıtlamaları sağlayan bir çözüm bulmaktır. Sonraki kısımlarda ikinci problemde kullanılan indeks kümeleri, parametreler, karar değişkenleri ve matematiksel model verilmiştir.

2.1.2.1 İkinci problemin indeks kümeleri

İkinci problemde kullanılan kümelerin anlamları, indeksleri ve alabileceği değerler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. İkinci problemin indeks kümeleri

Küme İsmi	Kümenin Anlamı (İndeksi)	Kümenin Alabileceği Değerler
C	Konteynerlerin index kümesi (i)	1..numConts
L	Kutuların sırasını ifade eden küme (j)	1..totalBox
T	Paket tipi kümesi, (k)	1..numBoxTypes
O	Oryantasyon kümesi, (l)	1..numOrios

2.1.2.2. İkinci problemin parametreleri

İkinci problemde kullanılan parametreler ve anlamları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. İkinci problemde kullanılan parametreler

Parametre Adı	Parametrenin Anlamı
numConts	Kullanılabilecek maksimum konteyner sayısı
numBoxTypes	Paket tipi sayısı
numOrios	Paketlerin toplam oryantasyon sayısı
totalBox	Toplam kutu sayısı
cl	Konteyner uzunluğu

Tablo 4. İkinci problemde kullanılan parametreler (devam)

Parametre Adı	Parametrenin Anlamı
cW	Konteyner genişliği
cH	Konteyner yüksekliği
cM	Konteynerin taşıyabileceği maksimum ağırlık
tableData	[numBoxTypes X 7] boyutunda matris. Her satır bir paket tipine karşılık gelmekte olup, sütunlar sırasıyla paket tipine ait adet, ağırlık, uzunluk, genişlik, yükseklik, tedarik kapasitesi ve talep kapasitesi bilgilerini içerir.
massArr	[numBoxTypes] boyutunda bir vektör olup, her paket tipinin ağırlığını ifade eder.
mass	[totalBox] boyutunda bir vektör olup, her paketin ağırlığını ifade eder.
boxL	[numBoxTypes] [numOrios] boyutunda bir matris olup, her paket tipinin oriyantasyona göre uzunluğunu ifade eder.
boxW	[numBoxTypes] [numOrios] boyutunda bir matris olup, her paket tipinin oriyantasyona göre genişliğini ifade eder.
boxH	[numBoxTypes] [numOrios] boyutunda bir matris olup, her paket tipinin oriyantasyona göre yüksekliğini ifade eder.
boxType	[totalBox] boyutunda bir vektör olup, her paketin tipini ifade eder.
contID	[totalBox] boyutunda bir vektör olup, her paketin içerisinde bulunduğu konteyner numarasını ifade eder.
mass_{i,j}	i konteynerine j. sırada yüklenen paketin ağırlığını ifade eder.

2.1.2.3. İkinci problemin karar değişkenleri

İkinci problemde tanımlanan karar değişkenlerinin gösterimi ve anlamları denklem (31)-(57)'de verilmiştir.

$$boxPacked_{ij} = \begin{cases} 1, j \text{ paketi } i \text{ konteynerine yüklenirse} \\ 0, \text{ diğer} \end{cases} \quad \forall i \in C, j \in L \quad (31)$$

$$\alpha_{i,j,l} = \begin{cases} 1, i \text{ konteynerine } j. \text{ sırada konulan } l \text{ kutu} \\ \text{ } l \text{ oryantasyonunda ise} \\ 0, \text{ diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j \in L \\ l \in O \end{matrix} \quad (32)$$

$$\bar{x}_{i,j1,j2} = \begin{cases} 1, i \text{ konteynerine } j1. \text{ ve } j2. \text{ sırada konulan } x \text{ kutu} \\ \text{ } x \text{ ekseninde çakışmıyorsa} \\ 0, \text{ diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (33)$$

$$\bar{y}_{i,j1,j2} = \begin{cases} 1, i \text{ konteynerine } j1. \text{ ve } j2. \text{ sırada konulan } y \text{ kutu} \\ \text{ } y \text{ ekseninde çakışmıyorsa} \\ 0, \text{ diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (34)$$

$$\bar{z}_{i,j1,j2} = \begin{cases} 1, i \text{ konteynerine } j1. \text{ ve } j2. \text{ sırada konulan } z \text{ kutu} \\ \text{ } z \text{ ekseninde çakışmıyorsa} \\ 0, \text{ diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (35)$$

$$x_{i,j}: i \text{ konteynerine } j. \text{ sırada konulan kutunun sol arka köşesinin } x \text{ koordinatı} \quad \forall i \in C, j \in L \quad (36)$$

$$y_{i,j}: i \text{ konteynerine } j. \text{ sırada konulan kutunun sol arka köşesinin } y \text{ koordinatı} \quad \forall i \in C, j \in L \quad (37)$$

$$z_{i,j}: i \text{ konteynerine } j. \text{ sırada konulan kutunun sol arka köşesinin } z \text{ koordinatı} \quad \forall i \in C, j \in L \quad (38)$$

$$bL_{i,j}: i \text{ konteynerine } j. \text{ sırada konulan kutunun uzunluğu} \quad \forall i \in C, j \in L \quad (39)$$

$$bW_{i,j}: i \text{ konteynerine } j. \text{ sırada konulan kutunun genişliği} \quad \forall i \in C, j \in L \quad (40)$$

$$bH_{i,j}: i \text{ konteynerine } j. \text{ sırada konulan kutunun yüksekliği} \quad \forall i \in C, j \in L \quad (41)$$

$$g_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ konteynerine } j. \text{ sırada yüklenen} \\ & \text{paket zemindeyse } (z_{ij} = 0) \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \forall i \in C, j \in L \quad (42)$$

$$h_{i,j1,j2} = \begin{cases} 1, & i \text{ konteynerine } j2. \text{ sırada yüklenen} \\ & \text{paket } j1. \text{ sırada} \\ & \text{yüklenen paketi destekleyecek} \\ & \text{uygun yüksekliğe} \\ & \text{sahipse } (z_{ij1} = z_{ij2} + bH_{ij2}) \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (43)$$

$$o_{i,j1,j2} = \begin{cases} 1, & i \text{ konteynerine } j1 \text{ ve } j2. \text{ sırada yüklenen} \\ & \text{paketlerin } XY \text{ düzlemindeki} \\ & \text{kesişimleri boş küme değilse} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (44)$$

$$s_{i,j1,j2} = \begin{cases} 1, & i \text{ konteynerine } j2. \text{ sırada yüklenen} \\ & \text{paket } j1. \text{ sırada yüklenen paketi} \\ & \text{destekliyorsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (45)$$

$$m_{i,j1,j2} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } z'_{i,j2} \geq z_{i,j1} \\ 0, & \text{Eğer } z_{i,j1} \geq z'_{i,j2} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (46)$$

$$\eta_{i,j1,j2}^1 = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } x_{i,j2} \leq x_{i,j1} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (47)$$

$$\eta_{i,j1,j2}^2 = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } y_{i,j2} \leq y_{i,j1} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (48)$$

$$\eta_{i,j1,j2}^3 = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } x'_{i,j1} \leq x'_{i,j2} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (49)$$

$$\eta_{i,j1,j2}^4 = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } y'_{i,j1} \leq y'_{i,j2} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{matrix} i \in C \\ \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ j2 \in L \end{matrix} \quad (50)$$

$$\beta_{i,j_1,j_2}^k = \begin{cases} 1, & \begin{array}{l} i. \text{ konteynere } j_2. \text{ sırada yerleştirilen} \\ \text{paketin } k. \text{ köşesi } j_1. \text{ sırada yerleştirilen} \\ \text{paket tarafından destekleniyorsa} \end{array} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_2 \in L, j_1 \neq j_2 \\ k \in \{1,2,3,4\} \end{array} \quad (51)$$

$$v_{i,j_1,j_2} \geq 0 \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (52)$$

$$xCG_i = i. \text{ konteynerin ağırlık merkezinin } X \text{ koordinatı} \quad \forall i \in C \quad (53)$$

$$yCG_i = i. \text{ konteynerin ağırlık merkezinin } Y \text{ koordinatı} \quad \forall i \in C \quad (54)$$

$$zCG_i = i. \text{ konteynerin ağırlık merkezinin } Z \text{ koordinatı} \quad \forall i \in C \quad (55)$$

$$\text{diff}X_i = i. \text{ konteynerinin ağırlık merkezinden } X \text{ eksenini} \\ \text{yönündeki sapma} \quad \forall i \in C \quad (56)$$

$$\text{diff}Y_i = i. \text{ konteynerinin ağırlık merkezinden } Y \text{ eksenini} \\ \text{yönündeki sapma} \quad \forall i \in C \quad (57)$$

2.1.2.4. İkinci problemin matematiksel modeli

İkinci problem için kurulan matematiksel modelin, amaç fonksiyonu ve kısıtlamaları aşağıdaki denklem (58)-(114)

arasında verilmiştir.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{\text{numConts}} \sum_{j=1}^{\text{totalBox}} \text{boxPacked}_{i,j} \quad (58)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^{\text{numConts}} \text{boxPacked}_{i,j} = 1 \quad \forall j \in L \quad (59)$$

$$\sum_{l=1}^{\text{numOrios}} \alpha_{i,j,l} = \text{boxPacked}_{i,j} \quad \forall i \in C, j \in L, \quad (60)$$

$$bL_{i,j} = \sum_{l=1}^{\text{numOrios}} \text{box}L_{\text{boxType}_{j,l}} \alpha_{i,j,l} \quad \forall i \in C, j \in L, \quad (61)$$

$$bW_{i,j} = \sum_{l=1}^{\text{numOrios}} \text{box}W_{\text{boxType}_{j,l}} \alpha_{i,j,l} \quad \forall i \in C, j \in L, \quad (62)$$

$$bH_{i,j} = \sum_{l=1}^{\text{numOrios}} \text{box}H_{\text{boxType}_{j,l}} \alpha_{i,j,l} \quad \forall i \in C, j \in L, \quad (63)$$

Fiziksel ve Geometrik Kısıtlar:

$$x_{i,j} + bL_{i,j} \leq (cL) \text{boxPacked}_{i,j} \quad \forall i \in C, j \in L, \quad (64)$$

$$y_{i,j} + bW_{i,j} \leq (cW)boxPacked_{i,j} \quad \forall i \in C, j \in L, \quad (65)$$

$$z_{i,j} + bH_{i,j} \leq (cH)boxPacked_{i,j} \quad \forall i \in C, j \in L, \quad (66)$$

Üst Üste Çakışmama Kısıtları:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{i,j_1,j_2} + \bar{x}_{i,j_2,j_1} &\leq boxPacked_{i,j_1} && i \in C; \\ &&& \forall j_1, j_2 \in L; \\ &&& j_1 < j_2 \end{aligned} \quad (67)$$

$$\begin{aligned} \bar{y}_{i,j_1,j_2} + \bar{y}_{i,j_2,j_1} &\leq boxPacked_{i,j_1} && i \in C; \\ &&& \forall j_1, j_2 \in L; \\ &&& j_1 < j_2 \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} \bar{z}_{i,j_1,j_2} + \bar{z}_{i,j_2,j_1} &\leq boxPacked_{i,j_1} && i \in C; \\ &&& \forall j_1, j_2 \in L; \\ &&& j_1 < j_2 \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_{i,j_1,j_2} + \bar{x}_{i,j_2,j_1} + \bar{y}_{i,j_1,j_2} + \bar{y}_{i,j_2,j_1} + \bar{z}_{i,j_1,j_2} + \bar{z}_{i,j_2,j_1} \\ \geq boxPacked_{i,j_1} + boxPacked_{i,j_2} - 1 \end{aligned} \quad \begin{aligned} &&& i \in C; \\ &&& \forall j_1, j_2 \in L; \\ &&& j_1 < j_2 \end{aligned} \quad (70)$$

$$\begin{aligned} x_{i,j_1} + bL_{i,j_1} &\leq x_{i,j_2} + cL * (1 - \bar{x}_{i,j_1,j_2}) && i \in C; \\ &&& \forall j_1, j_2 \in L; \\ &&& j_1 \neq j_2 \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} y_{i,j_1} + bW_{i,j_1} &\leq y_{i,j_2} + cW * (1 - \bar{y}_{i,j_1,j_2}) && i \in C; \\ &&& \forall j_1, j_2 \in L; \\ &&& j_1 \neq j_2 \end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned} z_{i,j_1} + bH_{i,j_1} &\leq z_{i,j_2} + cH * (1 - \bar{z}_{i,j_1,j_2}) && i \in C; \\ &&& \forall j_1, j_2 \in L; \\ &&& j_1 \neq j_2 \end{aligned} \quad (73)$$

Dikey Kararlılık Kısıtları:

$$\sum_{l=1}^4 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{totalBox} \beta_{i,j,k}^l \geq 3 * (1 - g_{ij}) \quad \forall i \in C, j \in L \quad (74)$$

$$z_{i,j} \leq cH * (1 - g_{ij}) \quad \forall i \in C, j \in L \quad (75)$$

$$z_{i,j_2} + bh_{i,j_2} - z_{i,j_1} \leq v_{i,j_1,j_2} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (76)$$

$$z_{i,j_1} - bh_{i,j_2} - z_{i,j_2} \leq v_{i,j_1,j_2} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (77)$$

$$v_{i,j_1,j_2} \leq z_{i,j_2} + bh_{i,j_2} - z_{i,j_1} + 2 * cH(1 - m_{i,j_1,j_2}) \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (78)$$

$$v_{i,j_1,j_2} \leq z_{i,j_1} - bh_{i,j_2} - z_{i,j_2} + 2 * cH * m_{i,j_1,j_2} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (79)$$

$$h_{i,j_1,j_2} \leq v_{i,j_1,j_2} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (80)$$

$$v_{i,j_1,j_2} \leq cH * h_{i,j_1,j_2} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (81)$$

$$o_{i,j_1,j_2} \leq \bar{x}_{i,j_1,j_2} + \bar{x}_{i,j_2,j_1} + \bar{y}_{i,j_1,j_2} + \bar{y}_{i,j_2,j_1} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (82)$$

$$\bar{x}_{i,j_1,j_2} + \bar{x}_{i,j_2,j_1} + \bar{y}_{i,j_1,j_2} + \bar{y}_{i,j_2,j_1} \leq 2 * o_{i,j_1,j_2} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (83)$$

$$(1 - s_{i,j_1,j_2}) \leq h_{i,j_1,j_2} + o_{i,j_1,j_2} \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (84)$$

$$h_{i,j_1,j_2} + o_{i,j_1,j_2} \leq 2 * (1 - s_{i,j_1,j_2}) \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (85)$$

$$boxPacked_{i,j_1} - boxPacked_{i,j_2} \leq (1 - s_{i,j_1,j_2}) \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (86)$$

$$boxPacked_{i,j_2} - boxPacked_{i,j_1} \leq (1 - s_{i,j_1,j_2}) \quad \begin{array}{l} i \in C \\ \forall j_1 \in L, j_1 \neq j_2 \\ j_2 \in L \end{array} \quad (87)$$

$$\beta_{i,j1,j2}^k \leq s_{i,j1,j2}$$

$$\begin{aligned} & i \in C \\ & \forall j1 \in L, j2 \in L, \\ & \quad j1 \neq j2 \\ & \quad k \in \{1,2,3,4\} \end{aligned} \quad (88)$$

$$\eta_{i,j1,j2}^1 + \eta_{i,j1,j2}^2 \leq 2 * (1 - \beta_{i,j1,j2}^1)$$

$$\begin{aligned} & i \in C \\ & \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ & \quad j2 \in L \end{aligned} \quad (89)$$

$$\eta_{i,j1,j2}^2 + \eta_{i,j1,j2}^3 \leq 2 * (1 - \beta_{i,j1,j2}^2)$$

$$\begin{aligned} & i \in C \\ & \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ & \quad j2 \in L \end{aligned} \quad (90)$$

$$\eta_{i,j1,j2}^3 + \eta_{i,j1,j2}^4 \leq 2 * (1 - \beta_{i,j1,j2}^3)$$

$$\begin{aligned} & i \in C \\ & \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ & \quad j2 \in L \end{aligned} \quad (91)$$

$$\eta_{i,j1,j2}^4 + \eta_{i,j1,j2}^1 \leq 2 * (1 - \beta_{i,j1,j2}^4)$$

$$\begin{aligned} & i \in C \\ & \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ & \quad j2 \in L \end{aligned} \quad (92)$$

$$x_{i,j2} \leq x_{i,j1} + cL * \eta_{i,j1,j2}^1$$

$$\begin{aligned} & i \in C \\ & \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ & \quad j2 \in L \end{aligned} \quad (93)$$

$$y_{i,j2} \leq y_{i,j1} + cW * \eta_{i,j1,j2}^2$$

$$\begin{aligned} & i \in C \\ & \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ & \quad j2 \in L \end{aligned} \quad (94)$$

$$x_{i,j1} + bL_{i,j1} \leq x_{i,j2} + bL_{i,j2} + cL * \eta_{i,j1,j2}^3$$

$$\begin{aligned} & i \in C \\ & \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ & \quad j2 \in L \end{aligned} \quad (95)$$

$$y_{i,j1} + bW_{i,j1} \leq y_{i,j2} + bW_{i,j2} + cW * \eta_{i,j1,j2}^4$$

$$\begin{aligned} & i \in C \\ & \forall j1 \in L, j1 \neq j2 \\ & \quad j2 \in L \end{aligned} \quad (96)$$

Ağırlık Dağılım Kısıtları:

$$xCG_i = \frac{1}{\sum_{\substack{j=1 \\ contId(j)=i}}^{totalBox} mass_{i,j}} \left(\sum_{\substack{j=1 \\ contId(j)=i}}^{totalBox} mass_{i,j} * x_{i,j} + 0.5 * mass_{i,j} * bL_{i,j} \right) \quad \forall i \in C \quad (97)$$

$$yCG_i = \frac{1}{\sum_{\substack{j=1 \\ contId(j)=i}}^{totalBox} mass_{i,j}} \left(\sum_{\substack{j=1 \\ contId(j)=i}}^{totalBox} mass_{i,j} * y_{i,j} + 0.5 * mass_{i,j} * bW_{i,j} \right) \quad \forall i \in C \quad (98)$$

$$zCG_i = \frac{1}{\sum_{\substack{j=1 \\ contId(j)=i}}^{totalBox} mass_{i,j}} \left(\sum_{\substack{j=1 \\ contId(j)=i}}^{totalBox} mass_{i,j} * z_{i,j} + 0.5 * mass_{i,j} * bH_{i,j} \right) \quad \forall i \in C \quad (99)$$

$$xCG_i - 0.5 * cL \leq diffX_i \quad \forall i \in C \quad (100)$$

$$0.5 * cL - xCG_i \leq diffX_i \quad \forall i \in C \quad (101)$$

$$yCG_i - 0.5 * cW \leq diffY_i \quad \forall i \in C \quad (102)$$

$$0.5 * cW - yCG_i \leq diffY_i \quad \forall i \in C \quad (103)$$

$$boxPacked_{i,j} = 0/1 \quad \forall i \in C, j \in L \quad (104)$$

$$\alpha_{i,j,l} = 0/1 \quad \forall i \in C, j \in L, l \in O \quad (105)$$

$$\bar{x}_{i,j_1,j_2} = 0/1 \quad \forall i \in C \quad (106)$$

$$j_1, j_2 \in L$$

$$j_1 \neq j_2$$

$$\bar{y}_{i,j_1,j_2} = 0/1 \quad \forall i \in C \quad (107)$$

$$j_1, j_2 \in L, j_1 \neq j_2$$

$$\bar{z}_{i,j_1,j_2} = 0/1 \quad \forall i \in C \quad (108)$$

$$j_1, j_2 \in L$$

$$j_1 \neq j_2$$

$$x_{i,j} \geq 0 \quad \forall i \in C, j \in L \quad (109)$$

$$y_{i,j} \geq 0 \quad \forall i \in C, j \in L \quad (110)$$

$$z_{i,j} \geq 0 \quad \forall i \in C, j \in L \quad (111)$$

$$bL_{i,j} \geq 0 \quad \forall i \in C, j \in L \quad (112)$$

$$bW_{i,j} \geq 0 \quad \forall i \in C, j \in L \quad (113)$$

$$bH_{i,j} \geq 0 \quad \forall i \in C, j \in L \quad (114)$$

(58) Numaralı denklem, modelin amaç fonksiyonu olup, konteynerlerin içerisine yerleştirilecek kutu sayısının toplamını minimum yapar. Ancak amaç fonksiyonu değeri, birinci problem sonucunda hesaplandığı için, model sadece kısıtları sağlayan bir çözüm bulmayı hedefler.

(59) Numaralı kısıt her paketin mutlaka bir konteynere yerleştirilmesi gerektiğini ifade eder. (60) Numaralı denklem, herhangi bir kutunun tek bir oryantasyonda konteynere yerleştirilmesini sağlar. (61)-(63) Numaralı denklemler, kutunun konteynere yerleştirildiği oryantasyona göre uzunluk, genişlik ve yüksekliklerinin hesaplanmasını sağlar. (64)-(66) Numaralı kısıtlar kutuların geometrik olarak konteyner sınırları içerisinde kalmasını sağlar. (67)-(69) ve (70)-(73) numaralı kısıtlamalar aynı konteynere konan kutuların koordinatlarının üç eksen

herhangi birinde birbirleri üzerine çakışmalarını sağlar. (74) No'lu kısıt, herhangi bir paketin dikey olarak kararlı olabilmesi için taban alanının en az üç köşesinin hemen altındaki kutunun üst yüzeyi tarafından desteklenmesi gerektiğini ifade eder. Paketlerin tabana dayalı olup, olmadığını ifade eden g_i değişkeni bir değerini aldığı anda, i paketi konteynerin tabanı tarafından destekleneceğinden (74) numaralı denklem etkisiz hale gelir. Ancak, g_i değişkeni sıfır değerini aldığı anda i kutusu konteyner tabanı değil de başka bir kutu tarafından destekleneceğinden (74) numaralı kısıt etkin hale gelecek ve sağ tarafı üç değerini alacaktır. Böylece i kutusunun tabanının en az üç köşesinin alttaki kutunun üst yüzeyinin içerisinde bulunması sağlanacaktır. (75) No'lu kısıt, paketin tabana dayalı olduğunu ifade eder. (76)-(81) No'lu denklemler, aynı konteyner içerisine yerleştirilen iki kutunun dikey

eksendeki konumlarının belirlenmesinde kullanılır. (82)-(85) No'lu kısıtlar, birbirini destekleyecek iki kutunun XY düzleminde çakışıp çakışmadığını ve birbirlerini destekleyebilmek için yüksekliklerinin uygun olup olmadığını kontrol eder. (86) ve (87) No'lu denklemler, iki kutunun birbirini destekleyebilmesi için aynı konteynere yerleştirilmesi gerektiğini ifade eder. (88) No'lu kısıt, desteklenen kutunun tabanının herhangi bir köşesi, ancak o kutu diğer kutu tarafından destekleniyorsa bir değerini alabilir. Herhangi bir kutunun tabanının üç köşesi desteklendiğinde, yani en az üç tane beta değişkeni bir değerini aldığı anda, (89)-(92) no'lu denklemlerdeki yardımcı değişkenler sıfır değerini alacak ve böylece (93)-(96) no'lu kısıtlar nedeniyle desteklenen kutunun X ve Y koordinatları destekleyen kutunun X ve Y koordinatlarının sınırları içerisinde kalacaktır.

(97)-(99) No'lu kısıtlar, konteynere yüklenen paketlere göre konteynerin ağırlık merkezinin X, Y ve Z koordinatlarını

Toplam Hacime Göre Konteyner Sayısındaki Alt Sınır

$$CLB_{Vol} = \left\lceil \frac{\sum_{k=1}^T numBox_k (bL_k * bW_k * bH_k)}{cL * cW * cH} \right\rceil \quad (115)$$

Toplam Ağırlığa Göre Konteyner Sayısındaki Alt Sınır

$$CLB_{Wgt} = \left\lceil \frac{\sum_{k=1}^T numBox_k * bM_k}{cM} \right\rceil \quad (116)$$

Konteyner Sayısındaki Alt Sınır

$$CLB = \max (CLB_{Vol}, CLB_{Wgt}) \quad (117)$$

Ayrıca, iki problem arasındaki veri geçişini kolaylaştırmaya yönelik formatlar geliştirilmiş ve veri geçişi otomatize edilmiştir. Bunun yanında ikinci problem çözümünde elde edilen konteyner yerleşimlerini görebilmek için R dilinde küçük bir uygulama yazılmış ve geliştirilmiştir.

Problemleri çözmek için IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.7.1.0 konteyner yerleşimlerinin görselleştirilmesi için R Studio kullanılmıştır.

Bu bölümün sonraki kısımlarında, çözüm için oluşturulan veri seti, birinci ve ikinci problemlerin çözümleri sunulmuştur.

hesaplar. (100)-(103) No'lu kısıtlar, konteynerin ağırlık merkezinden X ve Y eksenini yönündeki sapmaların üst sınırını belirler.

(104)-(114) numaralı denklemler de modelin karar değişkenlerini ifade etmektedir.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Kurulan modellerin doğruluk ve geçerliğini kontrol edebilmek için, en az bir uygun çözümü olduğu bilinen sentetik orta ölçekli bir test problemi oluşturulmuştur. Test problemi daha sonra ardışık olarak çözülmeye çalışılmıştır. Bulunan çözüm, yüklenecek bütün paketlerin toplam hacim ve ağırlıkları göz önüne alınarak (115)-(117) no'lu denklemlere göre hesaplanan konteyner sayısındaki alt sınır (CLB) ile karşılaştırılmıştır.

3.1. Problem Çözümleri için Oluşturulan Test Veri Seti

Test için oluşturulan veri seti elemanları birimden bağımsız olarak belirlenmiştir. Taşıma için kullanılacak konteyner boyutları sabit olup; uzunluk, genişlik ve yükseklik için boyutlar sırasıyla 48, 40 ve 30 olarak belirlenmiştir. Bir konteynerin ağırlık olarak taşıyabileceği maksimum yük kapasitesi 80 olarak belirlenmiştir.

Konteynerlere yüklenecek toplam 43 adet, 6 değişik boyutta paket tipi belirlenmiştir. Paketler 4 tedarik kapasitesinden toplanıp, 3 talep kapasitesine dağıtılacaktır. 1 ve 4 numaralı paketler farklı konteynere yüklenecek; 1, 2 ve 4, 6 numaralı paketler aynı konteynerde olacaktır. Paketlerin tipleri, sayıları, boyutları, ağırlıkları, tedarik ve talep kapasiteleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Paket özellikleri

Paket Tipi	Paket Sayısı	Ağırlık	Uzunluk	Genişlik	Yükseklik	Tedarik Kapısı	Talep Kapısı
1	5	25	40	24	15	2	6
2	7	15	24	20	10	3	6
3	10	10	20	12	5	1	6
4	5	20	24	40	10	2	5
5	6	18	20	24	15	4	7
6	10	10	12	20	5	3	5

3.2. Birinci Problemin Çözümü

Oluşturulan veri seti için, Birinci Problem, IBM ILOG CPLEX

Optimization Studio 12.7.1.0 ile modellenerek çözülmüş ve en iyi çözüm 8,08 sn.de bulunmuştur. En iyi çözüm için

amaç fonksiyonu değeri 9,493 olarak bulunmuş, çözümde dokuz adet konteyner kullanılarak bütün paketler yerleştirilmiştir. Sadece toplam hacim ve ağırlık kısıtlamaları göz önüne alınarak bulunan konteyner sayısı alt sınırı (CLB) sekiz olarak bulunmuştur. Bu durumda bulduğumuz çözüm en iyiye oldukça yakındır. Çözümde aynı konteyner ve farklı konteynerde olma kısıtları ve konteynerlerin ağırlık ve hacim limiti kısıtlamalarına dikkat

edilmiştir. Boyutlarının büyük olması nedeniyle 1 ve 2 numaralı paketlerin hepsi aynı konteynere yüklenememiştir. Ancak, aynı konteynerde olma kısıtlaması göz önüne alınmıştır. Bulunan en iyi çözümde 9 adet konteyner kullanılmıştır. Kullanılan konteynerlere yerleştirilen paket tipleri, sayıları, konteynerin toplam ağırlığı ve turları Tablo 6'da verilmiştir.

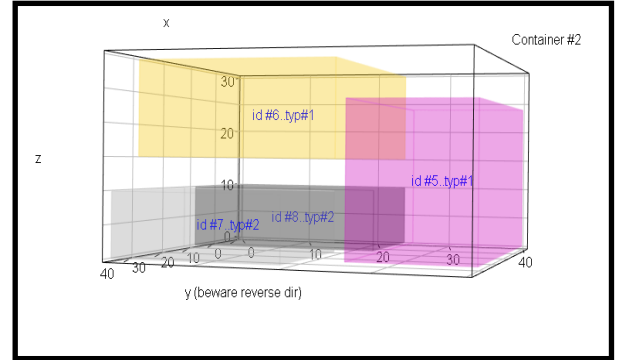
Tablo 6. En iyi çözümde kullanılan konteynerlerin içerikleri ve turları

Konteyner No	Konteynerde Bulunan Paketler	Toplam Ağırlık	Konteyner Turu
1	2 adet 1 No'lu kırmızı paket 2 adet 2 No'lu yeşil paket	80	0-2-3-6-8
2	2 adet 1 No'lu kırmızı paket 2 adet 2 No'lu yeşil paket	80	0-3-2-6-8
3	4 adet 5 No'lu mor paket	72	0-4-7-8
4	1 adet 1 No'lu kırmızı paket 3 adet 2 No'lu yeşil paket	70	0-2-3-6-8
5	3 adet 4 No'lu turuncu paket 2 adet 6 No'lu sarı paket	80	0-3-2-5-8
6	1 adet 4 No'lu turuncu paket 2 adet 6 No'lu sarı paket 2 adet 3 No'lu mavi paket	60	0-1-3-2-6-5-8
7	8 adet 3 No'lu mavi paket	80	0-1-6-8
8	2 adet 5 No'lu mor paket	36	0-4-7-8
9	1 adet 4 No'lu turuncu paket 6 adet 6 No'lu sarı paket	80	0-3-2-5-8

3.3. İkinci Problemin Çözümü

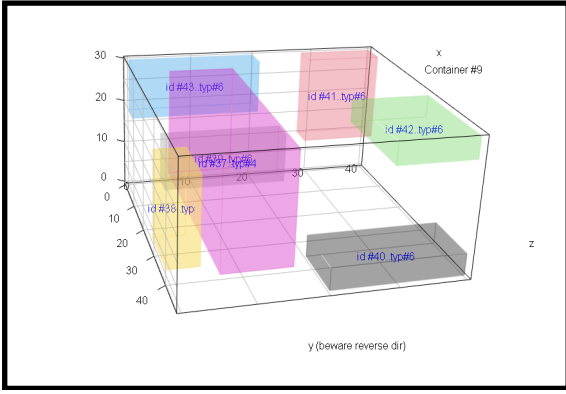
Birinci problem çözüldükten sonra, problemin çözümündeki kaç adet konteyner kullanıldığı ve paketlerin hangi konteynerlerin içerisinde olduğu bilgisi, formatlı bir metin dosyası ile ikinci probleme veri olarak girilmiştir. Daha sonra ikinci problemin sadece oryantasyon, geometrik ve üst üste çakışmama kısıtlamalarını içeren bölümü IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.7.1.0 ile modellenerek çözülmüş ve en iyi çözüm 0,19 saniyede bulunmuştur. Bulunan en iyi çözümde, dikey kararlılık ve ağırlık dağılım kısıtlamaları olmadığı için, bazı paketler konteynerin içerisinde havada asılı kalmışlardır. Örneğin, R Studio programında yazılan uygulama ile görselleştirilen iki numaralı konteyner yerleşiminde sarı ile gösterilen birinci tip paketlerden bir tanesinin havada asılı kaldığı Şekil 1'de gösterilmiştir.

Aynı çözümde, havada asılı kalan kutuların durumu dokuz numaralı konteynerin yerleşiminde daha açık görülmektedir. Dokuz numaralı konteyner yerleşiminin görseli Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. İki numaralı konteyner yerleşiminin gösterimi

Daha sonra ikinci probleme Ağırlık Dağılım ve Dikey Kararlılık kısıtları eklenerek çözülmüştür. Bu durumda ikinci problemin çözümü 2,06 dakika sürmüştür. Bulunan çözümde Dikey Kararlılık ve Ağırlık Dağılım kısıtları sağlanmasına rağmen amaç fonksiyonumuz kukla olduğu yani gerçekte amaç fonksiyonu olmadığı için paketler havada asılı kalmıştır. Amaç fonksiyonunu, denklem (118) ile verilen, konteynerlerin ağırlık merkezlerinin Z koordinatlarını minimum yapmak olarak seçtiğimizde ise beklenildiği şekilde paketler konteyner tabanına yakın ve havada asılı kalmadan yerleşmiştir.



Şekil 2. Dokuz numaralı konteyner yerleşiminin gösterimi

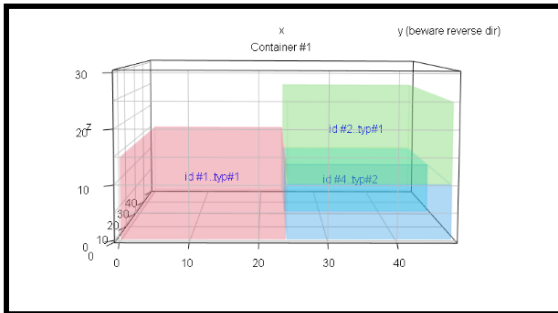
Son tasarımda en iyi çözümü bulmak 4,52 dakika sürmüş ve amaç fonksiyonu değeri 60,744 olarak bulunmuştur. En iyi çözümde paketlerin yerleştirildikleri konteynerler, paketlerin koordinatları ve boyutlarının gösterildiği excel sayfası Şekil 3'te gösterilmiştir.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{\text{numConts}} zCG_i \quad (118)$$

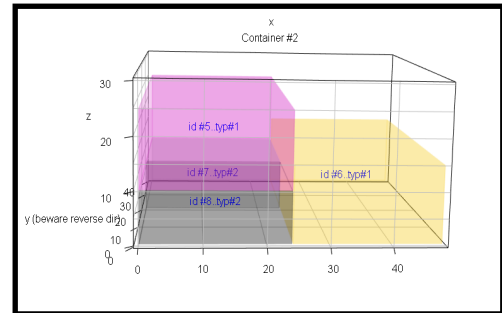
En iyi çözümde, dokuz adet konteynerin yerleşimlerinden örnek olarak seçilen üç adet konteyner yerleşimi Şekil 4-6'da verilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Box	Cont	Box Type	x	y	z	bl	bw	bh
1	1	1	1	0	0	0	24	40	15
2	2	1	1	24	0	0	10	24	40
3	3	1	2	24	20	0	24	20	10
4	4	1	2	24	0	0	24	20	10
5	5	2	1	0	0	10	24	40	15
6	6	2	1	24	0	0	24	40	15
7	7	2	2	0	0	0	24	20	10
8	8	2	2	0	20	0	24	20	10
9	9	3	5	24	20	0	24	20	15
10	10	3	5	0	0	0	24	20	15
11	11	3	5	0	20	0	24	20	15
12	12	3	5	24	0	0	24	20	15
13	13	4	1	0	0	0	24	40	15
14	14	4	2	24	0	0	24	10	20
15	15	4	2	24	30	0	24	10	20
16	16	4	2	24	10	0	24	20	10
17	17	5	4	24	0	0	24	40	10
18	18	5	4	24	0	10	24	40	10
19	19	5	4	0	0	5	24	40	10
20	20	5	6	0	0	0	12	20	5
21	21	5	6	0	20	0	12	20	5
22	22	6	3	12	20	0	12	20	5
23	23	6	3	12	0	0	12	20	5
24	24	6	4	24	0	0	24	40	10
25	25	6	6	0	20	0	12	20	5
26	26	6	6	0	0	0	12	20	5
27	27	7	3	36	0	0	12	20	5
28	28	7	3	36	20	0	12	20	5
29	29	7	3	24	0	0	12	20	5
30	30	7	3	24	20	0	12	20	5
31	31	7	3	12	20	0	12	20	5
32	32	7	3	12	0	0	12	20	5
33	33	7	3	0	0	0	12	20	5
34	34	7	3	0	20	0	12	20	5
35	35	8	5	0	0	0	20	24	15
36	36	8	5	20	0	0	20	24	15
37	37	9	4	12	0	0	24	40	10
38	38	9	6	36	20	0	12	20	5
39	39	9	6	36	20	5	12	20	5
40	40	9	6	36	0	0	12	20	5
41	41	9	6	0	20	0	12	20	5
42	42	9	6	0	0	5	12	20	5
43	43	9	6	0	0	0	12	20	5
44	44	9	6	0	0	0	12	20	5

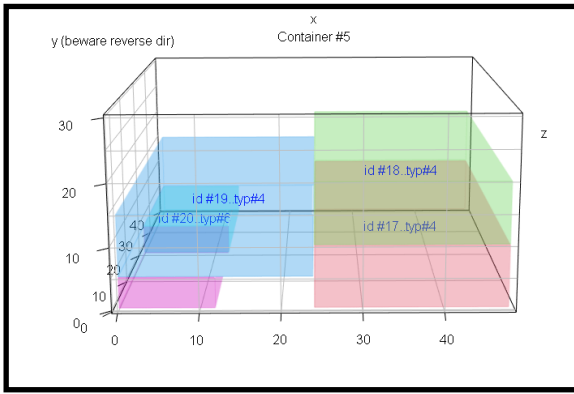
Şekil 3. İkinci problemin en iyi çözümü



Şekil 4. Birinci konteynerin içinin yerleşimi



Şekil 5. İkinci konteynerin içinin yerleşimi



Şekil 6. Beşinci konteynerin içinin yerleşimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tedarikçileriyle üretici firma veya üretici firma ile müşterileri arasındaki malzeme akışını düzenlemek amacıyla oluşturulan döngüsel taşıma sistemlerinde kullanılan konteynerlerin en iyi şekilde rotalama ve yüklemesinin belirlendiği özgün bir matematiksel model önerilmiştir. Bu model, literatürde Kesme ve Paketleme Problemleri altında incelenen Konteyner Yükleme Problemi olarak sınıflandırılmıştır. Bu tip problemlerde, modele eklenen yan kısıt tipi ne kadar fazlaysa, gerçek hayat problemlerine o kadar yakın sonuçlar elde edilmektedir. Ancak modeldeki yan kısıt tipi çoğaldıkça, modelin boyutu büyümekte çözümün bulunması uzamaktadır.

Bizim önerdiğimiz çözüm yönteminde, problemi gerçek hayat problemine yaklaştırmak amacıyla çok sayıda yan kısıt tipi modele eklenmiştir. Problemi basitleştirmek ve çözüm süresini makul bir zamanda tutabilmek için, model ikiye bölünmüş ve ardışık iki model olarak çözülmüştür. İki modellenli problemin çözüm yönteminin doğruluğunu ve geçerliliğini kontrol edebilmek amacıyla, en az bir uygun çözümü olduğu bilinen bir test problemi oluşturulmuş. Model ve yöntem test verisi ile denenmiştir. Problem

boyutu orta ölçekli olmasına rağmen model oldukça kısa bir sürede en iyi çözüme oldukça yakın bir çözüme ulaşabilmiştir.

Geleceğe yönelik olarak, bir Rassal Veri Üreteç programı yazılarak model ve çözüm yöntemi daha fazla ölçekteki veri setleriyle denenecek ve elde edilen sonuçlar konteyner sayısının alt sınırıyla karşılaştırılacaktır. Bunun yanında, iki modelin bağlantı kısıtları ile birleştirilmesiyle elde edilen bütünsel modelin çözüm performansını artırmaya yönelik sezgisel, meta-sezgisel veya mat-sezgisel yöntemler üzerinde çalışılacaktır.

Yazar Katkıları

Tevfik ALTINALEV: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntemi, (c) Literatür Taraması, (f) Veri Toplama, İşleme, (g) Analiz, Yorum, (h) Metin Yazma

Alpaslan FİĞLALI: (a) Fikir, (c) Literatür Taraması, (d) Danışmanlık, (e) Malzeme, Kaynak Sağlama, (g) Analiz, Yorum, (i) Eleştirel İnceleme

Etik Beyanı

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

KAYNAKLAR

- Abdou, G., & Elmasry, M. (1999). 3D random stacking of weakly heterogeneous palletization problems. *International Journal of Production Research*, 37, 1505-1524.
- Alonso, M. T., Alvarez-Valdes, R., Iori, M., & Parreno, F. (2019). Mathematical models for multi-container loading problems with practical constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 722-733.
- Amossen, R. R., & Pisinger, D. (2010). Multi-dimensional bin packing problems with guillotine constraints. *Computers & Operations Research*, 37, 1999-2006.
- Bischoff, E., & Ratcliff, M. S. W. (1995). Issues in the development of approaches to container loading. *Omega*, 23, 377-390.
- Bortfeldt, A., & Gehring, H. (1999). Two metaheuristics for strip packing problems. In D. K. Despotis & C. Zopounidis (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference of the Decision Science Institute* (pp. 1153-1156).
- Bortfeldt, A., & Wascher, G. (2012). Container loading problems – A state-of-the-art review (Working Paper Series No. 7/2012).
- Carpenter, H., & Dowsland, W. B. (1985). Practical considerations of the pallet loading problem. *Journal of the Operational Research Society*, 36, 486-497.
- Chan, F. T. S., Bhagwat, R., Kumar, N., Tiwari, M. K., & Lam, P. (2006). Development of a decision support system for air-cargo pallets loading problem. *Expert Systems with Applications*, 31, 472-485.
- Chen, C., Lee, S., & Chen, Q. (1995). An analytical model for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 80(1), 68-76.

- Chien, C., & Deng, J. (2004). A container packing support system for determining and visualising container packing patterns. *Decision Support Systems*, 37, 23-34.
- Davies, A., & Bischoff, E. E. (1999). Weight distribution considerations in container loading. *European Journal of Operational Research*, 114, 509-527.
- Deplano, I., Lersteau, C., & Nguyen, T. T. (2021). A mixed-integer model for the multiple heterogeneous knapsack problem with realistic container loading constraints and bins' priority. *International Transactions in Operational Research*, 28, 3244-3275.
- Egeblad, J., Garavelli, C., Lisi, L., & Pisinger, D. (2010). Heuristics for container loading of furniture. *European Journal of Operational Research*, 200, 881-892.
- Eley, M. (2003). A bottleneck assignment approach to the multiple container loading problem. *OR Spectrum*, 25, 45-60.
- Fanslau, T., & Bortfeldt, A. (2010). A tree-search algorithm for solving the container loading problem. *INFORMS Journal on Computing*, 22, 222-235.
- Fekete, S. P., Schepers, J., & van der Veen, J. C. (2007). An exact algorithm for higher-dimensional orthogonal packing. *Operations Research*, 55, 569-587.
- Fuellerer, G., Doerner, K., Hartl, R. F., & Iori, M. (2010). Metaheuristics for vehicle routing problems with three-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, 201, 751-759.
- Gajda, M., Trivella, A., Mansini, R., & Pisinger, D. (2022). An optimization approach for a complex real-life container loading problem. *Omega*, 107, 102559. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2021.102559>
- Gehring, H., & Bortfeldt, A. (1997). A genetic algorithm for solving the container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, 4, 401-418.
- Gimenez-Palacios, I., Alonso, M. T., Alvarez-Valdes, R., & Parreno, F. (2023). Multicontainer loading problems with multidrop and split delivery conditions. *Computers & Industrial Engineering*, 175, 108844. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108844>
- Girlich, E., & Tarnowski, A. G. (1994). Zur Effektivität von Gradientenverfahren für Zuschnittprobleme. *OR Spectrum*, 16, 211-221.
- Goncalves, J. F., & Resende, M. G. C. (2012). A parallel multi-population biased random key genetic algorithm for a container loading problem. *Computers & Operations Research*, 39, 179-190.
- He, K., & Huang, W. (2011). An efficient placement heuristic for three-dimensional rectangular packing. *Computers & Operations Research*, 38, 227-233.
- Hemminki, J., Leipala, T., & Nevalainen, O. (1998). On-line packing with boxes of different size. *International Journal of Production Research*, 36, 2225-2245.
- Hifi, M. (2004). Exact algorithms for unconstrained three-dimensional cutting problems: A comparative study. *Computers & Operations Research*, 31, 657-674.
- Hodgson, T. J. (1982). A combined approach to the pallet loading problem. *IIE Transactions*, 14, 175-182.
- Junqueira, L., Morabito, R., & Yamashita, D. S. (2012). Three-dimensional container loading models with cargo stability and load bearing constraints. *Computers & Operations Research*, 39, 74-85.
- Jiao, G., Huang, M., Song, Y., Li, H., & Wang, X. (2024). Container loading problem based on robotic loader system: An optimization approach. *Expert Systems with Applications*, 236, 121222. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121222>
- Liu, J., Yue, Y., Dong, Z., Maple, C., & Keech, M. (2011). A novel hybrid tabu search approach the container loading. *Computers & Operations Research*, 38, 797-807.
- Makarem, O. C., & Haraty, R. A. (2010). Smart container loading. *Journal of Computational Methods in Science and Engineering*, 10, 231-245.
- Martello, S., Pisinger, D., & Vigo, D. (2000). The three-dimensional bin packing problem. *Operations Research*, 48, 256-267.
- Morabito, R., & Arenelas, M. (1994). An AND/OR-graph approach to the container loading problem. *International Transactions in Operational Research*, 1, 59-73.
- Moura, A., & Oliveira, J. F. (2009). An integrated approach to the vehicle routing and container loading problems. *OR Spectrum*, 31, 775-800.
- Nascimento, O. X., Queiroz, T. A., & Junqueira, L. (2021). Practical constraints in the container loading problem: Comprehensive formulations and exact algorithms. *Computers & Operations Research*, 128, 105-186.
- Ngoi, B. K. A., Tay, M. L., & Chua, E. S. (1994). Applying spatial representation techniques to the container packing problem. *International Journal of Production Research*, 32, 111-123.
- Padberg, M. (2000). Packing small boxes into a big box. *Mathematical Methods of Operations Research*, 52, 1-21.
- Parreno, F., Alvarez-Valdes, R., Tamarit, J. M., & Oliveira, J. F. (2008). A maximal-space algorithm for the container loading problem. *INFORMS Journal on Computing*, 20, 412-422.
- Pisinger, D. (2002). Heuristics for the container loading problem. *European Journal of Operational Research*, 141, 382-392.
- Techanitisawad, A., & Tangwiwatwong, P. (2004). A GA-based heuristic for interrelated container selection loading problems. *Industrial Engineering and Management Systems*, 3, 22-37.
- Terno, J., Scheithauer, G., Sommerweiss, U., & Riehme, J. (2000). An efficient approach for the multi-pallet loading problem. *European Journal of Operational Research*, 123, 372-381.
- Tsai, D. M. (1987). *Modelling and analysis of three-dimensional robotic palletizing systems for mixed carton sizes* [Doctoral dissertation]. Iowa State University.
- Wascher, G., Hausner, H., & Schuman, H. (2007). An improved topology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 183, 1109-1130.

Evaluation of The Effect of Metalaxyl-M and Chlorothalonil Against Downy Mildew in Cucumber and Investigation of Their Residues

Metalaxyl-M ve Chlorothalonil'in Hıyarda Tüylü Küf Hastalığına Karşı Etkisinin Değerlendirilmesi ve Kalıntılarının Araştırılması

Saifuldeen Jasim Mohammed MOHAMMED¹, Gülşen GÜÇLÜ², Danial KAHRİZİ³,
Tuğba GÜRKÖK TAN⁴

¹ Cankiri Karatekin University, Agriculture and Life Sciences, Graduate School of Natural and Applied Sciences 18100, Cankiri, Turkey

² Sivas Cumhuriyet University, Health Services Vocational School, Department of Health Programmes, Sivas, Turkey

³ Tarbiat Modares University, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Biotechnology, Tehran, Iran

⁴ Cankiri Karatekin University, Food and Agriculture Vocational School, Department of Field Crops 18100, Cankiri, Turkey

Article Info

Research Article

DOI: 10.29048/makufebed.1536050

Corresponding Author

Tuğba GÜRKÖK TAN

Email: t.gurkok@gmail.com

Article History

Received: 20.08.2024

Revised: 07.10.2024

Accepted: 10.10.2024

Available Online: 26.12.2024

To Cite

Mohammed, S.J.M., Güçlü, G., Kahrizi, D., & Gürkök Tan, T. (2024). Evaluation of the effect of metalaxyl-M and chlorothalonil against downy mildew in cucumber and investigation of their residues. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 15(2), 103-110. <https://doi.org/10.29048/>

ABSTRACT: Cucumber (*Cucumis sativus* L.), one of the 30 *Cucumis* species found worldwide, is the most economically significant. *Pseudoperonospora cubensis*, a causative agent of downy mildew, affects cucumbers and other cucurbits. Using a combination of the QuEChERS technique and HPLC, the residue levels and rate of degradation of the commercial fungicide, contained two active components (metalaxyl-M and chlorothalonil), in the cucumber were determined. Additionally, the fungicide's effectiveness was assessed. The experiment was conducted in a greenhouse with a randomized block pattern in the eastern Iraqi city of Ramadi, Anbar Governorate. Cucumbers grown in greenhouses were found to have high amounts of metalaxyl-M and chlorothalonil residues. The fungicide required about 14 days to completely dissipate from the cucumber fruits. The recoveries of chlorothalonil and metalaxyl-M were 90.3% and 86.7%, respectively. The half-lives of metalaxyl-M and chlorothalonil were determined as 0.90 and 0.85, respectively.

Keywords: Cucumber, Metalaxyl-M, Chlorothalonil, HPLC, downy mildew

Öz: Hıyar (*Cucumis sativus* L.), dünya çapında bulunan 30 hıyar türünden biri olup ekonomik açıdan en önemli olanıdır. *Pseudoperonospora cubensis*, salatalık ve diğer kabakgilleri etkileyen en yıkıcı yaprak hastalıklarından biri olan tüylü küfe neden olan mantardır. QuEChERS tekniği ve HPLC'nin bir kombinasyonu kullanılarak, iki aktif bileşen (metalaxyl-M ve chlorothalonil) içeren ticari fungusitlerin salatalıktaki kalıntı seviyeleri ve bozunma oranları tespit edilmiştir. Ayrıca, fungusitlerin etkinliği de değerlendirilmiştir. Deneysel, Irak'ın doğusundaki Anbar vilayetinin Ramadi kentinde bulunan tesadüfi blok desenli bir serada, salatalık mahsulü üzerinde yürütülmüştür. Seralarda yetiştirilen salatalıklarda yüksek miktarda metalaxyl-M ve chlorothalonil kalıntıları bulunmuştur. Fungisitlerin salatalık meyvelerinden tamamen kaybolması için yaklaşık 14 gün gerekmiştir. Klorotalonil ve metalaksil-M'nin geri kazanımı sırasıyla %90,3 ve %86,7 olmuştur. Metalaxyl-M ve klorothalonil'in yarı ömürleri sırasıyla 0.90 ve 0.85'tir.

Anahtar Kelimeler: Hıyar, Metalaxyl-M, Chlorothalonil, HPLC, tüylü küf

1. INTRODUCTION

The growing global demand for food due to the expanding human population is being challenged by various factors, including plant diseases that are impacting agricultural production. As a response, the use of pesticides in agriculture has been instrumental in reducing diseases and enhancing productivity. While pesticides play a crucial role in disease control and financial returns for farmers, their extensive use raises concerns about environmental pollution in soil, water, air, and food, as well as potential residues in plants (Ghanbari et al., 2024). Global organizations such as the Food and Agriculture Organization (FAO), the United States Environmental Protection Agency (USEPA), and the World Health Organization (WHO) caution against the risks associated with pesticide residues in humans, citing increased incidences of cancer and asthma, as well as adverse impacts on the reproductive system and embryo development (WHO, 2017). Extensive research on Maximum Residue Limits (MRL), pesticide residues, and determining post-harvest and pre-harvest intervals in crops is carried out by global research centres, universities, and research institutes in industrialized nations (Damalas and Eleftherohorinos, 2011). In the context of global food trade, understanding the minimum and maximum limits of pesticide residues, conducting analysis, and monitoring residues is essential. Industrialized nations have implemented strict regulations concerning these values to safeguard food safety and quality throughout the supply chain. The MRL values of different fruit and vegetable crops are set by national legislation. In making this decision, the World Food Organization and the World Health Organization are involved. However, the international borders established by the Codex Alimentarius Commission are used, as there are no local borders in Iraq. Since many farmers disregard advised dosages and post-application intervals in an attempt to boost crop yields, inspecting pesticide residues is crucial in all developing nations, including Iraq (Damalas and Eleftherohorinos, 2011).

The most valuable member of the Cucurbitaceae family in terms of commerce is the cucumber (*Cucumis sativus* L.). Due to its high-water content, this vegetable is widely used. Because of their limited shelf life, cucumbers are frequently used in salads or preserved in other ways, including pickling or marinating (Savory et al., 2011; Zieliński et al., 2017). While cucumbers are cultivated in Iraq, they are also imported from other countries. One of the most significant diseases affecting cucumbers and other cucurbits is mildew caused by *Pseudoperonospora cubensis*.

Numerous research studies have shown that a significant portion of pesticide active ingredients is concentrated in the peel of fruits and vegetables, including cucumbers. Therefore, techniques employed to remove the peel or outer layer of agricultural produce can substantially reduce

the presence of absorbed or adhered pesticides on the fruits (Awasthi et al., 1993). Given that home remedies are perceived as the most practical and cost-effective solutions in underdeveloped countries, they are primarily emphasized for pesticide removal. Reducing pesticide residue at home can be achieved through conventional methods such as washing or peeling crops before consumption. Hence, it is essential to reduce the levels of toxic substances. Methods for achieving this include washing vegetables with water, utilizing kitchen chemicals such as sodium permanganate, employing baking soda (sodium bicarbonate), and using vinegar (Krol et al., 2000). It is important to highlight that there is limited research and documentation on the efficacy of these methods in effectively reducing the levels of harmful chemicals present in fruits and vegetables (Omer et al., 2019).

The study aims to investigate the efficacy of metalaxyl-M and chlorothalonil as active ingredients in controlling mildew disease in greenhouse-grown cucumbers, while also determining their half-lives and residual levels.

2. MATERIAL and METHODS

2.1. Chemicals and Reagents

The fungicide Folio Gold® 537.5 SC, comprising two distinct groups (Metalaxyl-M 37.5 gm/L + Chlorothalonil 500 gm/L), was locally sourced and applied at the recommended dose in a greenhouse experiment for this study.

2.2. Greenhouse Trials

In a 5 by 18-meter greenhouse situated in the eastern Iraqi city of Ramadi within the Anbar Governorate, an experiment was carried out on cucumber crops. The soil in the greenhouse was analyzed at the Soil Research Center's labs, revealing a sandy texture, an electrical conductivity salinity of 6.0 dSm⁻¹, and a pH of 7.6. The experimental site was arranged with four rows of cucumber seedlings, spaced 35 cm apart, after sowing the seeds on cork plates on September 25, 2021. The seedlings were subjected to pesticide treatment. Each of the three replicates was divided into four treatments: three for fungicide application and one for comparison (without pesticides). In the third treatment (commercial pesticide), the recommended dose was applied twice, with the required amount of 2.5 mL/L, administered two days after the initial treatment. A 5-liter handheld sprayer was utilized to apply the pesticide Folio Gold® 537.5 to cucumber plants to prevent interference or contamination. Samples were collected at specific intervals: 2 hours' post-application, and at 1, 7, 10, and 14 days, with 1 kg per treatment as per Soliman (2021). Control samples were collected immediately after obtaining cucumbers during each sampling phase of the experiment. Table 1 details the commercial formulations, dosages, and Maximum Residue Limits (MRL) of the pesticide. Additionally, untreated cucumber fruits were stored for comparison. To prevent degradation, all samples were placed in vacuum-sealed polyethylene bags and stored at -20°C (Đorđević and

Đurović-Pejčev, 2016).

Table 1. Fungicide formulation, rate, exposure limit, and MRL

Common name	Commercial name	Rate mL/L	Exposure limit	*MRL (mg/kg)
Metalaxyl-M	Folio Gold® 537.5 SC	2.5 mL/ L	10 mg/m ³	0.50
Chlorothalonil			0.1 mg/m ³	3.00

*MRL = Maximum residual limits at Codex committee on pesticide residues

2.3. Extraction, Purification and Analysis Processes

A sample weighing approximately 1000 g of cucumber fruits or 100 g of cucumber leaves was frozen, crushed to homogeneity with a plastic mallet inside a bag, and mixed thoroughly by rotating the bag. Subsequently, 10 g of the sample was combined with 10 mL of acetonitrile (ACN) and processed using an electric mixer or homogenizer. For soil samples, the bag was shaken to achieve a uniform mixture without a mixer, followed by the addition of 10 milliliters of acetonitrile. The remaining steps for leaves and fruits involved mixing the sample for a minute at 500 cycles per minute. The QuEChERS method, as described by (Anastassiades et al., 2003) was then employed for further analysis.

2.4. HPLC Procedure and Method Validation

The analysis utilized the SHIMADZU/LC-20AD HPLC system equipped with a UV/vis detector. Standard solutions for metalaxyl-M (CAS No. 70630-17-0) and chlorothalonil (CAS No. 1897-45-6) from Merck® were prepared following the manufacturer's guidelines (Table 2). These solutions were then tested using the HPLC equipment to establish standard curves for metalaxyl-M and chlorothalonil calibration. During the assessment of the analytical method in three replicates, various criteria such as fungicide recoveries, limit of detection (LOD), limit of quantification (LOQ), and repeatability expressed as Relative Standard Deviation (RSD) were considered to validate the method. Recovery calculations were conducted on untreated cucumber fruits for the three fungicide treatments (0.01, 0.5, and 1.0 mg/kg). The linear range for the analysis was 0.01 to 0.1 µg/mL.

Table 2. Conditions of HPLC apparatus for detecting Metalaxyl-M and Chlorothalonil

Pesticides	Detection wavelength(nm)	Flow rate	Mobile phase	Volume
Metalaxyl-M	225	0.8 mL/min	Acetonitrile/methanol/water	40:20:40
Chlorothalonil	230	1.0 mL/min	acetonitrile/water	70:30

2.5. Recovery Efficiency

To assess the recovery efficiency, two concentrations were employed, one derived from standard solutions. Recovery efficiency was validated by comparing the control solution containing the standard solution with the other two solutions from contaminated cucumbers treated with the same standard solution. Following the extraction and purification processes, a comparison was conducted to ascertain the percentage recovery efficiency.

2.6. Measuring the Efficacy of Metalaxyl-M and Chlorothalonil Against Downy Mildew

Before evaluating the severity of the infection, the presence of the downy mildew pathogen in cucumbers was identified. Subsequently, 20 leaves were marked in three replicates, each comprising three treatments and one control. Over a period of 45 days, readings were taken every two weeks (totalling three readings) to determine the infection severity using a five-degree pathological index as outlined in Table 3.

Table 3. Disease severity in areas occupied by the causative fungus on the leaf

Disease severity	Areas occupied by the fungus that causes downy mildew on the leaf
zero	intact paper
one	(1–25) percent of the leaf area is infected with the causative fungus
two	(25–50) percent of the leaf area is infected with the causative fungus
three	(50–75) percent of the leaf area is infected with the causative fungus
four	(75–100) percent of the leaf area is infected with the causative fungus

2.7. Statistical Analysis

In the laboratory research, a Complete Randomized Design (CRD) was employed, whereas a Randomized Complete Block Design (RCBD) was utilized for the greenhouse experiments. Significant differences between the means in the RCBD design were compared at a 0.05 probability level to analyze the outcomes. According to Moye et al. (1987), half-life times ($t_{1/2}$) of the recovery of metalaxyl-M and chlorothalonil residues were computed theoretically.

Using the least significant difference test (USA, Chicago SPSS v. 20), the (L.S.D.) was applied. According to Moye et al. (1987), figures for the half-lives of metalaxyl-M and chlorothalonil residues " $(t_{1/2})$ " have been calculated. The fungicide residue concentration at time t is represented by the first-order kinetics equation " $(C_t = C_0 e^{-kt})$ ", where C_0 is the initial deposits following application and k is the constant rate of fungicide disappearance per day. The half-life of the fungicide under investigation " $(t_{1/2} = \ln 2/k)$ " can

be computed using this equation (Soliman, 2021).

3. RESULTS and DISCUSSION

3.1. Method Validation of Metalaxyl-M and Chlorothalonil

The metalaxyl-M data exhibited excellent linearity. The Maximum Residue Limits (MRLs) for metalaxyl were notably lower than the quantification limits, which were established at 0.01 mg/kg for metalaxyl-M. The method

was deemed feasible based on the EU method validation guidelines, with a Relative Standard Deviation (RSD) of 20 percent (Pihlström et al., 2021). The mean recoveries of metalaxyl-M were 86.66%. During the development of the method, it fully complied with the acceptable recovery range, which ranged from 70% to 120%. This indicates that the QuEChERS sample preparation method, when coupled with HPLC analysis, is appropriate for quantifying the residues of the examined fungicides in cucumber fruits. (Table 4).

Table 4. Recovery and SD values for metalaxyl-M in cucumber fruits

Metalaxyl-M			
Spike level mg/kg	Recovery±SD	Mean±SD	RSD%
0.1 (n=3)	84.0 ±4.87	86.66±4.84	4.50
0.5 (n=3)	89.0 ±8.76		8.45
0.01 (n=3)	87.0 ±1.03		0.90
LSD 5%		2.19	
<i>n= replicates of test</i>			
<i>LSD: Least significant difference</i>			

The results for chlorothalonil indicated excellent linearity, with maximum permissible levels (MRLs) lower than the 0.01 mg/kg limits of quantification for metalaxyl-M. The RSD met the EU method validation requirements, achieving 20 percent. The mean recoveries of chlorothalonil were 90.33%. During the development of

the method, it fully complied with the acceptable recovery range, which ranged from 70% to 120%. These findings demonstrate the suitability of the QuEChERS sample preparation method for quantifying the residues of the studied fungicides in cucumber fruits when paired with HPLC analysis (Table 5).

Table 5. Recovery and SD values of chlorothalonil in cucumber fruits

Chlorothalonil			
Spike level mg/kg	Recovery±SD	Mean±SD	RSD%
0.1 (n=3)	87.0 ±6.25	90.33±5.46	6.0
0.5 (n=3)	91.0 ±6.43		6.0
0.01 (n=3)	93.0 ±9.84		9.50
LSD 5%		2.69	
<i>n= replicates of test</i>			
<i>LSD: Least significant difference</i>			
<i>* Values holding the identical letters are considered nonsignificant, p>0.05</i>			

3.2. Dissipation in Fruits of Cucumbers in Field Conditions

3.2.1. Metalaxyl-M dissipation in cucumber fruits under field conditions

The study assessed the levels of metalaxyl-M residues and their dissipation rates following three treatments on cucumber fruits at recommended rates for greenhouse conditions. Initial residues were measured at 3.32 mg/kg two hours' post-application. The results demonstrated a significant decrease in the concentrations of both fungicides over time post-treatment. Particularly, metalaxyl-M dissipated rapidly after application. The detailed results are presented in Table 6 and Figure 1.

The residue levels in cucumber fruits notably decreased to 1.63 mg/kg within the first twenty-four hours after the application of metalaxyl-M. Subsequently, the concentration decreased significantly to 0.32 and 0.05 after 7- and 10-days' post-treatment, respectively. Both fungicide residues were undetectable after 14 days of treatment. The investigation indicated evidence of first-order kinetics for fungicide residues in cucumber fruits. The Maximum Residue Limit (MRL) was calculated based on Authority (2015).

Table 6. Determination of metalaxyl-M in cucumber fruits at different time intervals

Day after treatment	Metalaxyl-M	
	Metalaxyl-M Residues (mg kg ⁻¹)	Dissipation percentage
No treatment	0.00	0.00
Zero (after 2 hours)	3.32 ± 1.34	0.00
1	1.63 ± 0.28	49.57
7	0.32 ± 0.18	90.87
10	0.05 ± 0.03	97.89
14	0	0
t _{1/2} day	0.90	

3.2.2. Chlorothalonil dissipation in cucumber fruits under field conditions

The investigation assessed the levels of chlorothalonil residues and their dissipation rates following three treatments on cucumber fruits at recommended rates for

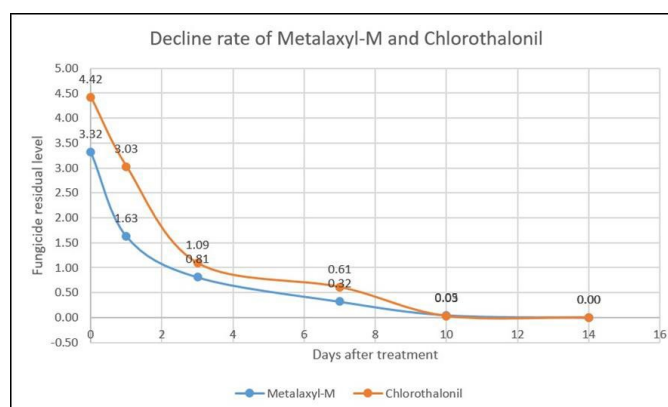
greenhouse conditions. Initial residues were measured at 4.42 mg/kg two hours' post-application. The results indicated a significant decrease in the concentrations of both fungicides at various time points post-treatment. Detailed findings displayed in Table 7 and Figure 1.

Table 7. Determination of chlorothalonil in cucumber fruits at different times

Day after treatment	Chlorothalonil	
	Chlorothalonil Residues (mg kg ⁻¹)	Dissipation percentage
No treatment	0.00	0.00
Zero	4.42 ± 1.73	0.00
3	1.09 ± 0.49	76.43
7	0.61 ± 0.27	87.65
10	0.03 ± 0.05	99.16
14	0	0
t _{1/2} day	0.85	

Chlorothalonil dissipates rapidly after application, with concentrations decreasing to 1.09, 0.61, and 0.03 mg/kg three, seven- and ten-days' post-treatment, respectively. Both fungicide residues became undetectable 14 days after treatment. The dissipation pattern observed in tomato

fruits mirrored that of chlorothalonil. (Al-Rahman et al., 2012). The fungicide residue investigation on cucumber fruit revealed evidence of first-order kinetics. The Maximum Residue Limit (MRL) was calculated based on the findings from Authority (2015).

**Figure 1.** Metalaxyl-M and chlorothalonil decline rates in this study

The half-lives of chlorothalonil and metalaxyl-M were determined to be 0.90 and 0.85 days, respectively. Previous studies by Al-Rahman et al. (2012) and Soliman (2021) indicated that the pre-harvest intervals (PHI) for metalaxyl-M and chlorothalonil were seven and three days, respectively. Additionally, Gambacorta et al. (2005) observed varying dissipation behaviours for chlorothalonil

in different vegetables, such as tomato fruits and cabbages (Zhang et al., 2007). Metalaxyl-M is recognized as a broad-spectrum fungicide with registered use on a variety of crops across different regions worldwide (Urech et al., 1977). In addition to its positive impact on plant growth and agricultural productivity, metalaxyl-M was observed to exhibit moderate stability under the standard

environmental conditions that were studied (Kamrin, 1997).

The observed metalaxyl-M residue half-life values and dissipation rates in cucumber align with findings reported by Talebi (2002). Variations in the dissipation rates of the two fungicides could be attributed to differences in their physiochemical and chemical structures, as well as factors such as photolysis, biotic and abiotic activities in field conditions, which influence their persistence in environments with diverse climate characteristics. The dissipation variations observed in fungicides can be influenced by a combination of biotic and abiotic processes, including photolysis. Egypt, a significant producer of cucumbers, cultivates some crop rich in antioxidants and nutrients. The primary objective of integrated pest management (IPM) strategies is to promote sustainable agricultural practices by minimizing pesticide use to mitigate the environmental impact of highly hazardous pesticides. Monitoring pesticide residues is a key aspect of integrated pest management (IPM) as it aids in determining proper dosages and establishing Pre-Harvest Interval (PHI) values. Test outcomes must adhere to standard limits to confirm the behaviour of residual metalaxyl-M and chlorothalonil. The Limits of Quantifiable Exposure (LOQ) for both insecticides were below the Maximum Residue Levels (MRLs) established by the EU and

the Codex Committee. The methods utilized demonstrated effective separation of the examined fungicides, with the QuEChERS methodology yielding excellent recoveries. Previous tests indicate that the levels of metalaxyl and chlorothalonil residues deemed acceptable for cucumber fruits in Egypt. Considering the results, reducing treatment dosages and implementing a safe pre-harvest interval of seven days before selling cucumber fruits as fresh produce aligns with recommendations (Gambacorta et al., 2005).

Dipping fruits and vegetables, like cucumbers, in a sodium chloride (table salt) solution can be a cost-effective and time-saving way to reduce pesticide residues. When Chinese cauliflower is soaked in a 1% brine solution for five minutes, most of the chlorothalonil can be removed from the vegetable, effectively reducing pesticide residues. Vemuri et al. (2014) demonstrated the efficacy of this method in removing suspended pollutants.

3.2.3. Efficacy of Metalaxyl-M and Chlorothalonil against Downy Mildew in cucumber

The use of metalaxyl-M and chlorothalonil demonstrated effectiveness in mitigating the disease affecting cucumber plants, as indicated by the results. In untreated cucumber plants, the infection severity on leaves increased over time, from 1.32 before treatment to 4.9 post-infection (Table 8).

Table 8. Efficacy of Folio Gold® 537.5 SC against downy mildew in cucumber

Disease severity assessment dates	Disease severity range (0-5)			
	DS1	DS2	DS3	DS4
One day before treating cucumber with pesticides	1.32	1.32	1.99	1.34
After two weeks of treatment	3.32	1.32	1.99	1.34
After four weeks of treatment	4.32	1.32	1.99	1.34
After six weeks of treatment	4.99	1.32	1.99	1.34
LSD 5%	1.78*	NS	NS	NS

DS: Disease severity; DS1: Disease severity, treatment without the use of fungicide; DS2: Disease severity, treatment with the recommended concentration (1.5 g L⁻¹ water); DS3: Disease severity, treatment with a double concentration; DS4: Disease severity, treatment with the recommended concentration (1.5 g L⁻¹ water), and respray after two days.

Conversely, the presence of metalaxyl-M and chlorothalonil on leaf surfaces, along with their antifungal properties, suppressed the development of new infection sites, contrasting with the untreated cucumber plants. Metalaxyl-M and chlorothalonil act by inhibiting the establishment of new infection sites for the downy mildew-causing fungus, either by preventing the germination of fallen conidia or by disrupting the germination tubes. This capability to suppress the germination of deposited conidia underscores the fungicides' efficacy in thwarting the formation of new pathogen populations. With a protective duration of four weeks, these fungicides serve as both preventive and curative agents. Application one week prior to the expected arrival of conidia spores is recommended for optimal efficacy. The application of pesticides prevented the development of new infections on cucumber leaves, as evidenced by stable infection severity values over five to six weeks compared to untreated leaves. Treating plants according to recommended protocols yielded positive outcomes, eliminating the necessity for

additional treatments or increased pesticide concentrations within two days.

3.3. Immersion in Chemical Solutions

The study demonstrated that sodium bicarbonate removed 98.5% of the insecticide when the concentration reached 0.5 mg L⁻¹. Similarly, soaking cucumber fruits in a fungicide concentration of 1 g L⁻¹ resulted in 98.5% removal of potassium permanganate. Both solutions efficiently achieved a concentration of 0.5 mg L⁻¹ in terms of pesticide removal from the fruit surfaces. The application of acetic acid (vinegar) on cucumber fruits resulted in the removal of 96.5% of the fungicide after a ten-minute submersion. This method effectively reduced the fungicide concentration from 34 mg L⁻¹ to 0.5 mg L⁻¹, similar to the efficacy demonstrated by sodium bicarbonate and potassium permanganate solutions. However, treating cucumber fruits with vinegar and salt at concentrations of 50 g/L and 100 g/L did not effectively eliminate the pesticide residue, with removal percentages ranging from



75% to 80% as the concentration reached 8.50 and 6.75 mg L⁻¹, respectively. These findings align with similar outcomes observed in an Iraqi study on greenhouse-grown cucumbers (Al-Oubaidie et al., 2018).

The application of integrated pest management (IPM) strategies plays a crucial role in reducing pesticide usage and mitigating the environmental impact of harmful chemicals in agriculture. Monitoring pesticide residues, such as metalaxyl-M and chlorothalonil, is essential for predicting appropriate dosages and ensuring compliance with safety standards. Efficient methods like the QuEChERS technique have shown promising results in removing pesticide residues from fruits and vegetables, contributing to safer agricultural practices.

Furthermore, the study highlights the effectiveness of fungicides like metalaxyl-M and chlorothalonil in managing diseases such as downy mildew in cucumber plants. These fungicides not only prevent the establishment of new infection sites but also exhibit persistence, protecting plants for extended periods. The successful reduction of infection severity on treated cucumber leaves compared to untreated ones underscores the importance of timely and proper pesticide application.

Moreover, the research explores various methods for pesticide residue removal from cucumber fruits, including sodium chloride, vinegar, and salt solutions. These methods have shown varying degrees of efficacy in eliminating pesticide residues, with acetic acid demonstrating high removal efficiency. Understanding the degradation and persistence of fungicides like Folio Gold® 537.5 SC in cucumber fruits is crucial for determining safe application practices and ensuring minimal environmental impact.

In conclusion, the study emphasizes the importance of implementing sustainable pest management practices, verifying pesticide residues, and evaluating the efficacy of different removal methods to promote food safety and environmental sustainability in agriculture. Additionally, the need for thorough assessment of degradation products before importing fungicides underscores the significance of regulatory measures to safeguard public health and the environment.

REFERENCES

- Al-Rahman, S. H., Almaz, M. M., & Ahmed, N. S. (2012). Dissipation of fungicides, insecticides, and Acaricide in tomato using HPLC-dad and Quechers methodology. *Food Analytical Methods*, 5(3), 564–570. <https://doi.org/10.1007/s12161-011-9279-0>
- Al-Oubaidie, A. B., Ali, A. J., Sumir, S. H., Al-Samaraie, O. I., & Ali, M. H. (2018). Degradation study of thiophanate-methyl residues in cucumber (*Cucumis sativus*). *Pakistan Journal of Biotechnology*, 15(4), 961-963.
- Anastassiades, M., Lehotay, S. J., Štajnbaher, D., & Schenck, F. J. (2003). Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and “dispersive solid-phase extraction” for the determination of pesticide residues in produce. *Journal of AOAC International*, 86(2), 412-431. <https://doi.org/10.1093/jaoac/86.2.412>
- Authority, European Food Safety Authority (EFSA) (2015). Reasoned opinion on the review of the existing maximum residue levels (MRLs) for diquat according to Article 12 of Regulation (EC) No 396/2005.

4. CONCLUSIONS

The research revealed that it took approximately 14 days for the fungicide Folio Gold® 537.5 SC to completely dissipate from cucumber fruits. The Maximum Residue Limit (MRL) values for Metalaxyl-M and Chlorothalonil were determined to be 0.50 and 3.1, respectively, within acceptable limits. Metalaxyl-M and Chlorothalonil exhibited half-lives of 0.90 and 0.85, respectively, indicating their persistence. The application of Metalaxyl-M and Chlorothalonil successfully mitigated the disease affecting the cucumber plants. For effective control of downy mildew disease in cucumbers, it is advisable to apply Folio Gold® 537.5 SC fungicide to the soil. Prior to the importation of authorized fungicides into Iraq, it is crucial to verify the presence of degradation products to ensure environmental safety.

Author Contribution

Saifuldeen Jasim Mohammed MOHAMMED: (b) Study Design, Methodology, (f) Data Collection, Processing, (l) Critical Review

Gülşen GÜÇLÜ: (c) Literature Review, (h) Writing Text

Danial KAHİRİZİ: (c) Literature Review, (h) Writing Text

Tuğba GÜRKÖK TAN: (a) Idea, Concept, (d) Supervision, (g) Analyses

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.



Conflict of Interest

The authors report there are no competing interests to declare.

- <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.3972>
- Awasthi, A. M., Degiorgi, L., Grüner, G., Dalichaouch, Y., & Maple, M. B. (1993). Complete optical spectrum of CeAl 3. *Physical Review B*, 48(15), 10692. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.48.10692>
- Damalas, C. A., & Eleftherohorinos, I. G. (2011). Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(5), 1402-1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>
- Dorđević, T., & Đurović-Pejčev, R. (2016). Food processing as a means for pesticide residue dissipation. *Pesticides and Phytomedicine*, 31(3-4), 89-105. <https://doi.org/10.2298/PIF1604089D>
- Gambacorta, G., Faccia, M., Lamacchia, C., Di Luccia, A., & La Notte, E. (2005). Pesticide residues in tomato grown in open field. *Food Control*, 16(7), 629-632. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.07.002>
- Ghanbari, F., Mazaherilaghab, H., & Khodakaramian, G. (2024). Qualitative evaluation and biological effects of the leaf and bulb heat-stable proteins in two garlic clones (*Allium sativum*). *Agrotechniques in Industrial Crops*, 4(1), 16-23. <https://doi.org/10.22126/atic.2024.9201.1106>
- Kamrin, M. A. (1997). *Pesticide profiles: toxicity, environmental impact, and fate*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780367802172>
- Krol, W. J., Arsenault, T. L., Pylypiw, H. M., & Incorvia Mattina, M. J. (2000). Reduction of pesticide residues on produce by rinsing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(10), 4666-4670. <https://doi.org/10.1021/jf0002894>
- Moye, H. A., Malagodi, M. H., Yoh, J., Leibe, G. L., Ku, C. C., & Wislocki, P. G. (1987). Residues of avermectin B1a in rotational crops and soils following soil treatment with [14C] avermectin B1a. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 35(6), 859-864. <https://doi.org/10.1021/jf00078a003>
- Omer, H. A., Abdel-Magid, S. S., & Awadalla, I. M. (2019). Nutritional and chemical evaluation of dried pomegranate (*Punica granatum* L.) peels and studying the impact of level of inclusion in ration formulation on productive performance of growing Ossimi lambs. *Bulletin of the National Research Centre*, 43, 1-10. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0245-0>
- Pihlström, T., Fernández-Alba, A. R., Amate, C. F., Poulsen, M. E., Hardebusch, B., Anastassiades, M., et al. (2021). Analytical quality control and method validation procedures for pesticide residues analysis in food and feed. *Sante*, 11312, https://food.ec.europa.eu/system/files/2023-11/pesticides_mrl_guidelines_wrkdoc_2021-11312.pdf.
- Savory, E. A., Granke, L. L., Quesada-Ocampo, L. M., Varbanova, M., Hausbeck, M. K., & Day, B. (2011). The cucurbit downy mildew pathogen *Pseudoperonospora cubensis*. *Molecular Plant Pathology*, 12(3), 217-226. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2010.00670.x>
- Soliman, H. M. (2021). The residual behavior of chlorothalonil and metalaxyl in the egyptian cucumbers fields infested with downy mildew using the high-performance liquid chromatography (HPLC) and quechers method. *Journal of Plant Protection and Pathology*, 12(7), 485-489. <https://doi.org/10.21608/jppp.2021.83659.1026>
- Talebi, K. (2002). Effects of two different formulations of metalaxyl on their residues in cucumber. *Mededelingen (Rijksuniv. te Gent. Fak. Landbouwk. Toegepaste Biol. Wetensch.)*, 67(2), 79-83.
- Urech, P. A., Schwinn, F., & Staub, T. (1977). CGA 48988 a novel fungicide for the control of late blight, downy mildews and related soil borne diseases. In British Crop Protection Conference; Proceedings (pp. 623-631).
- Vemuri, S. B., Rao, C. S., Darsi, R., Reddy, H., Aruna, M., Ramesh, B., & Swarupa, S. (2014). Methods for removal of pesticide residues in tomato. *Food Science and Technology*, 2(5), 64-68. <https://doi.org/10.13189/fst.2014.020502>
- WHO. (2017). *Evaluation of certain contaminants in food: ninety-third report of the joint FAO/WHO expert committee on food additives*. World Health Organization.
- Zhang, Z. Y., Liu, X. J., Yu, X. Y., Zhang, C. Z., & Hong, X. Y. (2007). Pesticide residues in the spring cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) grown in open field. *Food Control*, 18(6), 723-730. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2006.04.001>
- Zieliński, H., Surma, M., & Zielińska, D. (2017). The naturally fermented sour pickled cucumbers. In J. Frias, C. Martinez-Villaluenga, & E. Peñas (Eds.), *Fermented foods in health and disease prevention* (pp. 503-516). Academic Press.

Çanakkale Florasında Doğal Olarak Yetişen Bazı Geofit Türlerinin Süs Bitkisi Olarak Kullanılabilirliğinin AHP ve TOPSIS Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Evaluation of the Usability of Some Geophyte Species Growing Naturally in Çanakkale Flora as Ornamental Plants by AHP and TOPSIS Method

Necmettin GÜR¹ , Özgür KAHRAMAN^{2*} 

¹ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, Çanakkale, Türkiye

² Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Çanakkale, Türkiye

Article Info

Research Article

DOI:10.29048/makufebed.1538426

Corresponding Author

Özgür Kahraman

Email: ozgurkahraman@comu.edu.tr

Article History

Received: 25.08.2024

Revised: 8.10.2024

Accepted: 12.10.2024

Available Online: 26.12.2024

To Cite

Gür, N., & Kahraman, Ö. (2024). Çanakkale florasında doğal olarak yetişen bazı geofit türlerinin süs bitkisi olarak kullanılabilirliğinin AHP ve TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmesi. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 15(2), 111-124. <https://doi.org/10.29048/makufebed.1538426>

Öz: 21. yüzyılda süs bitkisi yetiştiriciliğinde yeni bitki türlerinin süs bitkisi olarak kullanılabilirliği oldukça önem kazanmıştır. Geofitler; süs bitkisi çatı kavramının içerisinde yer alan, toprak altı yapıları ile değişim geçirerek gelişim gösteren soğanlı, rizomlu, yumrulu bitkiler olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada Çanakkale ili florasında doğal olarak yetişen bazı geofit bitkilerinin süs bitkisi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Literatür taramaları ile Çanakkale ili florasında doğal olarak yetişen 58 geofit türü belirlenmiştir. Daha sonrasında bu 58 tür içerisinde süs bitkisi olarak kullanıma en uygun 5 tür AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak kantitatif bir şekilde belirlenmiştir. Yöntemler sonucunda en ideal olarak belirlenen 5 tür sırasıyla; *Cyclamen hederifolium*, *Doronicum orientale*, *Sternbergia lutea*, *Anemone blanda*, *Muscari latifolium* olarak belirlenmiştir. İdeal noktaya en uzak türün *Valeriana dioscoridis* olduğu tespit edilmiştir. Yöntemlerin sonuçlandırılmasından sonra AHP ve TOPSIS yönteminde yapılan sıralamanın tutarlılığının test edilmesi amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Duyarlılık analizi sonucunda yapılan sıralamaların tutarlı olduğu belirlenmiştir. Çalışmanın nihai sonucunda ise belirlenen bu beş bitki türünün farklı yetiştirme ortamlarında deneysel olarak da uygunluğunun belirlenmesinin literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Süs bitkileri, geofitler, AHP, TOPSIS, duyarlılık analizi, Çanakkale

ABSTRACT: In the 21st century, the use of new plant species as ornamental plants has gained importance in ornamental plant cultivation. Geophytes can be defined as bulbous, rhizomatous, tuberous plants that are included in the ornamental plant roof concept and that develop by changing with their underground structures. In this study, the usability of some geophytes growing naturally in the flora of Çanakkale province as ornamental plants was evaluated. By reviewing the literature, 58 geophyte species growing naturally in the flora of Çanakkale province were identified. Then, among these 58 species, the 5 most suitable species for use as ornamental plants were quantitatively determined using AHP and TOPSIS methods. As a result of the methods, the 5 most ideal species were determined as *Cyclamen hederifolium*, *Doronicum orientale*, *Sternbergia lutea*, *Anemone blanda*, *Muscari latifolium*. The species furthest from the ideal point was determined to be *Valeriana dioscoridis* after the finalization of the methods, sensitivity analysis was performed to test the consistency of the ranking made in AHP and TOPSIS methods. As a result of the sensitivity analysis, it was determined that the rankings were consistent. As a result of the study, it is thought that determining the suitability of these five plant species experimentally in different growing environments will contribute to the literature.

Keywords: Ornamental plants, geophytes, AHP, TOPSIS, sensitivity analysis, Çanakkale

1. GİRİŞ

Süs bitkileri; estetik yönleri bakımından güçlü, fonksiyonel ve işlevsel kullanımları olan, ekonomik olarak gelir sağlayan ve bu özellikleri dahilinde üretimi yapılan bitki türleridir. Süs bitkileri kendi içerisinde tasarım (dış mekân) bitkileri, saksılı (iç mekân), kesme çiçekler ve geofitler olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır (Gür ve Erduran Nemutlu, 2022). Geofitler; toprak altında gövdesi oluşan, metamorfoz geçirerek besin depo etme özelliği kazanmış soğanlı, yumrulu, yumru köklü, rizomlu, tuberli bitki türleridir (Şekeroğlu vd., 2013).

Geofit türler diğer çiçekli bitki türlerine göre olumsuz çevre koşullarına daha dayanıklı olmalarının yanında oldukça zarif ve estetik yönleri kuvvetli bitki türleridir. Dolayısıyla peyzaj mimarlığı tasarım ve uygulamalarında önemli bir yere sahiptir (Balos vd., 2022). Günümüzde dünyada ve Türkiye’de süs bitkisi yetiştiriciliğinde var olan türlerde çeşitli yenilik ve geliştirme çalışmaları yoğunluk kazanmıştır. Bunun yanında yeni türlerin de süs bitkisi olarak kullanılabilirliği üzerinde çalışmalara aynı derece yoğunlaşmıştır (Bozkurt, 2021).

Türkiye subtropik iklime sahip geniş bir doğal bitki örtüsüne sahiptir. Bundan dolayı doğal bitki türlerinin süs bitkisi olarak kullanımları üzerine yapılan çalışmalar ülkemizin biyoçeşitliliğinin korunması ve sürdürülebilir olmasını sağlama noktasında oldukça önemlidir (Eroğlu ve Acar, 2009). Bu tür çalışmalarda doğal bitki türleri içerisinde süs bitkisi olabileceğine sahip türleri belirlemede nicel verilere dayalı kantitatif yöntemlerin kullanılması alternatif bitki türlerinin belirlenmesini daha sağlam temellere oturtulmasını sağlar (Eren vd., 2017). Doğal bitki türleri içerisinde süs bitkisi olarak kullanıma uygun potansiyelli türlerin belirlenmesi bir karar verme problemi.

Karar verme problemleri, farklı zaman ve konularda anlaşmazlıkların yaşanması durumu olarak tanımlanabilir. Karar verme problemlerinin çözülmesinde en ideal karara ulaşabilmek için belirli kriterlerin ikili karşılaştırmalarına dayanan ve sayısal veriler ile nicel yaklaşımlar ortaya koyan Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemleri kullanılabilir (Yeşilkaya, 2018). Çok Ölçütlü Karar Verme yöntemleri, birçok alternatife sahip olan ve karar vericilerin karar verme sürecinde nitel gözlemlerinde nicel değerlendirmeler yapmasını sağlayan, belirsiz durumların giderilmesine yardımcı olan kantitatif yöntemlerdir (Singh vd., 2022). Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Yöntemi (TOPSIS) birer çok ölçütlü karar verme yöntemleridir. Bu iki yöntem karar verme sürecinde beraber kullanılabilir (Sindhu vd., 2017).

Literatürde bu iki çok ölçütlü karar verme yöntemi kullanılarak yapılan çalışma bulunmaktadır. Gür ve Kahraman (2022), çalışmalarında İzmir yöresinde doğal olarak yetişen ve süs bitkisi olarak kullanıma potansiyeline sahip olan türler arasından dikey bahçe sistemlerinde kullanılabilir olan bitki türünü belirlemek için AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışmalarında öncelikli olarak İzmir yöresinde doğal olarak yetişen ve süs bitkisi olarak kullanılabilir potansiyeline sahip türleri literatür taramaları ile belirlemişlerdir. Daha sonrasında dikey bahçe sistemlerinde kullanılan bitkilerin özelliklerine göre seçim kriterlerini belirleyerek AHP ve TOPSIS yöntemlerini uygulamışlardır. Sonuç olarak *Lavandula stoechas* L. bitkisinin dikey bahçe sistemlerinde kullanılabilir potansiyele sahip en uygun tür olduğunu belirlemişlerdir. Gür ve Kahraman (2023), örnek alan olarak seçtikleri Bornova metro durağında uygulanabilecek potansiyel dikey bahçe uygulaması için çok ölçütlü karar verme yöntemleri kullanarak bitki türü seçimi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında örnek alandaki dikey bahçe uygulama yöntemini belirlemek için SWOT analizi uygulaması yapmışlardır. Dikey bahçe sistemi uygulama yöntemini belirledikten sonra o sisteme uygun bitkileri belirlemek için de AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Costa vd. (2023) çalışmalarında şirketlerin çalışanlarının daha karmaşık ve değerleri görevlere odaklanmalarını arttırabilmek için robotik süreç otomasyonlarına daha sık yöneldiklerini belirtmişlerdir. Şirketlerin amaçlarına uygun otomasyon seçimlerinde ve süreç tanımlama yöntemlerinde nitelikli olmaları gerektiğinden bahsetmişlerdir. Dolayısıyla otomasyon süreçlerinin doğru seçiminin bir karar verme problemi olduğuna değinmişlerdir. Çalışmalarında bu aşamada AHP ve TOPSIS yöntemlerinin kullanılmasının doğru robotik süreç otomasyonunu belirlenmesinde etkili bir yöntem olduğunu belirterek şirketler için bir rehber oluşturmuşlardır.

Bu çalışmada Çanakkale ili florasında doğal olarak yetişen bazı geofit türlerinin süs bitkisi olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Amaca yönelik olarak çalışmada çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS yöntemleri bütünleşmiş bir şekilde kullanılmıştır.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmanın ana materyalini Çanakkale ilinde doğal olarak yetişen geofit türleri oluşturmaktadır. Bu kapsamda literatür taramaları ile Çanakkale ilinde doğal olarak yetişen geofit türleri belirlenmiş ve Tablo 1’de listelenmiştir.

Tablo 1. Çanakkale ilinde yetişen bazı doğal geofit türleri (Karabacak, 2002; Uysal vd., 2003; Güler, 2005; Arslan 2008; Avcu, 2011; Mutlu, 2011; Uysal vd., 2012; Avcu vd., 2016; Bozyel, 2017; Gürbüz, 2019; Günay, 2022)

Türün Latince İsmi	Familyası	Türkçe İsmi	Endemik Durumu
<i>Allium amethystinum</i> Tausch	Amaryllidaceae	Ege Soğanı	-
<i>Allium cyrilli</i> Ten.	Amaryllidaceae	Şeytan Sarımsağı	-
<i>Allium flavum</i> L.	Amaryllidaceae	Sarı Soğan	-
<i>Allium guttatum</i> Steven	Amaryllidaceae	Benli Soğan	-
<i>Allium kurtzianum</i> Asch. & Sint. ex Kollmann	Amaryllidaceae	Güzel Soğan	Endemik
<i>Allium orientale</i> Boiss.	Amaryllidaceae	Doğu Soğanı	-
<i>Allium scorodoprasum</i> L.	Amaryllidaceae	İt Soğanı	-
<i>Allium sibthorpiatum</i> Schult. & Schult.f.	Amaryllidaceae	Küme Soğanı	-
<i>Anemone blanda</i> (Schott & Kotschy) Holub	Ranunculaceae	Dağ Lalesi	-
<i>Anemone coronaria</i> L.	Ranunculaceae	Manisa Lalesi	-
<i>Asphodelus aestivus</i> Brot.	Asphodelaceae	Çiriş Otu	-
<i>Bellevalia dubia</i> (Guss.) Schult. & Schult.f.	Asparagaceae	Seyrek Sümbül	-
<i>Centaurea pichleri</i> Boiss.	Astereaceae	Dügmeli Ot	-
<i>Cephalanthera epipactoides</i> Fisch. & C.A.Mey.	Orchidaceae	Ana Çamçiçeği	-
<i>Cephalanthera longifolia</i> (L.) Fritsch	Orchidaceae	Kuşu Salebi	-
<i>Colchicum bivonae</i> Guss.	Colchicaceae	Öksüzoğlan	-
<i>Colchicum boissieri</i> Orph.	Colchicaceae	Sürincan	-
<i>Colchicum turcicum</i> Janka	Colchicaceae	Tarana Çiğdemi	-
<i>Corydalis integra</i> Barbey & Fors.-Major	Papaveraceae	Yamaç Tarlakuşu	-
<i>Crocus biflorus</i> Mill.	Iridaceae	İkiz Çiğdem	-
<i>Crocus candidus</i> Boiss.	Iridaceae	Ak Çiğdem	Endemik
<i>Crocus demirizianus</i> Erol & Can	Iridaceae	Adam Çiğdemi	-
<i>Crocus flavus</i> Weston	Iridaceae	Yer Çiğdemi	-
<i>Crocus gargaricus</i> Herb.	Iridaceae	Kaz Çiğdemi	-
<i>Crocus pulchellus</i> Herb.	Iridaceae	Güz Lalesi	-
<i>Cyclamen hederifolium</i> Aiton	Primulaceae	Kandil Kökü	-
<i>Dactylorhiza saccifera</i> (Brongn.) Soó	Orchidaceae	Keseli Salep	-
<i>Doronicum orientale</i> Hoffm.	Astereaceae	Kaplan Otu	-
<i>Dracunculus vulgaris</i> Schott	Araceae	Yılan Bıçağı	-
<i>Fritillaria bithynica</i> Baker	Liliaceae	Deli Lale	-
<i>Gagea bithynica</i> Pasch.	Liliaceae	Çam Yıldızı	Endemik
<i>Gagea bohemica</i> Schult.f.	Liliaceae	Sarı Yıldız	-
<i>Gagea peduncularis</i> (C.Presl) Pascher	Liliaceae	Karga Sarımsağı	-
<i>Gagea pratensis</i> (Pers.) Dumort.	Liliaceae	Çayır Yıldızı	-
<i>Galanthus gracilis</i> Çelak.	Amaryllidaceae	İnce Kardelen	-
<i>Galanthus trojanus</i> A.P.Davis & Özhatay	Amaryllidaceae	Truva Kardeleni	Endemik
<i>Geranium asphodeloides</i> Burm.f.	Geraniaceae	Yara Merhemi	-
<i>Iris kerneriana</i> Asch. & Sint. ex Baker	Iridaceae	Çalı Süseni	Endemik
<i>Iris suaveolens</i> Boiss. & Reut.	Iridaceae	Bodur Süsen	-
<i>Iris unguicularis</i> Poir.	Iridaceae	Çalı Navruzu	-
<i>Muscari bourgaei</i> Baker	Asparagaceae	Top Müşkürüm	Endemik
<i>Muscari comosum</i> (L.) Mill.	Asparagaceae	Morbaş	-
<i>Muscari latifolium</i> J.Kirk	Asparagaceae	Kaz Sümbülü	Endemik
<i>Muscari neglectum</i> Guss. ex Ten.	Asparagaceae	Arap Üzümlü	-
<i>Orchis laxiflora</i> Lam.	Orchidaceae	Salep Sümbülü	-
<i>Orchis provincialis</i> Balb. ex Lam. & DC.	Orchidaceae	Katrancık	-
<i>Ornithogalum nutans</i> L.	Asparagaceae	Türkü Otu	-
<i>Ornithogalum sigmoideum</i> Freyn & Sint.	Asparagaceae	Sakarca	-
<i>Ornithogalum wiedemannii</i> Boiss.	Asparagaceae	Enginyıldız	-
<i>Prospero autumnale</i> (L.) Speta	Asparagaceae	Güz Sümbülü	-
<i>Ranunculus ficaria</i> L.	Ranunculaceae	Basur Otu	-
<i>Romulea linaresii</i> Park.	Iridaceae	Dibitatlı	-

Tablo 1. Çanakkale ilinde yetişen bazı doğal geofit türleri (devam)

Türün Latince İsmi	Familyası	Türkçe İsmi	Endemik Durumu
<i>Scilla bifolia</i> L.	Asparagaceae	Orman Sümbülü	-
<i>Sternbergia lutea</i> (L.) Ker Gawl. ex Spreng.	Amaryllidaceae	Kara Nergis	-
<i>Tulipa agenensis</i> DC.	Liliaceae	Kaba Lale	-
<i>Tulipa orphanidea</i> Boiss. ex Heldr.	Liliaceae	Doğan Dili	-
<i>Tulipa sylvestris</i> L.	Liliaceae	Sarı Lale	-
<i>Valeriana dioscoridis</i> Sm.	Carpifoliaceae	Çoban Zurnası	-

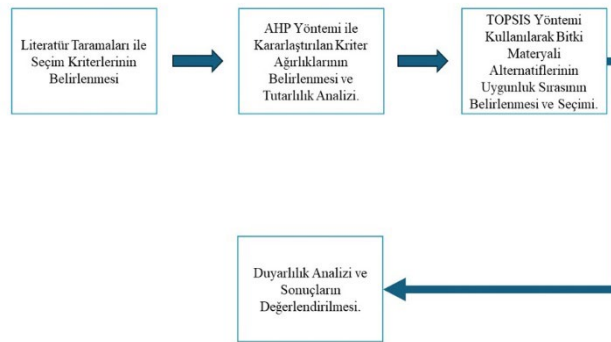
Araştırma alanı olan Çanakkale ili Türkiye'nin Marmara Bölgesi'nin Güney Marmara Bölümü'nde bulunup, Marmara ve Ege Denizi'ni birbirine bağlayan, Avrupa ve

Asya kıtasını ayıran Çanakkale Boğazı'nın iki yakasında yer almaktadır (Şekil 1; Çelik, 2011).

**Şekil 1.** Araştırma alanı

Çalışmanın amacına yönelik olarak yöntemde ilk olarak literatür taramaları ve uzman görüşleri yardımıyla seçim kriterleri belirlenmiştir. Daha sonrasında problem tanımına göre ideal bitki türlerinin belirlenmesi, alternatiflerin sıralanması ve listelenmesine yardımcı olması, farklılıkların ortaya koyulması için matematiksel çözümler içeren AHP

ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlere ek olarak duyarlılık analizi ile farklı senaryolar oluşturulmuş ve bitki alternatiflerinin sıralamasında değişimler olup olmadığı gözlemlenmiştir. Uygun bitki alternatiflerinin belirlenmesinde izlenen süreç Şekil 2'de belirtilmiştir.

**Şekil 2.** Süs bitkisi olarak kullanılabilir geofit bitki türü alternatiflerini belirleme süreci

2.1. AHP Yöntemi

AHP yöntemi 1970'li yıllarda Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden biridir. Yöntem, karar verme ve seçim aşamalarında gerekli kararların alınması noktasında yardımcı olan matematiksel bir modeldir. AHP yöntemi 4 aşamadan oluşmaktadır (Hu vd., 2024). İlk aşamada, problemin tanımlanması yapılarak problem yapısı oluşturulur. Belirlenen kriterlerin hiyerarşik

yapısı oluşturulur. İkinci aşamada hiyerarşik yapısı oluşturulan kriterlerin birbirlerine göre değerlendirmelerinin yapılabilmesi için ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Bu ikili karşılaştırma matrisinde kriterlerin değerlendirilmesinde Saaty'nin 1-9 skalası kullanılır (Tablo 2).

Tablo 2. Saaty'nin 1-9 skalası (Radomska-Zalas, 2022)

Önem Derecesi	Tanım
1	Eşdeğer derecede önemli
3	Orta derecede önemli
5	Kuvvetli derecede önemli
7	Çok kuvvetli derecede önemli
9	Mutlak derecede önemli
2, 4, 6, 8	Ara değerler

Karşılıklı değerler olarak i ve j karşılaştırılırken bir değere x atanmış ise; j ile i karşılaştırılırken atanacak değer $1/x$ olmalıdır. İkili karşılaştırma matrisinin modeli Formül 1'de belirtilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{3n} \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Üçüncü aşamada, ikili karşılaştırma matrisindeki değerler normalize edilir. Normalize edilmiş değerlerin normalize ikili karşılaştırma matrisi oluşturulur. Normalizasyon işlemi yapılırken Formül 2'den yararlanır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

Formül 2'ye göre matristeki her sütun değerinin ayrı ayrı toplamı alınır daha sonra her bir değer ilgili sütundaki toplam değerine bölünerek normalize edilmiş olur. AHP yönteminin dördüncü ve son aşamasında normalize edilmiş matrislerin satır toplamalarının ortalaması alınarak seçim kriterlerinin ağırlık değerleri hesaplanır. Bu değerler hesaplanırken Formül 3'ten yararlanır.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad (3)$$

Eşitlikteki "n" değeri, kriter sayısı kadardır. Kriter ağırlıklarının hesaplanmasından sonra geriye kalan bütün hesaplamalar tamamlanır. Tüm aşama ve hesaplamaların tamamlanmasından sonra AHP yöntemindeki tutarlılık oranının 0,1'den küçük olması gerekmektedir. Bu oranın 0,1'den küçük olması, seçim kriterlerinin ikili karşılaştırmalarının tutarlı ve mantıklı olduğu anlamına gelmektedir (Wątróbski vd., 2023; Kibria vd., 2024).

2.2. TOPSIS Yöntemi

TOPSIS yöntemi, 1980'li yıllarda Ching-Lai Hwang ve Kwangsun Yoon tarafından geliştirilmiş çok ölçütlü karar verme yöntemidir (Vivekh vd., 2017). Yöntemdeki temel prensipler öznelitlikler, kriterler ve hedeflerdir. TOPSIS, 6 aşamada gerçekleştirilen bir yöntemdir (Sengupta vd., 2023). İlk aşamada karar matrisi oluşturularak karar vericilerin belirlediği puan aralığında alternatifler her kritere göre puanlanır. Alternatiflerin kritere göre uyumluluğu arttıkça kritere göre uyumluluğu verilecek puan da artar. İkinci aşamada normalizasyon işlemi yapılarak standart karar matrisi oluşturulur. Bu aşama

gerçekleştirilirken Formül 4'ten yararlanır.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

Üçüncü aşamada AHP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak standart karar matrisi ağırlıklandırılmış standart karar matrisine çevrilir. Her kriter altındaki değer o kriterlerin ağırlık değerleri ile çarpılır. Dördüncü aşamada ağırlıklandırılmış standart karar matrisi kullanılarak negatif ve pozitif ideal çözüm noktaları oluşturulur. Bu ideal noktaların oluşturulması için değerlendirme faktörünün, normalize matrisindeki en yüksek ve en düşük değerleri belirlenir. Bu aşamada Formül 5 ve Formül 6 kullanılır. Formül 5 ile pozitif ideal noktası, Formül 6 ile negatif ideal çözüm noktaları belirlenir.

$$A^* = \{(\max_i v_{ij} | j \in J), (\min_i v_{ij} | j \in J^c)\}, A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \quad (5)$$

$$A^- = \{(\min_i v_{ij} | j \in J), (\max_i v_{ij} | j \in J^c)\}, A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (6)$$

Beşinci aşamada ideal noktaya olan uzaklıklar belirlenmektedir. Bu ideal noktaya olan uzaklıklar Formül 7 ve Formül 8 kullanılarak hesaplanır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (7)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (8)$$

Yöntemin son aşamasında ideal çözüme yakınlık hesaplanır. İdeal çözüme yakınlığın hesaplanması ile alternatifler arasında sıralama yapılır. Bu sıralamalardaki 1. olan alternatif en ideal olan alternatif olarak kabul edilir. Bu aşamada Eşitlik 9'dan yararlanır (Tsaur, 2011; Chen, 2019; Wang vd., 2022).

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*}, \quad 0 \leq C_i^* \leq 1 \quad (9)$$

2.3. Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, sıralaması yapılan her alternatifin kriterler üzerinde oluşturulan değişikliklerden etkilenmelerini ve sonuca nasıl yansıtıldığını gösterir

(Pamuçar vd., 2017). Bu şekilde alternatiflerin sıralamalarının ne derecede hassas olduğu görülür (Li vd., 2013).

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Çalışma yönteminin ilk aşamasında geofit türlerinin peyzaj tasarım uygulamalarında kullanılabilirliği için gerekli olan kriterler literatür taramaları ve uzman görüşleri yardımıyla belirlenmiştir. Kriterlerin belirlenmesinde peyzaj mimarlığı meslek disiplini alanında en az 5 yıllık tecrübeye sahip ve Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı'nda geofitler üzerine çalışmaları olan akademisyenlerden oluşan toplamda 4 uzman görüşü alınmıştır. Belirlenen kriterler şu şekildedir;

Gösterişli Çiçek: Süs bitkileri genel tanım olarak çiçek, yaprak, gövde gibi organları ile estetik olarak etkili olan türlerdir. Dolayısıyla peyzaj çalışmalarında kullanılması düşünülen geofit türlerinin peyzaj tasarımlarının görsel etkisini sağlayabilmesi açısından güçlü bir estetiğe sahip olması gerekmektedir. Çiçek gibi organların gösterişli yapısı da peyzaj çalışmalarında bitki materyallerini öne çıkaran önemli bir özelliktir.

Farklı Bitki Türleri ile Uyumlu Kullanılabilmesi: Peyzaj uygulamalarında bitkisel tasarımlar soliter kullanımlardan çok genel olarak farklı türlerin kombinasyonu ve birlikte kullanımları ile oluşturulmaktadır. Dolayısı ile bu bitkilerin de yer örtücüler veya tek yıllık çiçekler gibi farklı bitki türleri ile birlikte kullanılabilir olmaları gerekmektedir.

Gösterişli Yaprak: Yaprakların da güçlü görsel etkiye sahip olması tıpkı gösterişli çiçek kriterinde olduğu gibi doğal olarak yetişen geofit türlerinin de peyzaj çalışmalarında kullanılabilmesi için sahip olması gereken bir kriterdir.

Çiçeklenme Süresi Uzunluğu: Bu sürenin uzun olması bitkilerin görsel ve hoş kokularının etkilerinin peyzaj kalitesi üzerinde uzun vadeli olumlu etki sağlar. Peyzaj kalitesinin en önemli noktası, peyzaj tasarımlarının büyük çoğunluğunu oluşturan bitki materyalleridir.

Refüj ve Yol Kenarlarında Kullanılabilirliği: Bitkilerin peyzaj çalışmalarında kısıtlı alanlarda ve bazı ekstrem, zorlayıcı dış koşullara karşı toleranslı olması gerekmektedir. Bundan dolayı seçilecek bitkilerin refüj ve yol kenarları gibi kısıtlı

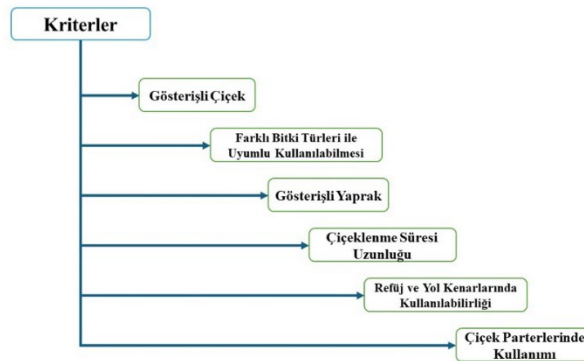
alanlarda ve zorlayıcı çevre koşullarına toleranslı olması gerekmektedir.

Çiçek Parterlerinde Kullanımı: Geofit bitkiler çiçek parterlerinde gösterişli yapılarından kaynaklı olarak çiçek yastıklarında ve ayrılmış alanlarda kullanılan etkili bitkilerdir. Dolayısıyla doğal olarak yetişen ve henüz süs bitkisi niteliği olmayan geofit türlerin de hali hazırdaki türler gibi çiçek parterlerinde kullanılabilir olması gerekmektedir (Seyidoğlu, 2009; Kılıçaslan ve Dönmez, 2016; Tanrıverdi O, 2019; Bozkurt, 2021; Erduran Nemutlu ve Çelik Çanga, 2021; Öztürk Tel ve Akan, 2021).

3.1. AHP Yönteminin Uygulanması

Kriterlerin belirlenmesinin ardından AHP yönteminin uygulanması aşamasına geçilmiştir. AHP yönteminin 1. adımında problemin tanımlanması, problem yapısının ve kriterlerin hiyerarşik yapısının oluşturulması gelmektedir. Buna göre problem tanımı, çalışmanın amacı olan Çanakkale ili florasında doğal olarak yetişen bazı geofitlerin süs bitkisi olarak kullanılabilirliği olarak tanımlanmıştır. Daha sonra literatür taraması ve uzman görüşleriyle belirlenen kriterlerin de hiyerarşik yapısı oluşturulmuştur. Kriterlerin hiyerarşik yapısı Şekil 3'te belirtilmiştir.

AHP yönteminin ilk aşaması tamamlanıp problem tanımının yapılması ve kriterlerin hiyerarşik yapısının oluşturulmasından sonra ikinci aşamaya geçilmiştir. Buna göre kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. İkinci aşamada da 10 farklı uzmanın görüşü alınmış ve bu görüşlerin geometrik ortalaması alınarak ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Kriterler ikili karşılaştırma matrisinde daha kolay anlaşılabilmesi için kodlanarak belirtilmiştir. Buna göre; gösterişli çiçek kriteri "K1", farklı bitki türleri ile uyumlu kullanılabilmesi "K2", gösterişli yaprak "K3", çiçeklenme süresi uzunluğu "K4", refüj ve yol kenarlarında kullanılabilirliği "K5", çiçek parterlerinde kullanımı ise "K6" olarak kodlanmıştır. İkili karşılaştırma matrisi Tablo 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Kriterlerin hiyerarşik yapısı

Tablo 3. İkili karşılaştırma matrisi

Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	1,00	5,00	3,00	3,00	5,00	6,00
K2	0,20	1,00	0,25	0,33	4,00	4,00
K3	0,33	4,00	1,00	3,00	4,00	5,00
K4	0,33	3,00	0,33	1,00	4,00	4,00
K5	0,20	0,25	0,25	0,25	1,00	3,00
K6	0,17	0,25	0,20	0,25	0,33	1,00
TOPLAM	2,23	13,50	5,03	7,83	18,33	23,00

İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulduğu ikinci aşamanın tamamlanmasının ardından üçüncü aşamaya geçilmiştir. Bu aşamada Tablo 3'deki değerler normalize

edilmiştir. Normalize ikili karşılaştırma matrisi Tablo 4'te belirtilmiştir.

Tablo 4. Normalize ikili karşılaştırma matrisi

Kriterler	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	0,448564593	0,370370370	0,596421471	0,383141762	0,272776869	0,260869565
K2	0,089712919	0,074074074	0,049701789	0,042145594	0,218221495	0,173913043
K3	0,149521531	0,296296296	0,198807157	0,383141762	0,218221495	0,217391304
K4	0,148026316	0,222222222	0,065606362	0,127713921	0,218221495	0,173913043
K5	0,089712919	0,018518519	0,049701789	0,031928480	0,054555374	0,130434783
K6	0,074461722	0,018518519	0,039761431	0,031928480	0,018003273	0,043478261

Normalize ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulmasından sonra AHP yönteminin dördüncü ve son aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada her bir kriterin özvektör ağırlıkları

hesaplanmıştır. Kriterlerin özvektör ağırlıkları Tablo 5'te belirtilmiştir.

Tablo 5. Kriterlerin özvektör ağırlıkları

Kriterler	Özvektör Ağırlıkları
K1	0,388690772
K2	0,107961486
K3	0,243896591
K4	0,159283893
K5	0,062475310
K6	0,037691948

Kriterlerin özvektör ağırlıklarının hesaplanmasıyla birlikte tutarlılık analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda tutarlılık oranının 0,1'den küçük (0,099784476) olduğu başka bir deyişle kriter karşılaştırmalarının mantıklı ve makul olduğu belirlenmiştir. AHP yöntemi aşamalarının tamamlanmasının ardından TOPSIS yönteminin uygulamasına geçilmiştir.

3.2. TOPSIS Yönteminin Uygulanması

TOPSIS yönteminin birinci aşamasında karar matrisi oluşturulmuştur. Tüm bitki alternatifleri kriterler bazında hesaplamaların da kolay yapılabilmesi adına 1-10 arasında

puanlanmıştır. TOPSIS yönteminin birinci aşamasında bitkilerin puanlamasında seçim kriterlerinin belirlenmesinde görüşleri alınan uzmanların tekrar görüşleri alınmıştır. Bitki sayısındaki fazlalıktan dolayı Tablo 6-8 kısaltılarak gösterilmiştir. Oluşturulan karar matrisi Tablo 5'te belirtilmiştir.

Standart karar matrisi yapısının oluşturulmasından sonra bir sonraki aşamada standart karar matrisi yapısı oluşturulmuştur. Standart karar matrisi yapısı Tablo 7'de belirtilmiştir.

Tablo 6. Karar matrisi

Bitki Alternatifleri	Kriterler					
	K1	K2	K3	K4	K5	K6
<i>Allium amethystinum</i> Tausch	7	5	3	5	4	7
<i>Allium cyrilli</i> Ten.	4	5	3	5	5	4
<i>Allium flavum</i> L.	4	7	5	7	5	7
<i>Allium guttatum</i> Steven	3	5	3	7	5	4
.
.
<i>Crocus flavus</i> Weston	9	8	3	4	8	8
<i>Crocus gargaricus</i> Herb.	9	7	2	5	8	8
<i>Crocus pulchellus</i> Herb.	8	6	2	9	5	7
<i>Cyclamen hederifolium</i> Aiton	8	8	10	8	6	9
.

Tablo 6. Karar matrisi (devam)

<i>Iris suaveolens</i> Boiss. & Reut.	9	7	6	4	7	9
<i>Iris unguicularis</i> Poir.	8	8	6	4	8	8
<i>Muscari bourgaei</i> Baker	9	6	2	5	5	8
<i>Muscari comosum</i> (L.) Mill.	8	7	3	6	6	9
.
<i>Ranunculus ficaria</i> L.	7	8	8	3	8	9
<i>Romulea linaresii</i> Park.	7	5	2	4	3	5
<i>Scilla bifolia</i> L.	9	8	3	5	7	10
<i>Sternbergia lutea</i> (L.) Ker Gawl. ex Spreng.	9	8	7	9	7	10
.
<i>Tulipa agenensis</i> DC.	9	7	5	4	5	8
<i>Tulipa orphanidea</i> Boiss. ex Heldr.	8	6	5	5	6	9
<i>Tulipa sylvestris</i> L.	8	8	4	5	7	10
<i>Valeriana dioscoridis</i> Sm.	4	4	1	3	5	7

Tablo 7. Standart karar matrisi

Bitki Alternatifleri	Kriterler					
	K1	K2	K3	K4	K5	K6
<i>Allium amethystinum</i> Tausch	0,132977994	0,100220729	0,082823645	0,125550490	0,092872692	0,128532356
<i>Allium cyrilli</i> Ten.	0,075987425	0,100220729	0,082823645	0,125550490	0,116090865	0,073447060
<i>Allium flavum</i> L.	0,075987425	0,140309020	0,138039408	0,175770686	0,116090865	0,128532356
<i>Allium guttatum</i> Steven	0,056990569	0,100220729	0,082823645	0,175770686	0,116090865	0,073447060
.
<i>Crocus flavus</i> Weston	0,170971707	0,160353166	0,082823645	0,100440392	0,185745384	0,146894121
<i>Crocus gargaricus</i> Herb.	0,170971707	0,140309020	0,055215763	0,125550490	0,185745384	0,146894121
<i>Crocus pulchellus</i> Herb.	0,151974850	0,120264874	0,055215763	0,225990882	0,116090865	0,128532356
<i>Cyclamen hederifolium</i> Aiton	0,151974850	0,160353166	0,276078815	0,200880784	0,139309038	0,165255886
.
<i>Iris suaveolens</i> Boiss. & Reut.	0,170971707	0,140309020	0,165647289	0,100440392	0,162527211	0,165255886
<i>Iris unguicularis</i> Poir.	0,153336634	0,160353166	0,165647289	0,100440392	0,185745384	0,146894121
<i>Muscari bourgaei</i> Baker	0,170971707	0,120264874	0,055215763	0,125550490	0,116090865	0,146894121
<i>Muscari comosum</i> (L.) Mill.	0,151974850	0,140309020	0,082823645	0,150660588	0,139309038	0,165255886
.
<i>Ranunculus ficaria</i> L.	0,132977994	0,160353166	0,220863052	0,075330294	0,185745384	0,165255886
<i>Romulea linaresii</i> Park.	0,132977994	0,100220729	0,055215763	0,100440392	0,069654519	0,091808825
<i>Scilla bifolia</i> L.	0,170971707	0,160353166	0,082823645	0,125550490	0,162527211	0,183617651
<i>Sternbergia lutea</i> (L.) Ker Gawl. ex Spreng.	0,170971707	0,160353166	0,193255171	0,225990882	0,162527211	0,183617651
.
<i>Tulipa agenensis</i> DC.	0,170971707	0,140309020	0,138039408	0,100440392	0,116090865	0,146894121
<i>Tulipa orphanidea</i> Boiss. ex Heldr.	0,151974850	0,120264874	0,138039408	0,125550490	0,139309038	0,165255886
<i>Tulipa sylvestris</i> L.	0,151974850	0,160353166	0,110431526	0,125550490	0,162527211	0,183617651
<i>Valeriana dioscoridis</i> Sm.	0,075987425	0,080176583	0,027607882	0,075330294	0,116090865	0,128532356

Standart karar matrisinin oluşturulmasından sonra ağırlıklandırılmış standart karar matrisi yapısı oluşturulmuştur. Bu aşamada AHP yönetiminden elde

edilen kriter ağırlıkları kullanılmıştır. Ağırlıklandırılmış standart karar matrisi Tablo 8'de belirtilmiştir.

Tablo 8. Ağırlıklandırılmış standart karar matrisi

Bitki Alternatifleri	Kriterler					
	0,388690772	0,107961486	0,243896591	0,159283893	0,062475331	0,037691948
	K1	K2	K3	K4	K5	K6
<i>Allium amethystinum</i> Tausch	5,168731913	1,081997880	2,020040456	1,999817085	0,580225218	0,484463486
<i>Allium cyrilli</i> Ten.	2,953561093	1,081997880	2,020040456	1,999817085	0,725281522	0,276836278
<i>Allium flavum</i> L.	2,953561093	1,514797031	3,366734094	2,799743919	0,725281522	0,484463486
<i>Allium guttatum</i> Steven	2,215170820	1,081997880	2,020040456	2,799743919	0,725281522	0,276836278
·	·	·	·	·	·	·
<i>Crocus flavus</i> Weston	6,645512460	1,731196607	2,020040456	1,599853668	1,160450435	0,553672556
<i>Crocus gargaricus</i> Herb.	6,645512460	1,514797031	1,346693637	1,999817085	1,160450435	0,553672556
<i>Crocus pulchellus</i> Herb.	5,907122187	1,298397455	1,346693637	3,599670754	0,725281522	0,484463486
<i>Cyclamen hederifolium</i> Aiton	5,907122187	1,731196607	6,733468187	3,199707337	0,870337826	0,622881625
·	·	·	·	·	·	·
<i>Iris suaveolens</i> Boiss. & Reut.	6,645512460	1,514797031	4,040080912	1,599853668	1,015394131	0,622881625
<i>Iris unguicularis</i> Poir.	5,907122187	1,731196607	4,040080912	1,599853668	1,160450435	0,553672556
<i>Muscari bourgaei</i> Baker	6,645512460	1,298397455	1,346693637	1,999817085	0,725281522	0,553672556
<i>Muscari comosum</i> (L.) Mill.	5,907122187	1,514797031	2,020040456	2,399780502	0,870337826	0,622881625
·	·	·	·	·	·	·
<i>Ranunculus ficaria</i> L.	5,168731913	1,731196607	5,386774550	1,199890251	1,160450435	0,622881625
<i>Romulea linarioides</i> Park.	5,168731913	1,081997880	1,346693637	1,599853668	0,435168913	0,346045347
<i>Scilla bifolia</i> L.	6,645512460	1,731196607	2,020040456	1,999817085	1,015394131	0,692090694
<i>Sternbergia lutea</i> (L.) Ker Gawl. ex Spreng.	6,645512460	1,731196607	4,713427731	3,599670754	1,015394131	0,692090694
·	·	·	·	·	·	·
<i>Tulipa agenensis</i> DC.	6,645512460	1,514797031	3,366734094	1,599853668	0,725281522	0,553672556
<i>Tulipa orphanidea</i> Boiss. ex Heldr.	5,907122187	1,298397455	3,366734094	1,999817085	0,870337826	0,622881625
<i>Tulipa sylvestris</i> L.	5,907122187	1,731196607	2,693387275	1,999817085	1,015394131	0,692090694
<i>Valeriana dioscoridis</i> Sm.	2,953561093	0,865598304	0,673346819	1,199890251	0,725281522	0,484463486

Ağırlıklandırılmış standart karar matrisi yapısı kullanılarak negatif ideal ve pozitif ideal çözüm noktaları

oluşturulmuştur. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm noktaları Tablo 9'da belirtilmiştir.

Tablo 9. Pozitif ideal ve negatif ideal çözüm noktaları

Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Çözüm Noktaları						
Pozitif İdeal	6,64551246	1,947596183	6,733468187	3,599670754	1,160450435	0,692090694
Negatif İdeal	2,21517082	0,649198728	0,673346819	0,799926834	0,435168913	0,207627208

TOPSIS yönteminin son aşaması olarak Çanakkale ili florasında doğal olarak yetişen geofit bitki türü alternatifleri, süs bitkisi olarak kullanıma uygunluğuna göre

sıralanmıştır. Tablo 10'da alternatifler arasında en uygun olandan en uygun olmayana göre sıralanmıştır.

Tablo 10. Bitkilerin sıralaması

İdeal Çözüme Göreli Yakınlık	
<i>Cyclamen hederifolium</i> Aiton	0,892234003
<i>Doronicum orientale</i> Hoffm.	0,783152154
<i>Sternbergia lutea</i> (L.) Ker Gawl. ex Spreng.	0,768138432
<i>Anemone blanda</i> (Schott & Kotschy) Holub	0,747140608
<i>Muscari latifolium</i> J.Kirk	0,707916661
<i>Dracunculus vulgaris</i> Schott	0,690182935
<i>Iris kerneriana</i> Asch. & Sint. ex Baker	0,661507621
<i>Ornithogalum nutans</i> L.	0,658544858
<i>Ranunculus ficaria</i> L.	0,647104859
<i>Geranium asphodeloides</i> Burm.f.	0,637315008
<i>Iris suaveolens</i> Boiss. & Reut.	0,628647403
<i>Iris unguicularis</i> Poir.	0,603215306
<i>Anemone coronaria</i> L.	0,602867265
<i>Tulipa agenensis</i> DC.	0,573643813
<i>Tulipa orphanidea</i> Boiss. ex Heldr.	0,554218044

Tablo 10. Bitkilerin sıralaması (devam)

İdeal Çözüme Göreli Yakınlık	
<i>Galanthus trojanus</i> A.P.Davis & Özhatay	0,545774010
<i>Corydalis integra</i> Barbey & Fors.-Major	0,531162816
<i>Tulipa sylvestris</i> L.	0,508656295
<i>Galanthus gracilis</i> Çelak.	0,507453048
<i>Muscari neglectum</i> Guss. ex Ten.	0,501551665
<i>Dactylorhiza saccifera</i> (Brongn.) Soó	0,499978336
<i>Scilla bifolia</i> L.	0,498885771
<i>Crocus flavus</i> Weston	0,488117120
<i>Allium orientale</i> Boiss.	0,478612669
<i>Muscari comosum</i> (L.) Mill.	0,469126519
<i>Crocus pulchellus</i> Herb.	0,463233650
<i>Crocus gargaricus</i> Herb.	0,459203061
<i>Muscari bourgaei</i> Baker	0,453323409
<i>Ornithogalum sigmoideum</i> Freyn & Sint.	0,453275421
<i>Crocus biflorus</i> Mill.	0,442415531
<i>Colchicum boissieri</i> Orph.	0,433359468
<i>Colchicum bivonae</i> Guss.	0,412919000
<i>Allium flavum</i> L.	0,411351873
<i>Orchis provincialis</i> Balb. ex Lam. & DC.	0,408866678
<i>Crocus candidus</i> Boiss.	0,407655796
<i>Allium amethystinum</i> Tausch	0,397860689
<i>Allium scorodoprasum</i> L.	0,396733093
<i>Orchis laxiflora</i> Lam.	0,352013648
<i>Ornithogalum wiedemannii</i> Boiss.	0,347447945
<i>Allium sibthorpiatum</i> Schult. & Schult.f.	0,346298643
<i>Prospero autumnale</i> (L.) Speta	0,344025245
<i>Romulea linaresii</i> Park.	0,343560562
<i>Crocus demirzianus</i> Erol & Can	0,335971754
<i>Colchicum turcicum</i> Janka	0,332286891
<i>Centaurea pichleri</i> Boiss.	0,282385268
<i>Fritillaria bithynica</i> Baker	0,280375467
<i>Allium kurtzianum</i> Asch. & Sint. ex Kollmann	0,278274391
<i>Gagea peduncularis</i> (C.Presl) Pascher	0,277473833
<i>Gagea pratensis</i> (Pers.) Dumort.	0,275859166
<i>Allium guttatum</i> Steven	0,272054761
<i>Asphodelus aestivus</i> Brot.	0,270422325
<i>Gagea bohemica</i> Schult.f.	0,268999420
<i>Gagea bithynica</i> Pasch.	0,245201053
<i>Allium cyrilli</i> Ten.	0,243062934
<i>Cephalanthera longifolia</i> (L.) Fritsch	0,221002031
<i>Bellevalia dubia</i> (Guss.) Schult. & Schult.f.	0,183448818
<i>Cephalanthera epipactoides</i> Fisch. & C.A.Mey.	0,140796056
<i>Valeriana dioscoridis</i> Sm.	0,111882682

Tablo 10'a göre Çanakkale ili florasında doğal olarak yetişen geofit türleri içerisinde süs bitkisi olarak kullanılabilir en uygun tür *C. hederifolium*'dur. En uygun olmayan tür ise *V. dioscoridis*'dir.

3.3. Duyarlılık Analizinin Yapılması

Çalışma yönteminin bu aşamasında duyarlılık analizi yapılmıştır. TOPSIS yönteminde AHP yönteminden elde edilen kriter ağırlıkları oldukça etkilidir. Bu aşamada ise kriter ağırlıklarında oransal değişiklikler yapılarak en ideal

olarak belirlenen 5 bitki türünün sıralamasındaki değişiklikler gözlemlenmiştir. Duyarlılık analizinde Hamurcu ve Eren (2020)'nin çalışmalarındaki senaryolar kullanılmıştır. Buna göre 19 farklı durum oluşturulmuştur. İlk 18 durum; 0,25, 0,50, 0,75 olmak üzere artış oranları kullanılmıştır. 19. durumda tüm kriterlerin ağırlık değerleri dikkate alınmamış ve hesaplamalar, kriter ağırlıklarının 1 olduğu varsayımıyla yapılmıştır. Duyarlılık analizi aşamasındaki 19 durum Tablo 11'da belirtilmiştir.

Tablo 11. Duyarlılık analizi durumları

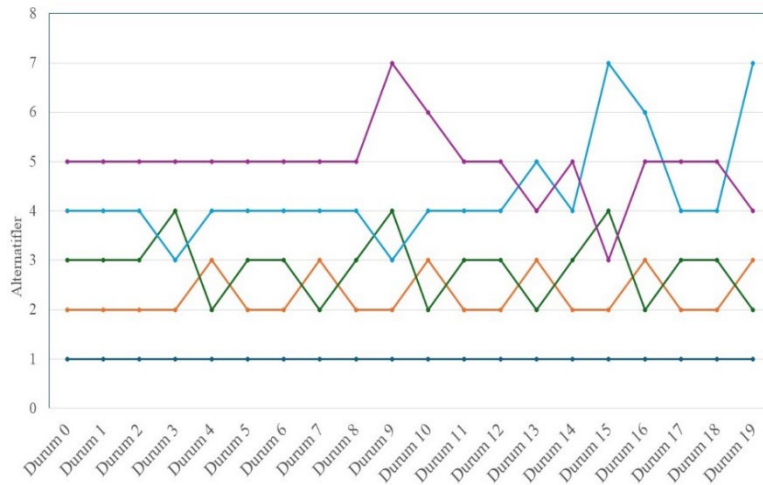
Durumlar	Kriter Ağırlıkları	Değişim Katsayısı	Yeni Kriter Ağırlıkları
Durum 1	0,388690772=K1	0,388690772 x 1.25	0,48586346500
Durum 2	0,107961486=K2	0,107961486 x 1.25	0,13495185750
Durum 3	0,243896591=K3	0,243896591 x 1.25	0,30487073875
Durum 4	0,159283893=K4	0,159283893 x 1.25	0,19910486625

Tablo 11. Duyarlılık analizi durumları (devam)

Durumlar	Kriter Ağırlıkları	Değişim Katsayısı	Yeni Kriter Ağırlıkları
Durum 5	0,062475331=K5	0,062475331 x 1.25	0,07809416375
Durum 6	0,037691948=K6	0,037691948 x 1.25	0,04711493500
Durum 7	0,388690772=K1	0,388690772 x 1.50	0,58303615800
Durum 8	0,107961486=K2	0,107961486 x 1.50	0,16194172290
Durum 9	0,243896591=K3	0,243896591 x 1.50	0,36584488650
Durum 10	0,159283893=K4	0,159283893 x 1.50	0,23892583950
Durum 11	0,062475331=K5	0,062475331 x 1.50	0,09371299650
Durum 12	0,037691948=K6	0,037691948 x 1.50	0,05653792200
Durum 13	0,388690772=K1	0,388690772 x 1.75	0,68020885100
Durum 14	0,107961486=K2	0,107961486 x 1.75	0,18893201005
Durum 15	0,243896591=K3	0,243896591 x 1.75	0,42681903425
Durum 16	0,159283893=K4	0,159283893 x 1.75	0,27874681275
Durum 17	0,062475331=K5	0,062475331 x 1.75	0,10933182925
Durum 18	0,037691948=K6	0,037691948 x 1.75	0,06596090900
Durum 19	0,388690772=K1	Tüm Kriterlerin Eşit Katsayılarında Olduğu Durum	1
	0,107961486=K2		1
	0,243896591=K3		1
	0,159283893=K4		1
	0,062475331=K5		1
	0,037691948=K6		1

Tablo 11’de belirtildiği üzere duyarlılık analizinde kriter ağırlık kat sayıları 0,25, 0,50, ve 0,75 oranlarda artırılmıştır. Her durumda, ağırlık katsayılarının belirtilen değerlerde arttığı sadece bir kriter seçilmiştir. 19. Durumda TOPSIS yöntemindeki ağırlıkların tamamında kriter katsayıları için

1 yazılmıştır. Duyarlılık analizi sonucunda 19 durumun alternatiflerin sıralamaları üzerindeki değişim Şekil 4’te belirtilmiştir.



Şekil 4. Alternatiflerin sıralamasında 19 durumda oluşan değişimleri

Duyarlılık analizi sonucunda, 19 durumun 14’ünde kriterlere farklı ağırlıklar vermenin alternatiflerin sıralamasında önemli bir değişikliğe neden olmadığı görülmüştür. Sadece normal sıralamada (Durum 0) 5. sırada yer alan *M. latifolium* türü Durum 9, Durum 10, Durum 15, Durum 16 ve Durum 19’da ideal 5 bitki içerisindeki yerini koruyamamıştır. *M. latifolium* türünün sıralamadaki değişimleri dışında diğer 14 durumda tatmin edici bir sıralama yakınlığı söz konusudur ve önerilen AHP-TOPSIS alternatif sıralamalarının güvenilir olduğu belirlenmiştir. Gür (2021), çalışmada İzmir yöresinde doğal olarak yetişen türler içerisinde dikey bahçe sistemlerinde kullanılabilecek en uygun türü belirlemede AHP ve TOPSIS yöntemini kullanmıştır. Çalışmada İzmir yöresinde doğal olarak yetişen ve süs bitkisi olarak

kullanılabilme potansiyeline sahip türleri literatür taramaları ile belirlemiş daha sonra AHP ve TOPSIS yöntemlerini uygulamıştır. En uygun türün *L. stoechas* türü olduğunu belirledikten sonra bu türü dikey bahçe sistemleri üzerinde denemiş ve bitkinin sistemlerde uyumlu şekilde yetiştiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada Çanakkale florasında doğal olarak yetişen geofit bitki türleri içerisinde süs bitkisi olarak kullanılabilir potansiyelli türleri belirlemek için benzer iki yöntem kullanılmıştır. AHP ve TOPSIS yöntemleri karmaşık seçim aşamalarında ve alternatif sayısının fazla olduğu durumlarda ideali belirlemede oldukça etkilidir. Gür (2021)’ün çalışmada da bu seçim modellerinin verdiği sonucun sağlaması yapıldığında modellerin doğru sonuç verdiği görülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmadan elde edilen sonuçlarda ideal

olduğu belirlenen 5 türün süs bitkisi olarak kullanılabilceği öngörülebilir.

4. SONUÇLAR

Günümüzde süs bitkisi yetiştiriciliğinde çeşitli yenilikler, geliştirme çalışmalarının yanında yeni türlerin de süs bitkisi olarak kullanılabilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle Türkiye gibi geniş bir doğal bitki rezervine sahip ülkelerde bu tarz çalışmaların yapılması biyoçeşitliliğin korunması ve sürdürülebilir olması açısından önem kazanmıştır. Bu çalışmada Çanakkale ili florasında doğal olarak yetişen bazı geofit türlerinin süs bitkisi olarak kullanılabilme olanaklarını değerlendirmek için AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Çanakkale ili florasında doğal olarak yetişen bazı geofit türleri içerisinde 58 bitki türü literatür taramaları sonucunda belirlenmiş ve listelenmiştir. Daha sonrasında bu türler içerisinde süs bitkisi olarak kullanılabilcek en ideal 5 bitki türü AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Yöntemler sonucunda belirlenen 5 tür en ideal olandan başlanarak; *C. hederifolium*, *D. orientale*, *S. lutea*, *A. blanda*, *M. latifolium* olarak belirlenmiştir. İdeal noktaya en uzak olan türün ise *V. dioscoridis* olduğu tespit edilmiştir. Tüm işlemlerin ardından AHP ve TOPSIS yöntemlerinin sonuçlarının güvenilirliğini ölçmek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizi sonucunda sıralamalarda önemli değişiklikler olmadı ve AHP-TOPSIS yöntemlerinin sonuçlarının güvenilir olduğu tespit edilmiştir. Süs bitkisi olarak kullanılabilme potansiyeline sahip bu beş bitkinin de en dikkat çeken özelliği, çiçek parterlerinde kullanıma yönelik yüksek potansiyel taşımasıdır. *C. hederifolium*, *A. blanda* ve *D. orientale* gösterişli yapraklarıyla öne çıkarken *S. lutea* ve *M. latifolium* çiçek yapıları ile dikkat çekmektedir. Doğal bitki türlerinin peyzaj çalışmalarında

kullanımı biyoçeşitliliğin korunması ve kurakçıl peyzaj açısından önemli çevresel katkılar sağlamaktadır. Dolayısıyla bu tarz doğal bitki türlerinin kullanımı ekseriyetle teşvik edilmelidir. Ayrıca bu bitkiler sahip oldukları gösteriş özellikleri ile de yöre halkının süs bitkisi yetiştiriciliği ve satışına olanak sunarak istihdam ve gelir kaynağı sağlayabilir. Tüm bu sonuçlarla beraber süs bitkisi olarak kullanıma uygun olduğu kantitatif olarak belirlenen türlerin fidanlık, saksıda kullanımı ve açık alanlarda kullanım olanaklarının deneysel olarak gözlemlene çalışmalarının yapılması literatüre katkı sağlayacaktır.

Yazar Katkıları

Necmettin GÜR: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntemi, (c) Literatür Taraması, (e) Malzeme, Kaynak Sağlama, (f) Veri Toplama, İşleme, (g) Analiz, Yorum (h) Metin Yazma

Özgür KAHRAMAN: (a) Fikir, (b) Çalışma Tasarısı, Yöntemi, (d) Danışmanlık, (g) Analiz, Yorum, (h) Metin Yazma, (i) Eleştirel İnceleme

Etik Beyanı

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

KAYNAKLAR

- Arslan, E. (2008). *Çanakkale florasındaki bazı tıbbi ve aromatik bitkilerin antioksidan aktivitesinin belirlenmesi*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.
- Avcu, C. (2011). *Katran Dağı (Çanakkale/Bayramiç) ve çevresindeki geofit bitkiler üzerinde morfolojik ve ekolojik çalışmalar*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi] Balıkesir Üniversitesi.
- Avcu, C., Selvi, S., & Satıl, F. (2016). Katran Dağı (Bayramiç/Çanakkale) ve çevresinde yayılış gösteren geofit bitkiler ve ekolojik özellikleri. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(3), 9-16.
- Balos, M. M., Akan, H., & Geçit, M. (2022). Mardin (Türkiye) Geofitleri üzerine etnobotanik bir araştırma. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 25(6), 1287-1304. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdogu.vi.976110>
- Bozkurt, S. G. (2021). Sivas’ da doğal olarak yetişen bazı odunsu ve çalı türlerinin peyzaj mimarlığında kullanım olanaklarının belirlenmesi. *Eurasian Journal of Forest Science*, 9(3), 79-91. <https://doi.org/10.31195/ejejfs.969214>
- Bozyel, M. E. (2017). *Çanakkale ili Orchidaceae taksonları generatif yapılarının mikromorfolojik özellikleri ile bitki-toprak ilişkilerinin belirlenmesi*. [Yayımlanmamış Doktora Tezi] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.
- Chen, P. (2019). Effects of normalization on the entropy-based TOPSIS method. *Expert Systems with Applications*, 136, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.06.035>
- Costa, D. S., Mamede, H. S., & da Silva, M. M. (2023). A method for selecting processes for automation with AHP and TOPSIS. *Heliyon*, 9(3), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13683>
- Çelik, A. N. (2011). Review of Turkey's current energy status: A case study for wind energy potential of Çanakkale province. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2743-2749. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.017>

- Erduran Nemutlu, F., & Çelik Çanga A. (2021). Bazı geofitlerin peyzaj mimarlığı tasarımlarında kullanım olanakları. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 35(2), 377-387.
- Eren, T., Cihan, Ş., Ayan, E., Topal, T., & Yıldırım, E. K. (2017). Çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile ekokardiyografi cihazı seçiminin yapılması. *Sağlık Bilimleri ve Meslekleri Dergisi*, 4(1), 41-49. <https://doi.org/10.17681/hsp.285651>
- Eroğlu, E., & Acar, C. (2009). Trabzon ve yakın çevresi bazı yayla alanlarındaki Alpin bitkiler ve peyzaj mimarlığı çalışmalarında kullanım potansiyelleri. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 5(1), 42-59.
- Güler, N. (2005). *Kaz Dağları'nda yetişen Orchidaceae familyası bitkileri üzerinde morfolojik ve korolojik araştırmalar*. [Yayımlanmamış Doktora Tezi] Trakya Üniversitesi.
- Günay, M. (2022). *Karadağ Florası (Çan/Çanakkale)*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi] Gazi Üniversitesi.
- Gür, N. (2021). *İzmir Yöresindeki Bazı Doğal Bitki Türlerinin Dikey Bahçe Sistemlerinde Kullanım Olanakları*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.
- Gür, N., & Erduran Nemutlu, F. (2022). İzmir-Urla Bölgesindeki Dış Mekân Süs Bitkisi İşletmelerinin Değerlendirilmesi. *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 10(2), 312-321. <https://doi.org/10.33202/comuagri.1140524>
- Gür, N., & Kahraman, Ö. (2022). Determination of Use of Some Natural Plant Species in Vertical Garden Systems in İzmir Region. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 18(2), 226-246.
- Gür, N., & Kahraman, Ö. (2023). Plant Species Selection for Vertical Garden Systems with Multi-Criteria Decision Making Techniques. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(2), 446-462. <https://doi.org/10.29137/umagd.1146322>
- Gürbüz, O. (2019). *Sarıçay Havzası (Çanakkale) florası*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.
- Hamurcu, M., & Eren, T. (2020). Electric bus selection with multicriteria decision analysis for green transportation. *Sustainability*, 12(7), 2777. <https://doi.org/10.3390/su12072777>
- Hu, J., Wang, Y., Li, X., Xin, S., Gong, Q., Zhang, Y., & Wen, H. (2024). Assessing supply security risk of renewable-dominated power system via entropy-based analytic hierarchy method. *IET Renewable Power Generation*, 18(9), 1-14. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12989>
- Karabacak, E. (2002). *Ağrı Dağı (B1, Çanakkale) ve çevresinin florası*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi] Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.
- Kibria, A. S., Seekamp, E., Xiao, X., Dalyander, S., & Eaton, M. (2024). Multi-criteria decision approach for climate adaptation of cultural resources along the Atlantic coast of the southeastern United States: Application of AHP method. *Climate Risk Management*, 43, 100587. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100587>
- Kılıçaslan, N., & Dönmez, Ş. (2016). Göller bölgesinde doğal olarak yetişen soğanlı bitkilerin peyzaj mimarlığında kullanımı. *Türkiye Ormancılık Dergisi*, 17(1), 73-82.
- Li, P., Qian, H., Wu, J., & Chen, J. (2013). Sensitivity analysis of TOPSIS method in water quality assessment: I. Sensitivity to the parameter weights. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 2453-2461. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2723-9>
- Mutlu, B. (2011). Plant wildlife and threatened vascular flora of Truva Troy National Park, Turkey. *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry*, 39(1), 45-50.
- Öztürk Tel, H., & Akan, H. (2021). Şanlıurfa (Harran Üniversitesi Osmanbey Kampüsü)'da doğal yayılış gösteren bazı geofitlerin özellikleri ve peyzaj mimarlığında kullanımları. *Turkish Journal of Forest Science*, 5(2), 366-381. <https://doi.org/10.32328/turkjforsci.903412>
- Pamuçar, D. S., Božanić, D., & Ranđelović, A. (2017). Multi-criteria decision making: An example of sensitivity analysis. *Serbian Journal of Management*, 12(1), 1-27.
- Radomska-Zalas, A. (2022). The AHP method in the optimization of the epoxidation of allylic alcohols. *Procedia Computer Science*, 207, 456-464. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.09.100>
- Sengupta, D., Das, A., Bera, U. K., & Chen, L. (2023). A sustainable green reverse logistics plan for plastic solid waste management using TOPSIS method. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(43), 97734-97753. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29067-7>
- Seyidoğlu, N. (2009). *Bazı doğal geofitlerin peyzaj düzenlemelerinde kullanımı ve üretimi üzerine araştırmalar*. [Yayımlanmamış Doktora Tezi] İstanbul Üniversitesi.
- Sindhu, S., Nehra, V., & Luthra, S. (2017). Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: Case study of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 496-511. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.135>
- Singh, S., Kawade, S., Dhar, A., & Powar, S. (2022). Analysis of mango drying methods and effect of blanching process based on energy consumption, drying time using multi-criteria decision-making. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100500. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100500>
- Şekeroğlu, N., Aydın, K., Gözüaçık, H. G., & Kulak, M. (2013). Kilis ilinde yetişen geofitler. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, (1), 199-201.
- Tanrıverdi O, D. (2019). *Yalova ili geofitleri ve peyzajda kullanım olanakları*. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi] Bursa Uludağ Üniversitesi.
- Tsaur, R. C. (2011). Decision risk analysis for an interval TOPSIS method. *Applied Mathematics and Computation*, 218(8), 4295-4304. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2011.10.001>
- Uysal, I., Karabacak, E., Seçmen, Ö., & Oldacay, S. (2003). The flora of agricultural areas and their environs in Canakkale (Lapseki-Ezine). *Turkish Journal of Botany*, 27(2), 103-116.

- Uysal, I., Gücel, S., Tütenocaklı, T., & Öztürk, M. (2012). Studies on the medicinal plants of Ayvacık-Çanakkale in Turkey. *Pakistan Journal of Botany*, 44(Supp. 1), 239-244.
- Vivekh, P., Sudhakar, M., Srinivas, M., & Vishwanthkumar, V. (2017). Desalination technology selection using multi-criteria evaluation: TOPSIS and PROMETHEE-2. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12(1), 24-35. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctw001>
- Wang, T. C., Thu Nguyen, T. T., & Phan, B. N. (2022). Analyzing higher education performance by entropy-TOPSIS method: A case study in Vietnam private universities. *Measurement and Control*, 55(5-6), 385-410. <https://doi.org/10.1177/00202940221089504>
- Wątróbski, J., Bączkiewicz, A., & Rudawska, I. (2023). A Strong Sustainability Paradigm based Analytical Hierarchy Process (SSP-AHP) method to evaluate sustainable healthcare systems. *Ecological Indicators*, 154, 110493. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110493>
- Yeşilkaya, M. (2018). Çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile kağıt fabrikası kuruluş yeri seçimi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(4), 31-44. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.521775>

Bağımsız Güç Türbinli Süperkritik Kapalı Bir Çevrimin İncelenmesi

Investigation of a Supercritical Closed Cycle with Independent Power Turbine

Volkan CEYLAN^{1*}, Arif Emre ÖZGÜR²

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Article Info

Research Article

DOI: 10.29048/makufebed.1532250

Corresponding Author

Volkan CEYLAN

Email: volkanceylan87@gmail.com

Article History

Received: 12.08.2024

Revised: 15.10.2024

Accepted: 21.10.2024

Available Online: 26.12.2024

To Cite

Ceylan, V., & Özgür, A. E. (2024). Bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı bir çevrimin incelenmesi. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 15(2), 125-136.
<https://doi.org/10.29048/makufebed.1532250>

ÖZ: Bu çalışmada, termodinamik özellikleriyle ön plana çıkan karbondioksit (CO₂) ile çalışan bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı Brayton çevriminin termodinamik analizi yapılmıştır. Bu amaçla, Brayton güç çevriminin temel prensiplerine dayalı olarak çevrime bağımsız bir güç türbinini eklenmiş ve çevrim parametreleri incelenmiştir. Farklı çevrim parametrelerinde türbin giriş sıcaklık ve basıncı, kompresör basınç oranı, kompresör verimi, yüksek ve alçak (bağımsız) basınçlı türbin veriminin ve kompresör giriş sıcaklıklarının çevrimin enerji-ekserji verimine ve çevrim net gücüne etkileri incelenmiştir. Çevrimin analizi Engineering Equation Solver (EES) adlı bilgisayar programından faydalanılarak çevrimin termodinamik hesaplamaları yapılmıştır. Bununla birlikte çevrimdeki alçak basınçlı (bağımsız) türbinin çevrim üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Türbin parametreleri incelendiğinde alçak basınçlı (bağımsız) türbinin çevrim verimine doğrudan %2,64 etki ettiği tespit edilmiştir. Çevrim parametrelerinde maksimum enerji verimi %20,07 ekserji verimi %39,22 ve çevrim net gücü 306,4 kW olarak hesaplanmıştır. Güç çevrimlerinde, CO₂ türbinlerinin kullanımının sağladığı faydalar ve alçak basınçlı (bağımsız) türbinin çevrime etkileri değerlendirilmiştir. CO₂ türbinleri ile ilgili elde edilebilecek kazanımlar tartışılmıştır. Bağımsız güç türbinini özelinde, süperkritik karbondioksit (S-CO₂) çevrimlerinin performansını inceleyen bir çalışma literatürde mevcut değildir.

Anahtar Kelimeler: Bağımsız güç türbinini, süperkritik çevrim, termodinamik analiz, enerji, ekserji.

ABSTRACT: In this study, thermodynamic analysis of the supercritical closed Brayton cycle with independent power turbine operating with carbon dioxide (CO₂), which stands out with its thermophysical properties, was performed. For this purpose, an independent power turbine was added to the cycle based on the basic principles of the Brayton power cycle and the cycle parameters were examined. The effects of turbine inlet temperature and pressure, compressor pressure ratio, compressor efficiency, high and low (independent) pressure turbine efficiency and compressor inlet temperatures on the energy-exergy efficiency and cycle net power of the cycle were investigated in different cycle parameters. The cycle was analyzed using the computer program called Engineering Equation Solver (EES) and thermodynamic calculations of the cycle were performed. In addition, the effects of the low-pressure (independent) turbine in the cycle on the cycle were evaluated. When the turbine parameters were examined, it was determined that the low-pressure (independent) turbine directly affected the cycle efficiency by 2.64%. In the cycle parameters, the maximum energy efficiency was calculated as 20.07%, the exergy efficiency as 39.22% and the cycle net power as 306.4 kW. In power cycles, the benefits of using CO₂ turbines and the effects of low-pressure (independent) turbines on the cycle were evaluated. The gains that can be obtained from CO₂ turbines were discussed. In the literature, there is no study examining the performance of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) cycles, especially in the case of independent power turbines.

Keywords: Independent power turbine, supercritical cycle, thermodynamic analysis, energy, exergy.

1. GİRİŞ

Günümüzde artan fosil yakıt tüketiminin küresel ısınma, hava kirliliği ve iklim değişikliği gibi ciddi çevresel etkileri nedeniyle, güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile endüstriyel atık ısı gibi alternatif enerji kaynaklarının kullanımı, enerji verimliliğini artırarak fosil yakıt bağımlılığını azaltmada önemli bir rol oynamaktadır (Guo vd., 2022). Bu enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılabilmesi için organik Rankine çevrimi (ORC), Kalina çevrimi ve Brayton çevrimi gibi güç üretim çevrimleri geliştirilmiştir (Xia vd., 2018). CO₂ akışkanlı süperkritik Brayton çevrimi ise modern enerji sistemlerinde devrim niteliğinde bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel gaz türbinleri ve çevrim teknolojilerinin sınırlarını zorlayarak, CO₂'in süperkritik bölgedeki özelliklerinden faydalanır ve enerji dönüşüm süreçlerini daha verimli ve çevre dostu hale getirir. Süperkritik karbondioksitin (S-CO₂) yüksek sıcaklık ve basınçlarda gösterdiği üstün termodinamik performans, özellikle enerji üretimi ve endüstriyel uygulamalarda büyük avantajlar sağlar. CO₂ akışkanı düşük sıcaklık ve basınçlarda (T=30 °C P=7,38 MPa) kritik noktaya ulaşır. Bununla birlikte ozon delme potansiyelinin (ODP) 0, küresel ısınma potansiyeli (GWP) ise 1'dir. Ayrıca toksik, aşındırıcı, yanıcı ve patlayıcı değildir. Bol miktarda stok edilebilir ve makul bir fiyata sahiptir (Chen vd., 2010). Enerji verimliliğini artırma, çevresel etkileri azaltma ve sürdürülebilir enerji çözümleri geliştirme hedefiyle yapılan bu araştırmalar, CO₂ akışkanlı süperkritik Brayton çevrimini geleceğin enerji teknolojileri arasında önemli bir konuma taşımaktadır.

Enerji çözümlerini geliştirme amacıyla Jiang vd. (2023), transkritik CO₂ Brayton çevrimi ve transkritik Rankine çevriminin termal performansını incelemiş ve bu çevrimleri süperkritik Brayton çevrimleriyle karşılaştırmıştır. Çalışma, transkritik Brayton çevriminin enerji verimliliği ve net gücünün daha yüksek olduğunu göstermiştir. Kim vd. (2012) düşük ve yüksek sıcaklıklarda ısı kaynakları kullanan bir transkritik CO₂ güç çevrimi ile süperkritik CO₂ güç çevrimlerini karşılaştırmışlardır. Ding vd. (2015), teorik analizi, transkritik CO₂ güç çevrimlerinin organik akışkanlar (R22, R600, R123, R134a, R12) kullanan güç çevrimlerinden daha yüksek enerji verimliliği sağladığını ortaya koymuştur. Ishiyama vd. (2008), prototip füzyon güç reaktörleri için buhar, helyum ve CO₂ çevrimleri arasında bir karşılaştırma yapmış ve süperkritik CO₂ Brayton çevriminin verimliliği ve türbin kompaktlığı nedeniyle önermiştir. Liu vd. (2019), farklı S-CO₂ Brayton çevrim düzenlerinin karşılaştırmalı modellemesi ve optimizasyonu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Kumar ve Srinivasan (2016), güneş enerjisi üretiminde alt kritik, transkritik ve süperkritik CO₂ koşulları üzerine çalışarak, sıkıştırma işini azaltmak için termal sıkıştırmanın potansiyel avantajlarını ve kısıtlamalarını belirlemiştir. Çalışmaları ayrıca, doymuş hidrokarbonlarla bir karışımda S-CO₂'nin kritik özelliklerini ve ısı değiştiricilerdeki ısı transferi sorunlarını değiştirmek için uygulanabilirliğini araştırmışlar. Mecheri ve Le Moullec (2016), S-CO₂ çevriminin kömürle çalışan elektrik

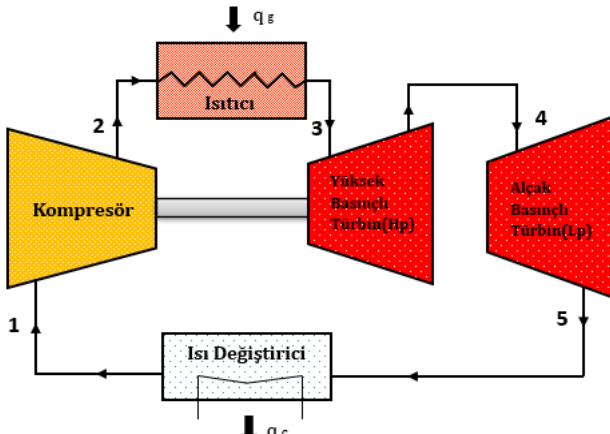
santrallerindeki uygulama performansını incelemişlerdir. Sonuçlar, geleneksel çevrimle karşılaştırıldığında, yeniden sıkıştırma çevriminin verimliliğinin %4,5 arttığını; yeniden ısıtma işlemi olmayan temel çevrimle karşılaştırıldığında, tek bir yeniden ısıtma çevriminin verimliliğinin %1,5 arttığını belirtmişler. Park vd. (2018), S-CO₂ kömürle çalışan elektrik santralini verimliliği ve maliyetini hesaplamıştır. Çalışmasının neticesinde, buharlı Rankine çevrimli elektrik santraliyle karşılaştırıldığında, S-CO₂ kömürle çalışan elektrik üretim sisteminin daha yüksek verimliliğe ve daha düşük maliyete sahip olduğunu belirtmişlerdir. Zhou vd. (2018), S-CO₂ kömür yakıtlı elektrik santrali için her bir bileşenin geri döndürülemez kaybı üzerinde sistem parametrelerinin ve yapısının etkilerini analiz ederek, sistem parametrelerindeki ve yapılarındaki değişikliklerin reküperatör ve soğutucu üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Zhang vd. (2007), bir genleştirici veya türbin yerine gaz keleşi valfi kullanan deneysel sistemleriyle transkritik CO₂ güç çevriminin verimliliğini incelemişler. Pan vd. (2016), bir transkritik CO₂ güç çevrimi kurarak 1,1 kW sabit elektrik gücü elde etmiş ve bu çevrimi motor egzozundan atık ısı geri kazanımında kullanmışlardır. Sun vd. (2012), güneşle sıvılaştırılmış doğal gaz hibrit tahrikli transkritik CO₂ güç çevriminde bir hidrojen üretim sürecinin ekserji analizini ve optimizasyonunu gerçekleştirmişler; bu çevrimde sıvılaştırılmış doğal gaz ile CO₂'i yoğunlaştırmak için yeterli düşük sıcaklığı sağlayabildiklerini belirtmişlerdir. Zhao vd. (2015), basınçlı hava enerji depolama ve transkritik CO₂ güç çevrimini entegre eden hibrit bir sistemi sıvı doğal gaz kullanarak çalıştırmışlardır. Pan vd. (2015), CO₂ bazlı bir karışım kullanan transkritik güç çevrimlerinin, kritik sıcaklığı yükselterek yoğunlaşma sorununu çözebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, soğutma problemini önlemek için yeni bir transkritik CO₂ güç çevrimi olan kendi kendini yoğunlaştıran transkritik CO₂ güç çevrimini önermiş ve bunu düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarıyla teorik bir yaklaşım kullanarak analiz etmişlerdir. Bu yeni çevrim hem düşük hem de yüksek sıcaklıklı ısı kaynakları için uygun olarak geliştirilmiştir. Xia vd. (2018), CO₂ bazlı karışım kullanan transkritik güç çevriminin termodinamik ve termoeconomik performansını incelemişlerdir. Amare vd. (2016), bağımsız güç türbinli çevrimde kompresördeki tahribatları, alçak basınçlı ve yüksek basınçlı güç türbin erozyonunun motora bağlı parametreler üzerindeki etkilerini ayrı ayrı ve birlikte olarak incelemişler. Chen vd. (2023) çalışmalarında enerji santralinde kullanılmak üzere basit Brayton çevrimi, bağımsız güç türbinli açık Brayton çevrimini ve kombine Brayton güç çevrimlerinin karşılaştırarak en verimli çevrimin hangisi olduğunu tespit etmeye çalışmışlardır. Yapılan hesaplamalar neticesinde en yüksek verim %37 ile bağımsız türbinli açık Brayton çevrimi olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada, termofiziksel özellikleriyle ön plana çıkan CO₂ ile çalışan bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı Brayton çevriminin termodinamik analizi yapılmıştır. Bu amaçla, basit Brayton güç çevriminin temel prensiplerine dayalı olarak çevrime bağımsız bir güç türbinini eklenmiş ve

çevrim parametreleri incelenerek literatürdeki süperkritik CO₂ Brayton çevriminden daha verimli bir çevrim elde edilmeye çalışılmıştır. Bağımsız güç türbini özelinde, süperkritik CO₂ çevrimlerinin performansını inceleyen bir çalışma literatürde mevcut değildir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde bağımsız güç türbinli süperkritik karbondioksit (S-CO₂) kapalı çevrimin enerji ve ekserji analizlerinde bilinmesi gereken temel termodinamik kavramların açıklamaları yapılacaktır. Alışılmış Brayton çevrimi esasına göre çalışan bir gaz türbin çevrimine bağımsız olarak bir türbin eklenmiştir. Bu esaslar doğrultusunda bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı bir çevrim için termodinamiğin I. ve II. kanunu analiz edilmiştir. Bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı çevrimin modellenmesi Şekil 1’de verilmiştir.



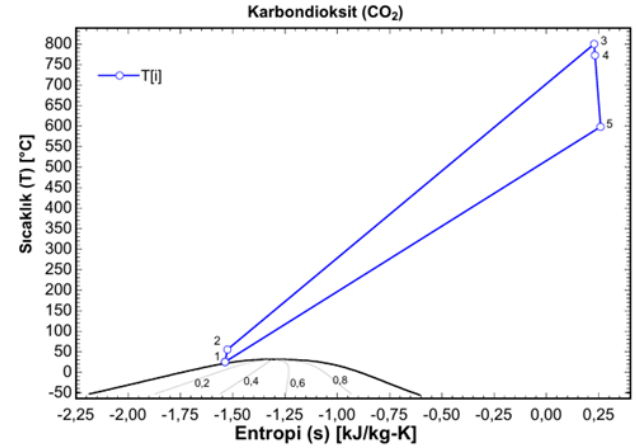
Şekil 1. Bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı çevrimin sistem şeması

Farklı akışkanlar kullanılarak bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı bir çevrimin karşılaştırılması amacıyla termodinamik analizler için bazı kabuller aşağıda belirtilmiştir:

- Çevrim bileşenlerinden olan ısı kayıpları ve bileşenler içindeki akışkana ait basınç kayıpları ihmal edilmiştir.
- Sistemin sürekli rejim şartlarında olduğu kabul edilmiştir.
- Kinetik enerji ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Ortam sıcaklığı 22 °C, basıncı ise 101,325 kPa kabul edilmiştir.
- Kompresör giriş sıcaklığı 25 °C olarak alınmıştır.
- Çevrimdeki performansını değerlendirmek için 20 °C ile 50 °C arasındaki değerler alınmıştır.
- Çevrim minimum basıncı 8 MPa’dır.
- Çevrim basınç oranları 2 ile 4,25 arasındaki değerler alınarak türbin giriş basıncı 160000 kPa ile 34000 kPa arasındaki değerlerde çalışılmıştır.
- Türbin giriş sıcaklıkları 800 °C ile 1200 °C arasında değişmektedir. Türbin ve kompresör izantropik verimleri sırasıyla %90 ve %89’dur.

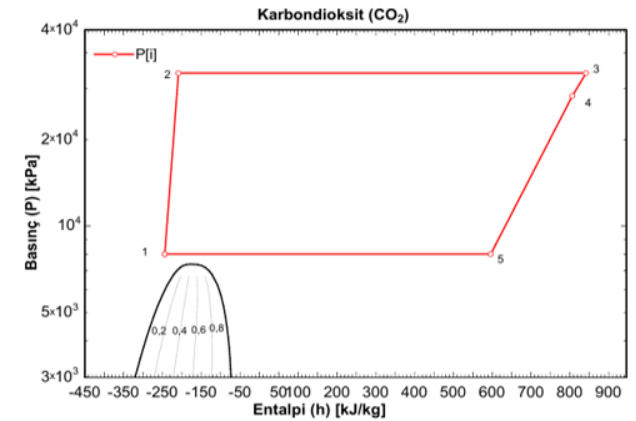
- Çevrim elemanlarının sistemdeki performansını değerlendirmek amacıyla kompresör verimi, yüksek basınçlı türbin verimi ve alçak basınçlı (bağımsız) türbin verimi %70 ile %89 arasındaki değerler alınmıştır.

Bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı çevrimin T-s diyagramı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı çevrim T-s diyagramı

Bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı çevrimin P-h diyagramı Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı çevrim P-h diyagramı

Bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı çevrimin termodinamik analizinde kullanılan kütle, enerji, ekserji ve entropi denge denklemleri aşağıda verilmiştir.

Kütlenin korunumu denklemi: Süreklilik denklemi olarak da ifade edilen kütlenin korunumu denklemi termodinamik sistemlerin analizinde kullanılan temel ilkedir. Bir sistemde giren ve çıkan kütle debilerinin zamana göre değişiklik gösterdiği kütle miktarı arasındaki ilişkiyi Denklem 1’de ifade edilmektedir (Çengel ve Boles, 2008).

$$\Sigma \dot{m}_g = \Sigma \dot{m}_ç \quad (1)$$

Enerjinin korunumu: Kontrol hacmindeki enerji değişiminin giren enerji ile çıkan enerji arasındaki farka eşittir. Sürekli

akışlı açık sistemlerde kontrol hacminin toplam enerjisi sabit kalır. Enerji korunumu ilkesi Denklem 2'deki gibi ifade edilir (Çengel ve Boles, 2008).

$$\begin{aligned} \Sigma \dot{m}_g \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_g + \Sigma \dot{Q}_g + \Sigma \dot{W}_g \\ = \Sigma \dot{m}_c \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_c + \Sigma \dot{Q}_c + \Sigma \dot{W}_c \end{aligned} \quad (2)$$

Entropi Dengesi: Entropi, enerji ve kütle gibi, kapsamlı bir özelliktir. Madde akışları yoluyla bir kontrol hacminin içine veya dışına aktarılabilir. Bir proses içinde üretilen entropi üretimi olarak adlandırılır. Kontrol hacmi için entropi değişimi Denklem 3'teki gibi ifade edilebilir.

$$\Sigma \dot{m}_g s_g + \Sigma \left(\frac{\dot{Q}}{T} \right)_g + \dot{S}_{\dot{u}} = \Sigma \dot{m}_c s_c + \Sigma \left(\frac{\dot{Q}}{T} \right)_c \quad (3)$$

Ekserji Dengesi: Enerjiden farklı olarak ekserji korunamaz. Bu nedenle, ekserji yıkımı, sistemlerin ekserji analizi için anahtar bir parametredir. Ekserji yıkımı, sistem içinde tersinmezlik nedeniyle kaybolan iş olarak tanımlanmaktadır. Sistemde oluşan ekserji yıkımı sistemden üretilen entropi üretimiyle ilişkilidir. Ekserji dengesi Denklem 4'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \Sigma \dot{m}_g ex + \Sigma \dot{E}x_g^Q + \Sigma \dot{E}x_g^W \\ = \Sigma \dot{m}_c ex + \Sigma \dot{E}x_c^Q + \Sigma \dot{E}x_c^W + \dot{E}x_{ters} \end{aligned} \quad (4)$$

$$ex = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

Denklem 4'te verilen ısının ve işin ekserjisi Denklem 6 ve Denklem 7'de verilen formüller kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{E}x^Q = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (6)$$

$$\dot{E}x^W = \dot{W} \quad (7)$$

Sistemde meydana gelen ekserji yıkımı, entropi üretimi ve referans çevre sıcaklığının bir ürünüdür. Ekserji yıkımı Denklem 8'de verilen formül yardımıyla bulunabilir.

$$\dot{E}x_{ters} = T_0 \dot{S}_{\dot{u}} \quad (8)$$

Enerji Verimi: Bir sistemin verimliliği o sistemin performansının bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. Bir termodinamik süreç veya sistem için enerji verimliliği, sistemin faydalı çıktısının sisteme giren enerjiye oranı olarak tanımlanır (Dincer, 2018). Enerji verimi Denklem 9'da verilen formül yardımıyla bulunabilir.

$$\eta_{en} = \frac{\text{Faydalı enerji çıktısı}}{\text{Sisteme giren enerji}} = \frac{\dot{W}_{net}}{Q_g} \quad (9)$$

Ekserji Verimi: Termodinamik sistemlerin ekserji verimliliği veya ikinci yasa analizi, sistem performansının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Ekserji verimliliği kavramı, sistemin iyileştirme potansiyeli hakkında bilgi vermektedir

(Dincer, 2018). Enerji verimi Denklem 10'da verilen formül yardımıyla bulunabilir.

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Faydalı enerji çıktısı}}{\text{Sisteme giren enerji}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}x_{Q_g}} \quad (10)$$

Bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı bir çevrimde bulunan kompresör, ısıtıcı, türbin ve ısı değiştirici gibi ekipmanların birinci ve ikinci yasa çözümlemesi olan kütle, enerji, ekserji ve entropi denge denklemleri aşağıda belirtilmiştir.

Kompresör:

Çevrimdeki ekipmanlardan biri olan kompresörün görevi sistemdeki akışkanı basınçlandırmaktır. Kompresörün giriş ve çıkış durumlarına göre kütle, enerji, ekserji ve entropi denge denklemleri uygulandığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{komp} \quad (11)$$

$$\dot{W}_{komp} = \dot{m}_{komp} (h_2 - h_1) \quad (12)$$

$$\dot{E}_{ters,komp} = \dot{m}_{komp} (e_{ex1} - e_{ex2}) + \dot{W}_{komp} \quad (13)$$

$$\dot{S}_{\dot{u},komp} = \dot{m}_{komp} (s_2 - s_1) \quad (14)$$

$$\eta_{komp} = \frac{h_{s2} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (15)$$

Kompresörde sürtünmeden meydana gelen tersinmezlikler ve ani sıkıştırma dikkate alındığında ekserji verimi,

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{ex1} - \dot{E}_{ex2}}{\dot{W}_k} = \frac{\dot{m}_k ((h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2))}{\dot{W}_k} \quad (16)$$

Isıtıcı:

Çevrimde dolaşan akışkan ısıtıcı tarafından sıcaklığı yükselmektedir. Enerji, ekserji ve entropi denge denklemleri uygulandığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$T_k = T_s \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{is} = \dot{m}_{is} (h_3 - h_2) \quad (18)$$

$$\dot{E}_{ters,is} = \dot{m}_{is} (e_{x2} - e_{x3}) + \left(1 - \frac{T_0}{T_s} \right) \dot{Q}_{is} \quad (19)$$

$$\dot{S}_{\dot{u},is} = \dot{m}_t (s_3 - s_2) - \frac{\dot{Q}_{is}}{T_0} \quad (21)$$

Çevre ile ısıtıcıda entropi akışı ve ısı transferinden dolayı tersinmezlikler meydana gelmektedir. Isıtıcıdaki tersinmezlikler dikkate alındığında ekserji verimi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta_{ex,1s} = \frac{(1-\frac{T_0}{T_3})\dot{Q}_{1s}}{\dot{m}_{1s}(e_{x3}-e_{x2})} = \frac{(1-\frac{T_0}{T_3})\dot{Q}_{1s}}{\dot{m}_{1s}((h_3-h_2)-T_0(s_3-s_2))} \quad (22)$$

Türbin:

Türbin çevrimde maliyeti doğrudan etkileyen, enerji üreten ve üretilen enerjinin verimliliğini sağlayan ekipmandır. Türbin için kütle, enerji, ekserji ve entropi denklemleri şu şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{türbin1} \quad (23)$$

$$\dot{W}_{türbin1} = \dot{m}_{türbin1}(h_3 - h_4) \quad (24)$$

$$\dot{E}_{ters,türbin1} = \dot{m}_{türbin1}(e_{x3} - e_{x4}) + \dot{W}_{türbin1} \quad (25)$$

$$\dot{S}_{ü,türbin1} = \dot{m}_{türbin1}(s_4 - s_3) \quad (26)$$

Türbindeki verim Denklem 27'deki gibi ifade edilir.

$$\eta_{HP,Türbin} = \frac{h_4-h_3}{h_{s,4}-h_3} \quad (27)$$

Türbinde sürtünme ve genişmeden dolayı oluşan tersinmezlikler dikkate alındığında türbinin ekserji verimi Denklem 28'deki gibi ifade edilir.

$$\eta_{ex,türbin1} = \frac{\dot{W}_{türbin1}}{\dot{E}_{ex3}-\dot{E}_{ex4}} = \frac{\dot{W}_{türbin1}}{\dot{m}_{türbin1}((h_3-h_4)-T_0(s_3-s_4))} \quad (28)$$

Bağımsız türbin:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_{türbin2} \quad (29)$$

$$\dot{W}_{türbin2} = \dot{m}_{türbin2}(h_4 - h_5) \quad (30)$$

$$\dot{E}_{ters,türbin2} = \dot{m}_{türbin2}(e_{x4} - e_{x5}) + \dot{W}_{türbin2} \quad (31)$$

$$\dot{S}_{ü,türbin2} = \dot{m}_{türbin2}(s_5 - s_4) \quad (32)$$

Bağımsız türbindeki verim Denklem 33'deki gibi ifade edilir.

$$\eta_{LP,Türbin} = \frac{h_5-h_4}{h_{s,5}-h_4} \quad (33)$$

Bağımsız güç türbininde sürtünme ve genişmeden dolayı oluşan tersinmezlikler dikkate alındığında türbinin ekserji verimi Denklem 34'teki gibi ifade edilir.

$$\eta_{ex,türbin2} = \frac{\dot{W}_{türbin2}}{\dot{E}_{x4}-\dot{E}_{x5}} = \frac{\dot{W}_{türbin2}}{\dot{m}_{türbin2}((h_4-h_5)-T_0(s_4-s_5))} \quad (34)$$

Isı Değiştirici:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{id} \quad (35)$$

$$\dot{Q}_{id} = \dot{m}_{id} \cdot (h_5 - h_1) = c_p(T_5 - T_1) \quad (36)$$

$$\dot{E}_{ters,id} = \dot{m}_{id} \cdot T_0 \cdot \left[(s_1 - s_5) + \frac{q_{id}}{T_0} \right] \quad (37)$$

$$\dot{S}_{ü,id} = \dot{m}_{id}(s_5 - s_1) \quad (38)$$

Çevrimin enerji ve ekserji verimi;

$$\eta_{ID} = \frac{T_5-T_1}{T_5-T_{1s}} \quad (39)$$

$$\eta_{çevrim,en} = \frac{W_{net}}{Q_{Yanma O.}} \quad (40)$$

$$\eta_{çevrim,ex} = \frac{(h_4-h_5)}{(e_3-e_2)} \quad (41)$$

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı bir çevrimin incelenmesinde çevrim akışkanı olarak CO₂ akışkanı kullanılmasında materyal ve yöntem bölümündeki formüller takip edilerek Engineering Equation Solver (EES) programında çeşitli parametrelerde çevrim performansına etkileri incelenmiştir.

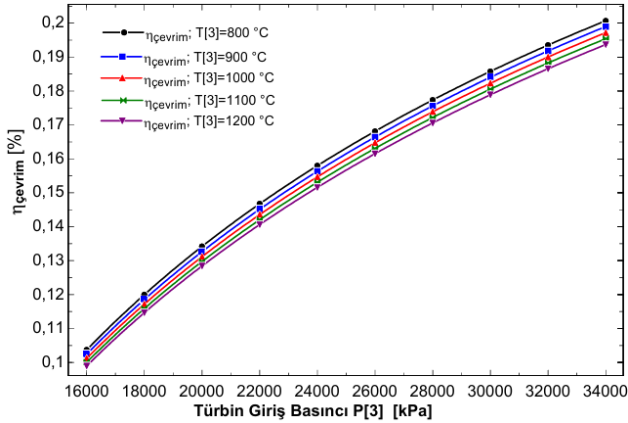
CO₂ akışkanlı bağımsız güç türbinli süperkritik kapalı bir çevrimin termodinamik analizinde Tablo 1'de belirtilen sistem çalışma parametreleri kullanılmıştır. Ekipmanlardaki verim ve diğer değerlerdeki farklılıkları belirtmek için yapılan değerlerin değişiklikleri ayrıca belirtilmiştir.

Tablo 1. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevrimin çalışma parametreleri

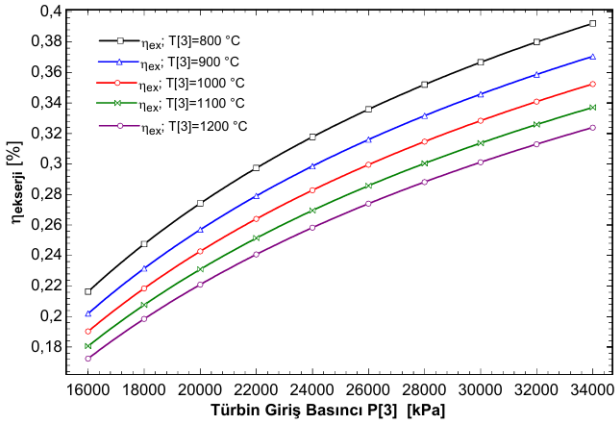
Parametre	Değer
Kompresör giriş basıncı [kPa]	8000
Kompresör giriş sıcaklığı °C	25
Kompresör izantropik verimi [%]	89
Yüksek basınç türbin (Hp) izantropik verimi [%]	90
Alçak basınç türbin (Lp) izantropik verimi [%]	90

Çevrimin yüksek türbin giriş basınç ve sıcaklıklardaki enerji, ekserji verimi ve çevrimin net gücündeki değişimler Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Süperkritik seviyelerde sabit türbin giriş sıcaklığında türbin giriş basınç değerleri arttıkça çevrimin enerji, ekserji verimi ve çevrimin net gücü artmaktadır. Sabit türbin giriş basınçlarında türbin giriş sıcaklığı artırıldığında çevrim enerji ve ekserji verimi azalırken çevrim net gücü artmaktadır. Bu bağlamda bağımsız türbininin çevrime olumlu etkileri ön plana çıkmaktadır. Basit Brayton çevrimlerinde sabit türbin giriş basıncında türbin giriş sıcaklığı artırıldığında çevrimin enerji verimi de bir miktar artmaktadır. Bağımsız türbin sayesinde çevrimin enerji verimini arttırmak için türbin giriş sıcaklıklarında ultrasüperkritik sıcaklıklara gerek duyulmamaktadır. 34000 kPa ile en yüksek türbin giriş basıncında, türbin giriş sıcaklığı 800 °C'den 1200 °C değerlerine çıkarıldığında çevrim verimi %3,9 ekserji verimi %17,4 azalırken çevrimin net gücü ise %47 artmaktadır. En yüksek enerji ve ekserji verimi 800 °C türbin giriş sıcaklığında ve 34000 kPa türbin giriş basıncında enerji verimi %20,07 ekserji verimi %39,22'dir. En yüksek çevrim

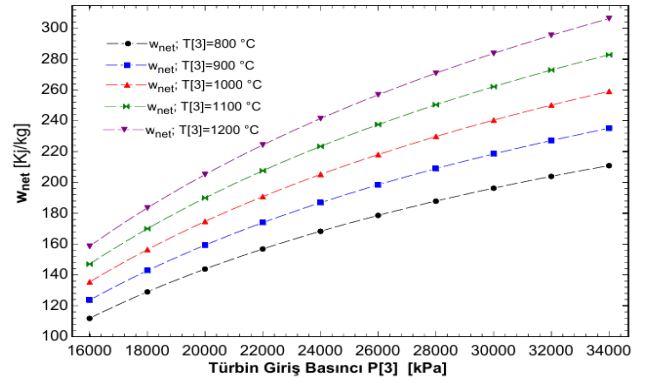
net gücü ise 1200 °C türbin giriş sıcaklığında ve 34000 kPa türbin giriş basıncında 306,4 kW olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Türbin giriş basınçlarında CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevriminin enerji verimi değişimleri



Şekil 5. Türbin giriş basınçlarında CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevriminin ekserji verimi değişimleri



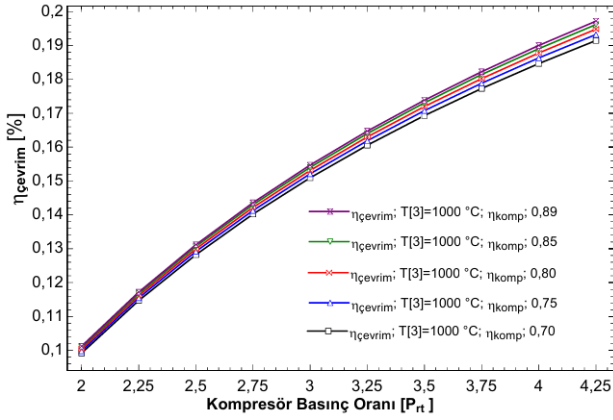
Şekil 6. Türbin giriş basınçlarında CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevriminin çevrim net gücünün değişimleri

Tablo 2’de 800 °C yüksek basınç türbin giriş sıcaklığında farklı türbin giriş basınçlarındaki yüksek ve alçak (bağımsız) türbin giriş sıcaklıkları (T=4 ve T=5), yüksek basınç türbin çıkış basınç değerleri, yüksek ve alçak basınç türbin güçleri verilmiştir. Türbin giriş basınçları arttıkça yüksek ve alçak basınç türbininin gücü de artmaktadır. Türbinlerde elde edilen güç sayesinde türbinden çıkan akışkanın sıcaklığı da düşmektedir. 34000 kPa türbin giriş basıncı ve 800 °C yüksek basınç türbin giriş sıcaklığında türbin çıkış sıcaklığı 772,3 °C alçak basınç türbin çıkış sıcaklığı da 598,2 °C’dir.

Performans değerlerinin hesaplamasında Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da sabit kompresör giriş sıcaklığı (T[1]= 25 °C) ve basıncı (P[1]=8000 kPa) ile sabit türbin giriş sıcaklığı (T[3]=1000 °C) altında, Tablo 1’de verilen çalışma parametrelerinden kompresör verimleri değiştirilerek, farklı kompresör verimleri için enerji, ekserji verimleri ve çevrim gücündeki değişimleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde sabit türbin giriş sıcaklığında kompresör basınç oranı arttığında çevrimin enerji, ekserji verimi ve çevrimin net gücünün arttığı görülmektedir. Bununla birlikte aynı esaslarda kompresör verimi de artırıldığında çevrimin enerji, ekserji verimi ve çevrimin net gücü artmaktadır.

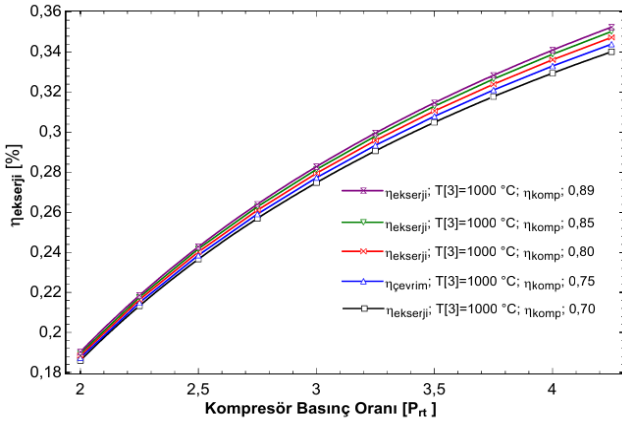
Tablo 2. Farklı türbin giriş basınçlarındaki çevrim parametre değerleri değişimleri (T[3]=800 °C)

P[3] (kPa)	P[4] (kPa)	T[2] (°C)	T[4] (°C)	T[5] (°C)	W _{Ht} (kW)	W _{Lt} (kW)
16000	15064	36,44	790,9	700,3	11,34	111,7
18000	16705	38,87	788,8	684,0	14,09	128,8
20000	18301	41,18	786,6	669,5	16,81	143,6
22000	19852	43,40	784,5	656,5	19,51	156,6
24000	21362	45,53	782,4	644,7	22,18	168,1
26000	22832	47,59	780,3	633,9	24,84	178,3
28000	24263	49,57	778,3	624,0	27,47	187,6
30000	25657	51,50	776,2	614,8	30,09	196,0
32000	27015	53,36	774,2	606,2	32,68	203,6
34000	28338	55,18	772,3	598,2	35,26	210,6

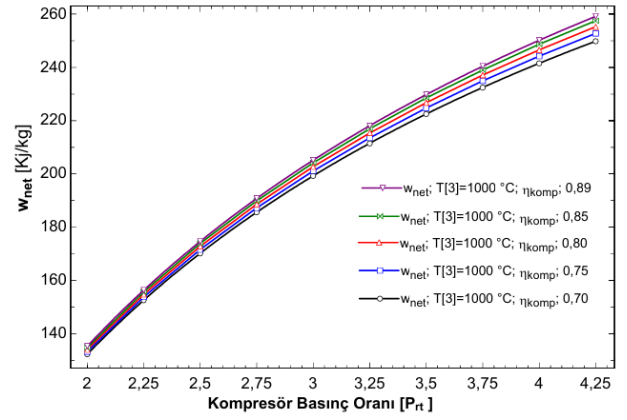


Şekil 7. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevrimde farklı kompresör basınç oranlarının çevrim verimine etkisi

Kompresör giriş basıncı 4,25 katına çıkarıldığında akışkan yüksek basınç türbinine 34000 kPa basınçta giriş yapmaktadır. Şekil 7 ve 8 incelendiğinde çevrimin en yüksek enerji ve ekserji verimi kompresör veriminin %89'a çıkarıldığında ulaştığı görülmektedir. En yüksek türbin giriş basıncında ve %89 kompresör veriminde çevrimin enerji verimi %19,7 ve ekserji verimi %35,2'ye kadar çıkmaktadır. %89 kompresör veriminde en düşük enerji verimi %10,1 ve ekserji verimi %19'dur. Sabit türbin giriş sıcaklığında ve maksimum (34000 kPa) türbin giriş basıncında en düşük ve en yüksek kompresör verimi için çevrim enerji verimi arasındaki fark ise %0,57 ekserji verimi arasındaki fark ise %1,23 gibi yok sayılacak kadar azdır.



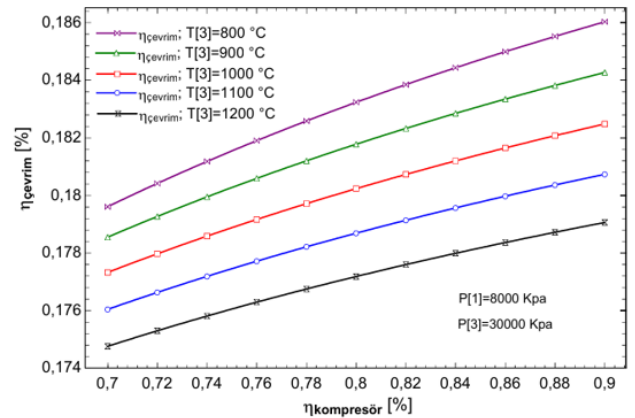
Şekil 8. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevrimde farklı kompresör basınç oranlarının çevrim ekserji verimine etkisi



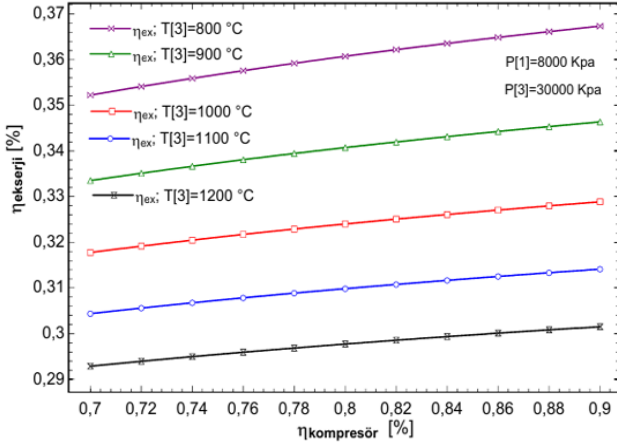
Şekil 9. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevrimde farklı kompresör basınç oranlarının çevrim gücüne etkisi

Şekil 9 incelendiğinde çevrimin en yüksek net gücü 4,25 kompresör basınç oranında %89 kompresör veriminde 259,1 kW'tır. Çevrimin en düşük net gücü ise 2 kompresör basınç oranında %70 kompresör veriminde 132,3 kW olduğu görülmektedir. Sabit türbin giriş sıcaklığında ve maksimum (34000 kPa) türbin giriş basıncında en düşük ve en yüksek kompresör verimi için çevrim net gücü arasındaki fark ise 9,3 kW'tır.

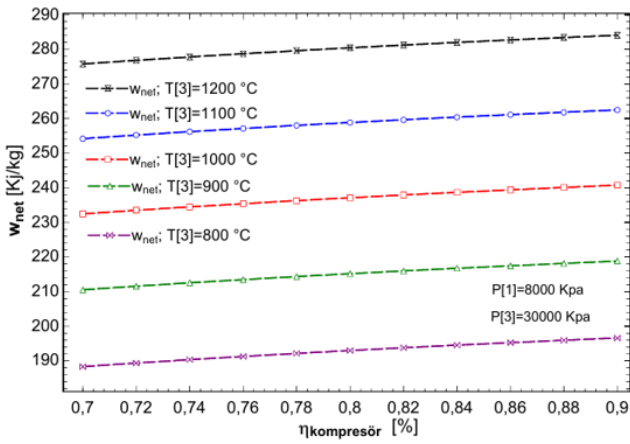
Performans değerlerinin hesaplamasında Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de sabit kompresör giriş sıcaklığı ($T[1]=25\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve basıncı ($P[1]=8000\text{ kPa}$) ile sabit türbin giriş basıncında ($P[3]=30000\text{ kPa}$) farklı kompresör verimleri için süperkritik türbin giriş sıcaklıklarındaki çevrimin enerji, ekserji verimleri ve çevrimin net gücündeki değişimleri verilmiştir. Sabit türbin giriş sıcaklık ve basınçlarında kompresör verimleri arttırıldığında çevrimin enerji, ekserji veriminin ve net gücünün arttığı görülmektedir. Ancak çevrim net gücündeki artışın dikkate alınabilecek bir artış olmadığı görülmektedir.



Şekil 10. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevriminin kompresör verimi ile enerji verimi değişimi



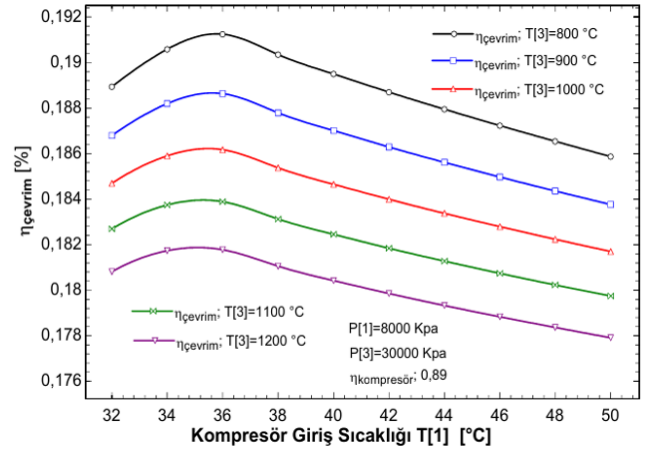
Şekil 11. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevriminin kompresör verimi ile ekserji verimi değişimi



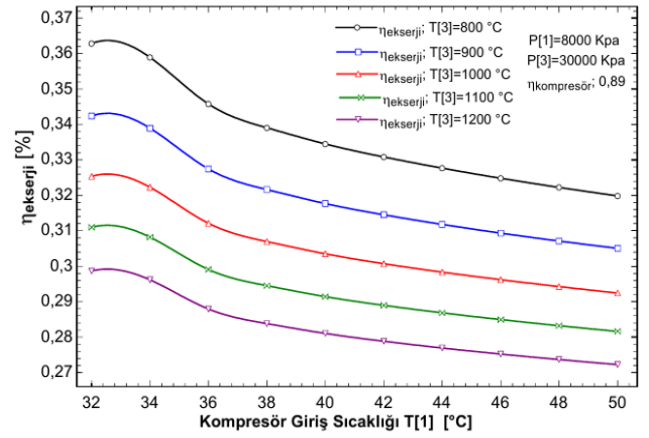
Şekil 12. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevriminin kompresör verimi ile net gücün değişimi

Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12 incelendiğinde, çevrimin en yüksek enerji ve ekserji verimi, %90 kompresör veriminde çalıştığı ve 800 °C türbin giriş sıcaklığında elde edilmektedir. Bu değerlerde enerji verimi %18,6 ekserji verimi ise %36,73'tür. Çevrim net gücünün en yüksek olduğu değer ise %90 kompresör veriminde çalıştığı ve 1200 °C türbin giriş sıcaklığında 284 kW'tır.

Kompresör giriş sıcaklığına göre CO₂ akışkanlı bağımsız türbinli güç çevriminin enerji veriminin değişimi Şekil 13'te ekserji veriminin değişimi ise Şekil 14'te verilmiştir. Farklı türbin giriş sıcaklıklarında kompresör giriş sıcaklık değerleri arttığında belli bir yere kadar en yüksek enerji verimine ulaşmakta ve bu değerden sonra hızla aşağı yönde düştüğü tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise CO₂ akışkanının termofiziksel özelliğinden kaynaklanmaktadır. Kompresör giriş sıcaklıkları veya türbin giriş sıcaklıkları arttıkça enerji verimi düşmektedir. En yüksek enerji verimi 800°C türbin giriş sıcaklığında ve 36 °C kompresör giriş sıcaklığında %19,12'ye ulaşmaktadır.



Şekil 13. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevrimde farklı kompresör giriş sıcaklıklarının enerji verimine etkisi

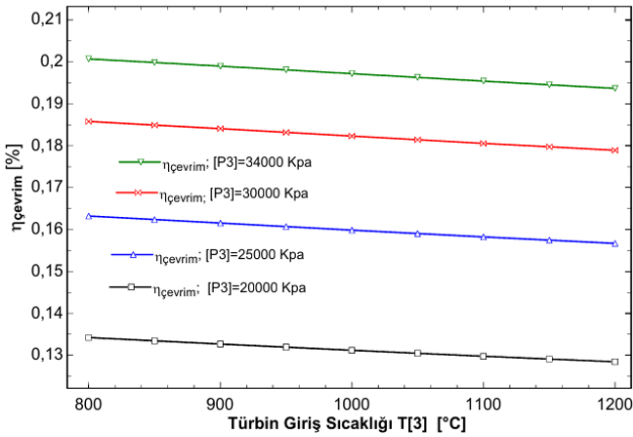


Şekil 14. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevrimde farklı kompresör giriş sıcaklıklarının ekserji verimine etkisi

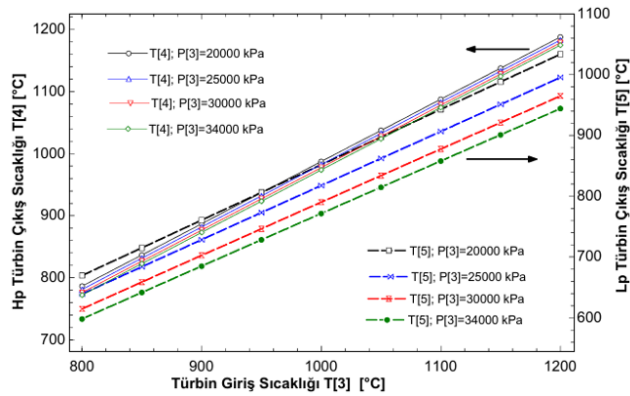
Şekil 14'te ekserji verimindeki değişimler incelendiğinde kompresör giriş sıcaklıkları arttıkça ve bundan ayrı olarak türbin giriş sıcaklıkları arttıkça çevrimin ekserji verimi azalmaktadır. En yüksek ekserji verimi en düşük türbin giriş sıcaklığında (800 °C) ve en düşük kompresör giriş sıcaklığında (32 °C) elde edilmektedir. Bu değer ise %36,83'tür. En düşük türbin giriş sıcaklığın kompresör giriş sıcaklığına göre ekserji verimine etkisindeki fark %4,3'tür.

CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç çevrimi için farklı türbin giriş sıcaklık ve basınçlarının çevrim enerji verimine etkisi ve türbin çıkış sıcaklıklarına etkisi sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 16'da verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü belli bir türbin giriş basıncında türbin giriş sıcaklığının artırılması çevrim enerji verimini düşürmektedir. En yüksek türbin giriş sıcaklığında 20000 kPa türbin giriş basıncında çevrim verimi %12,84 ile en düşük enerji verimi elde edilmektedir. Şekil 16 incelendiğinde farklı türbin giriş basınçlarında türbin giriş sıcaklığı arttıkça, alçak (bağımsız) basınçlı türbin çıkış sıcaklık farkı artmaktadır. 34000 kPa yüksek basınçlı türbin giriş basıncında 800 °C türbin giriş sıcaklığında, yüksek basınçlı türbin çıkış sıcaklığı 772,3 °C iken düşük basınçlı türbin çıkış sıcaklığı 598,2 °C'dir. Aynı yüksek türbin giriş basıncında 1200 °C türbin giriş sıcaklığında, yüksek

basıncılı türbin çıkış sıcaklığı 1175 °C iken alçak basınçlı türbin çıkış sıcaklığı 944,1°C'dir.



Şekil 15. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevrimde farklı türbin giriş basınç ve sıcaklıklarının enerji verimine etkisi



Şekil 16. CO₂ akışkanlı süperkritik bağımsız güç türbinli çevrimde farklı türbin giriş basınç ve sıcaklıklarının türbin çıkış sıcaklıklarına etkisi

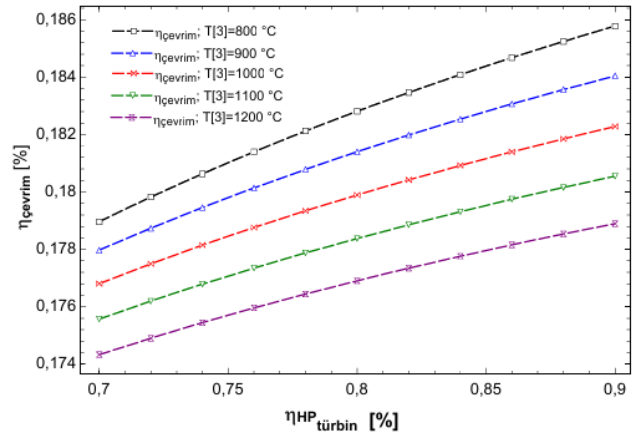
Tablo 3. Yüksek basınçlı türbinin farklı verim değerlerinde çevrim parametrelerine etkisi ($P_4 = 30000$ kPa, $T_3 = 800$ °C)

$\eta_{HP, \text{Türbin}} (\%)$	$P[4] (\text{kPa})$	$T[5] (^\circ\text{C})$	$\eta_{\text{enerji}} (\%)$	$\eta_{\text{ekserji}} (\%)$	$W_{\text{net}} (\text{kW})$
0,70	24510	620,1	0,1790	0,3532	189,1
0,74	24785	619,2	0,1806	0,3565	190,8
0,78	25034	617,9	0,1821	0,3595	192,4
0,82	25260	616,8	0,1835	0,3621	193,8
0,86	25467	615,7	0,1847	0,3645	195,1
0,90	25657	614,8	0,1858	0,3667	196,3

Yüksek basınçlı türbinin farklı verim değerlerinin çevrim parametrelerine etkisi Tablo 3'te verilmiştir. Yüksek basınçlı türbin verimi arttıkça, çevrimin enerji verimi, ekserji verimi ve net gücü de artmaktadır. 30000 kPa türbin giriş basıncı ve 800°C türbin giriş sıcaklığında, %70 türbin veriminde çalıştığında enerji verimi %17,90 ekserji veriminin ise %35,32 olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu koşullarda çevrimin net gücü 189,1 kW'tır. Yüksek basınçlı türbin çıkış basıncı 24510 kPa, alçak basınçlı (bağımsız) türbin çıkış sıcaklığı ise 620,1 °C olduğu görülmektedir.

Alçak basınçlı (bağımsız) türbin veriminin farklı türbin giriş sıcaklıklarında çevrime etkisi Şekil 18'de verilmiştir. Görülmektedir ki türbin verimi düştüğünde çevrimin enerji

Yüksek basınçlı türbin veriminin farklı türbin giriş sıcaklıklarında çevrime etkisi Şekil 17'de verilmiştir. Burada Tablo 1'deki esaslardan farklı olarak yüksek basınçlı türbin verimi farklı değerlerde çevrime etkisi incelenmiştir. 30000 kPa türbin giriş basıncı ($T[3]$) kabul edilerek çevrimin enerji verimi hesaplandığında yüksek basınçlı türbin verimi arttığında çevrimin enerji veriminin arttığı, yüksek basınçlı türbin giriş sıcaklığı arttığında çevrimin enerji verimi düştüğü görülmektedir. Yüksek basınçlı türbin verimi %70'den %90'a çıkarıldığında çevrimin en yüksek enerji verimi 800 °C yüksek basınçlı türbin giriş sıcaklığında olduğu görülmektedir. Bu değer %18,6'dır. En düşük çevrim verimi de 1200 °C yüksek basınçlı türbin giriş sıcaklığında %70 yüksek basınçlı türbin veriminde %17,4'tür.



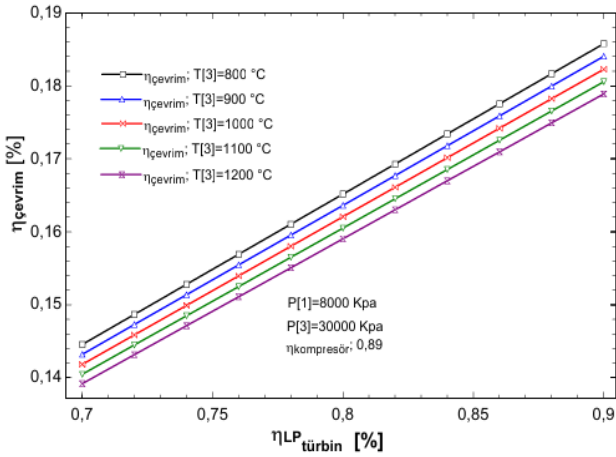
Şekil 17. Yüksek basınçlı türbin veriminin farklı türbin giriş sıcaklıklarında çevrime etkisi ($P_3 = 30000$ kPa)

verimi de düşmektedir. Ancak alçak basınçlı türbinde verim düşüşü yaklaşık %4 seviyelerinde olurken, yüksek basınçlı türbinde bu düşüş neredeyse %1 seviyesindedir.

Alçak basınçlı (bağımsız) türbinin farklı verim değerlerinin çevrim parametrelerine etkisi Tablo 4'te verilmiştir. Alçak basınçlı türbin verimi arttıkça çevrimin enerji, ekserji verimi ve net gücü artmaktadır. 30000 kPa türbin giriş basıncında ve 800 °C türbin giriş sıcaklığında en düşük ekserji verimi, %70 türbin veriminde olduğu ve ekserji veriminin %14,46 olduğu görülmektedir. Çevrimin enerji veriminin de %14,46'dan %18,58'e çıktığı görülmektedir.

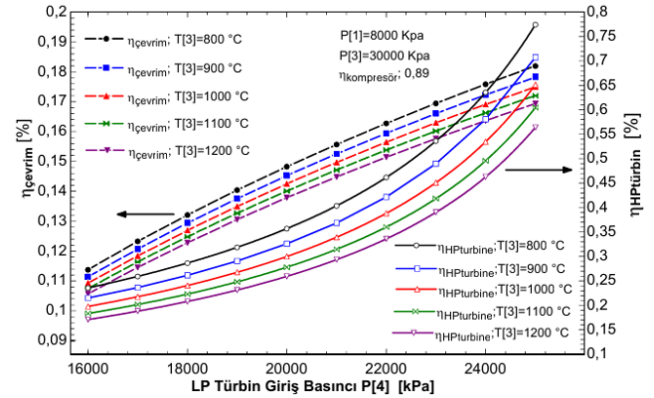
Tablo 4. Alçak basınçlı türbinin farklı verim değerlerinde çevrim parametrelerine etkisi ($P_3 = 30000$ kPa, $T_3 = 800$ °C)

$\eta_{LP, \text{Türbin}} (\%)$	$P[4]$ (kPa)	$T[4]$ (°C)	$T[5]$ (°C)	$\eta_{\text{enerji}} (\%)$	$\eta_{\text{ekserji}} (\%)$	W_{net} (kW)
0,70	25657	776,2	650,3	0,1446	0,2852	152,7
0,74	25657	776,2	643,2	0,1528	0,3015	161,4
0,78	25657	776,2	636,1	0,1610	0,3178	170,1
0,82	25657	776,2	629	0,1693	0,3341	178,8
0,86	25657	776,2	621,9	0,1775	0,3504	187,6
0,90	25657	776,2	614,8	0,1858	0,3667	196,3


Şekil 18. Alçak basınçlı (bağımsız) türbin veriminin farklı türbin giriş sıcaklıklarında çevrime etkisi

Farklı türbin giriş basınçlarının çevrim verimine etkisi Şekil 19’da verilmiştir. Alçak basınç türbinin basınç değeri 16000 ile 25000 kPa değerlerine çıkarıldığında çevrim verimi artmaktadır. 800°C ile 1200 °C yüksek basınçlı türbin giriş sıcaklığında ve 25000 kPa alçak basınçlı türbin giriş basıncında en yüksek verim 800 °C sıcaklıkta elde edilmektedir. Bu değer %18,19’dur. Alçak basınç türbinin basınç değeri 16000 kPa’ya düştüğünde çevrim verimi %11,38 olmaktadır. 1200 °C yüksek basınçlı türbin giriş sıcaklığında en yüksek enerji verimi %16,93 iken en düşük enerji verimi %10,57’dir. Bununla birlikte alçak basınçlı türbin giriş basıncı arttığında yüksek basınçlı türbin verimi de arttığı görülmektedir. Maksimum alçak basınçlı türbin giriş basıncında ($P[4]=25000$ kPa) 800°C türbin giriş

sıcaklığında yüksek basınçlı türbin enerji verimi en yüksek %77,43 olduğu görülmektedir. 1200 °C türbin giriş sıcaklığında ise en yüksek %56,4 tür.


Şekil 19. Alçak basınçlı (bağımsız) türbin giriş basıncının çevrim verimine etkisi

800 °C yüksek basınçlı türbin giriş sıcaklığında, alçak basınçlı (bağımsız) türbin giriş basıncının çevrim verimine etkisi Tablo 5’te verilmiştir. Türbin giriş basıncı arttığında çevrimin enerji ve ekserji verimi ve çevrim net gücünde artık meydana gelmektedir. Alçak basınçlı (bağımsız) türbin verimi %23,58 den %77,43 değerine çıkmaktadır. Çevrim net gücünde ise 70 kW’lık artış meydana gelmektedir. Çevrimin enerji veriminin ise %11,38’den %18,19’a çıktığı görülmektedir. Çevrimin ekserji verimi %22,43’ten %35,91’e yükseldiği görülmektedir. Alçak basınçlı (bağımsız) türbin giriş sıcaklığı ise 676,6°C’den 618,1°C’ye düşmektedir.

Tablo 5. Alçak basınçlı türbinin farklı verim değerlerinde çevrim parametrelerine etkisi ($P_3 = 30000$ kPa, $T_3 = 800$ °C)

$P[4]$ (kPa)	$\eta_{LP, \text{Türbin}} (\%)$	$T[4]$ (°C)	$T[5]$ (°C)	$\eta_{\text{enerji}} (\%)$	$\eta_{\text{ekserji}} (\%)$	W_{net} (kW)
16000	0,2358	774,5	676,6	0,1138	0,2243	120,2
17000	0,2593	774,7	668,5	0,1232	0,2430	130,2
18000	0,2865	774,9	660,9	0,1321	0,2606	139,5
19000	0,3186	775,1	653,8	0,1404	0,2770	148,3
20000	0,3569	775,3	647,1	0,1483	0,2925	156,6
21000	0,4036	775,5	640,7	0,1557	0,3072	164,5
22000	0,4617	775,7	634,6	0,1627	0,3212	171,9
23000	0,5363	775,8	628,9	0,1694	0,3344	179
24000	0,6356	776	623,4	0,1758	0,3470	185,7
25000	0,7743	776,1	618,1	0,1819	0,3591	192,2

4. SONUÇLAR

Son yıllarda, süperkritik karbondioksit (S-CO₂) Brayton çevrimi, yüksek verimliliği, kompakt bileşenleri ve çeşitli ısı kaynaklarına uygulanabilirliği gibi özellikleri nedeniyle

gelecek vaat eden bir güç dönüşüm sistemi olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada, CO₂ akışkanlı bağımsız güç türbinine sahip süperkritik kapalı bir çevrim incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir:

- Sabit türbin giriş sıcaklıklarında türbin giriş basıncı arttırıldığında çevrimin enerji-ekserji verimi ve net gücünün arttığı gözlemlenmiştir. Sabit türbin giriş basıncında türbin giriş sıcaklıkları arttırıldığında ise enerji-ekserji verimi azalırken çevrimin net gücü artmaktadır. Bu durumda en yüksek enerji ve ekserji verimi 800°C türbin giriş sıcaklığında ve 34000 kPa türbin giriş basıncında enerji verimi %20,07 ve ekserji verimi %39,22'dir. En yüksek çevrim net gücü ise 800°C türbin giriş sıcaklığında ve 34000 kPa türbin giriş basıncında 306.4 kW'dır.
- Sabit türbin giriş sıcaklığında kompresör verimi arttırıldığında, enerji-ekserji verimi ve çevrimin net gücünün arttığı tespit edilmiştir. Ancak, buradaki artış miktarındaki farklılık türbin giriş basıncı yükseltildiğinde daha net ortaya çıkmaktadır. Düşük türbin giriş basınçlarında, enerji-ekserji verimi ve çevrim net gücünde dikkate alınır bir artış tespit edilmemiştir. Sabit türbin giriş sıcaklığı ve maksimum türbin giriş basıncında, en düşük ve en yüksek kompresör verimi için çevrim verimi arasındaki fark ise %0,57, ekserji verimi arasındaki fark ise %1,23 gibi yok sayılacak kadar azdır. Çevrimin net gücü arasındaki fark ise 9,3 kW'tır.
- Sabit türbin giriş basınçlarında kompresör verimliliğinin etkisinin çevrim verimine etkisi incelendiğinde ise kompresör verimi arttırıldığında çevrimin enerji, ekserji verimi ve çevrimin net gücünün arttığı tespit edilmiştir.
- Kompresör giriş sıcaklığının çevrimin enerji ve ekserji verimine etkisi incelendiğinde kompresör giriş sıcaklığı bir seviyeye kadar yükseldiğinde çevrimin enerji verimi sürekli artmakta, ancak bu seviyeden sonra hızla azalmaktadır. Öte yandan, çevrimin ekserji verimi kompresör giriş sıcaklığı arttıkça düşmektedir. Kompresör giriş sıcaklığının 36°C'ye ulaştığında en yüksek çevrim verimi 800°C türbin giriş basıncı ve 30000 kPa türbin giriş basıncında %19,12'dir. En yüksek ekserji verimi ise 32°C kompresör giriş sıcaklığında %36,28'dir.
- Sabit türbin giriş sıcaklık ve basınçlarında birbirinden bağımsız olarak yüksek basınçlı veya alçak basınçlı (bağımsız) türbinlerden birinin verimini arttırdığımızda çevrimin enerji verimi artmaktadır. Burada yüksek basınçlı türbinin 800°C'de ve 30000 kPa'da çevrim verimine etkisi %0,57 alçak basınçlı (bağımsız) türbinin çevrim verimine etkisi ise %4,12'dir. Bu durumda, alçak basınçlı (bağımsız) türbinin yüksek verimle çalışmasının çevrim verimini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir.

- Alçak basınçlı (bağımsız) türbin tüm parametrelerde evrimin enerji-ekserji verimi ve çevrim net gücüne doğrudan olumlu şekilde etki etmektedir.
- Yüksek enerji verimi için sabit türbin giriş basınçlarında ultrasüperkritik sıcaklık seviyelerine ihtiyaç yoktur; ancak yüksek net güç gerektiğinde bu seviyelere çıkılabilir.
- Çevrim çalışma koşullarında, akışkanın sıcaklığı ısı kaynağı ile artmaktadır. Bu nedenle, çevrimin verimli çalışabilmesi için iyi bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Ayrıca, akışkanın soğutucu ekipmanda da etkili bir şekilde çalışması gerekmektedir. Günümüzde, süperkritik CO₂ akışkanlı güç çevrimleri, yüksek verimlilik, az yer kaplama, kullanım kolaylığı ve düşük maliyet gibi avantajları sayesinde atık ısı geri kazanımı, elektrik üretim tesisleri ve savunma sanayinde önemli bir kullanım potansiyeline sahiptir. Ancak, bağımsız güç türbini konusunda süperkritik CO₂ çevrimlerinin performansını inceleyen bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu çalışma, gelecekteki araştırmalara katkı sağlaması beklenmektedir. Çevrimden daha yüksek verim ve güç elde etmek için ara ısıtıcı, ara soğutucu ve reküperatör gibi ek ekipmanların kullanılması önerilmektedir.

Yazar Katkıları

Volkan CEYLAN: (b) Çalışma Tasarısı, Yöntemi (c) Literatür Taraması, (g) Analiz, Yorum, (h) Metin Yazma

Arif Emre ÖZGÜR: (a) Fikir, (d) Danışmanlık, (g) Analiz, Yorum, (i) Eleştirel İnceleme

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

KAYNAKLAR

- Amare, D. F., Aklilu, T. B., & Gilani, S. I. (2016). Effects of performance deterioration on gas path measurements in an industrial gas turbine. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(24), 14202–14207.
- Chen, Y., Pridasawas, W., & Lundqvist, P. (2010). Dynamic simulation of a solar-driven carbon dioxide transcritical power system for small scale combined heat and power

- production. *Solar Energy*, 84(7), 1103–1110. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.03.006>
- Chen, L., Feng, H., Ge, Y., & Shi, S. (2023). Power and efficiency optimizations for an open cycle two-shaft gas turbine power plant. *Propulsion and Power Research*, 12(4), 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2023.10.001>

- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2008). *Termodinamik: Mühendislik yaklaşımıyla* (5. baskı). Güven Kitabevi.
- Ding, T., Liang, L. J., & Li, Z. (2015). Analytics of the Rankine cycle system using CO₂ as a working fluid. *Journal of Engineering Thermophysics*, 36(2), 410–413.
- Guo, J. Q., Li, M. J., He, Y. L., Jiang, T., Ma, T., Xu, J. L., & Cao, F. (2022). A systematic review of supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power cycle for energy industries: Technologies, key issues, and potential prospects. *Energy Conversion and Management*, 258, Article 115437. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115437>
- Ishiyama, S., Muto, Y., Kato, Y., Nishio, S., Hayashi, T., & Nomoto, Y. (2008). Study of steam, helium and supercritical CO₂ turbine power generations in prototype fusion power reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 50(2–6), 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2007.11.078>
- Jiang, Y., Zhan, L., Tian, K., & Nie, C. (2023). Thermodynamic performance comparison and optimization of sCO₂ Brayton cycle, tCO₂ Brayton cycle and tCO₂ Rankine cycle. *Journal of Thermal Science*, 32, 611–627. <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1708-z>
- Kim, Y. M., Kim, C. G., & Favrat, D. (2012). Transcritical or supercritical CO₂ cycles using both low and high-temperature heat sources. *Energy*, 43(1), 402–415. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.076>
- Kumar, P., & Srinivasan, K. (2016). Carbon dioxide-based power generation in renewable energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 109, 831–840. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.082>
- Liu, Y., Wang, Y., & Huang, D. (2019). Supercritical CO₂ Brayton cycle: A state-of-the-art review. *Energy*, 189, Article 115900. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115900>
- Mecheri, M., & Le Moullec, Y. (2016). Supercritical CO₂ Brayton cycles for coal-fired power plants. *Energy*, 103, 758–771.
- Pan, L. S., Wei, X. L., & Shi, W. X. (2015). Theoretical investigation on a novel CO₂ transcritical power cycle. *Journal of Engineering Thermophysics*, 36(6), 1182–1185.
- Pan, L., Li, B., Wei, X., & Li, T. (2016). Experimental investigation on the CO₂ transcritical power cycle. *Energy*, 95, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.074>
- Park, S. H., Kim, J. Y., Yoon, M. K., Rhim, D. R., & Yeom, C. S. (2018). Thermodynamic and economic investigation of coal-fired power plant combined with various supercritical CO₂ Brayton power cycle. *Applied Thermal Engineering*, 130, 611–623. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.145>
- Sun, Z., Wang, J., Dai, Y., & Wang, J. (2012). Exergy analysis and optimization of a hydrogen production process by a solar-liquefied natural gas hybrid driven transcritical CO₂ power cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(25), 18731–18739. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.028>
- Xia, J., Wang, J., Zhang, G., Lou, J., Zhao, P., & Dai, D. (2018). Thermo-economic analysis and comparative study of transcritical power cycles using CO₂-based mixtures as working fluids. *Applied Thermal Engineering*, 144, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.012>
- Zhang, X., Yamaguchi, H., & Uneno, D. (2007). Experimental study on the performance of solar Rankine system using supercritical CO₂. *Renewable Energy*, 32(15), 2617–2628. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.01.003>
- Zhao, P., Wang, J., Dai, Y., & Gao, L. (2015). Thermodynamic analysis of a hybrid energy system based on CAES system and CO₂ transcritical power cycle with LNG cold energy utilization. *Applied Thermal Engineering*, 91, 718–730. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.082>
- Zhou, J., Zhang, C., Su, S., Wang, Y., Hu, S., & Liu, L. (2018). Exergy analysis of a 1000 MW single reheat supercritical CO₂ Brayton cycle coal-fired power plant. *Energy Conversion and Management*, 173, 348–358.