

DİJİTAL MÜHENDİSLİK

EDİTÖR:

Dr. Gürcan YAVUZ

YAZARLAR:

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Mutlu AKINCI

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TOSUN

Dr. Dürsun EKMEKÇİ

Dr. Gürcan YAVUZ

MSc Alican YÖRÜK



IKSAD
Publishing House

DİJİTAL MÜHENDİSLİK

EDİTÖR

Dr. Gürcan YAVUZ

YAZARLAR

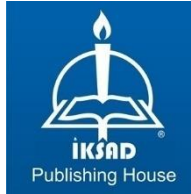
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Mutlu AKINCI

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TOSUN

Dr. Dursun EKMEKÇİ

Dr. Gürcan YAVUZ

MSc Alican YÖRÜK



Copyright © 2020 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced,
distributed or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other
noncommercial uses permitted by copyright law. Institution of Economic
Development and Social
Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TURKEY TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2020©

ISBN: 978-625-7897-29-7
Cover Design: İbrahim KAYA
June / 2020
Ankara / Turkey
Size = 16 x 24 cm

İÇİNDEKİLER

EDİTÖRDEN

ÖNSÖZ

Dr. Gürcan YAVUZ..... 1

BÖLÜM 1

UYKU APNESİNDE EEG VERİLERİNİN SPEKTRAL ANALİZİ

MSc Alican YÖRÜK, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TOSUN..... 3

1. GİRİŞ..... 5

2. TEORİK GENEL BİLGİLER 6

3. ÖZNİTELİK ÇIKARMA YÖNTEMLERİ 12

4. MATERYAL..... 20

5. BULGULAR 21

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 23

KAYNAKLAR..... 25

BÖLÜM 2

METASEZGİSEL ALGORİTMALARIN KARŞILAŞTIRILMASINDA KULLANILAN ÖLÇÜT SETLERİ

Dr. Gürcan YAVUZ..... 29

GİRİŞ..... 31

ÖLÇÜT SETLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ..... 32

ÖLÇÜT SETLERİ..... 33

SONUÇ 51

KAYNAKÇA 52

BÖLÜM 3

DAHA İYİ ÇÖZÜMLERİ EZBERLEYEN KARINCA KOLONİ SİSTEMİNDE (DİÇE-KKS) FEROMON SEVİYESİNİN TRANSFER FONKSİYONLARIYLA BELİRLENMESİ

Dr. Dursun EKMEKÇİ.....	55
GİRİŞ.....	57
1. KARINCA KOLONİ OPTİMİZASYONU (KKO)	58
2. ÖNERİLEN METOT	65
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	69
4. DENEY SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMA	72
5. SONUÇ	74
KAYNAKÇA	76

BÖLÜM 4

AKADEMİK SINAV ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜNDE ÇAKIŞMA MATRİSİ KULLANAN 0-1 TAMSAYILI PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Mutlu AKINCI	79
GİRİŞ.....	81
1. LİTERATÜR TARAMASI.....	83
2. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL	87
3. UYGULAMA.....	93
4. SONUÇ	98
KAYNAKLAR.....	101

ÖNSÖZ

Son yıllarda dijital teknolojilerin gelişiminde baş döndürücü bir artış yaşanmaktadır. Bu artışın hayatın birçok alanında yansımaları mevcuttur. Teknoloji alanında yaşanan bu hızlı gelişim, geleneksel mühendislik alanını da etkilemiş ve “Dijital Mühendislik” kavramı ile tanışmamızı sağlamıştır.

Dijital mühendislik; dijital dönüşüm, Endüstri 4.0, veri bilimi, yapay zekâ, makine öğrenimi, robotik, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, Nesnelerin İnterneti gibi son dönemin popüler konularını içine almaktadır. Bu alanın amacı, geleneksel mühendislik üretimi için teoriler, modeller ve teknolojiler geliştirmektir.

“Dijital Mühendislik” olarak adlandıığımız kitabımız dört bölümden meydana gelmektedir. Her bölüm, kendi alanlarında uzman araştırmacılar tarafından oluşturulmuştur.

İlk bölümde, Alican Yörük ve Dr. Mustafa Tosun, hayatımızın üçte birini geçirmiş olduğumuz uykuya ait bozukluklar ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu bozuklukların başında gelen uyku apnesi tanısında EEG sinyallerinin analizinden faydalanmışlar ve elde ettikleri sonuçları paylaşmışlardır.

İkinci bölümde, Dr. Gürcan Yavuz’a ait bir çalışma yer almaktadır. Bu çalışma, metasezgisel algoritma tasarımında kullanılan ve artık bir standart halini almış olan ölçüt setlerine ve bunlara ait özelliklere değinmektedir.

Üçüncü bölümde, doğadan esinlenen algoritmaların en bilineni olan Karınca Kolonisi Optimizasyon ile ilgili Dr. Dursun Ekmekci'ye ait bir çalışma yer almaktadır. Bu çalışmada yazarın algoritmaya önermiş olduğu yenilikler ve bu yeniklerin sonucunda algoritmanın gelişimi incelenmiştir.

Son bölümde, Dr. Mehmet Mutlu Akıncı günümüzde birçok alanda yaygın şekilde kullanılan çizelgeleme problemini akademik sınav çizelgeleme konusu açısından incelemiştir. Bu problem ile ilgili bir model önermiş ve geçmiş yıllara ait gerçek verileri kullanarak performans araştırması yapmıştır.

Alanında uzmanlar tarafından büyük bir titizlikle hazırlanmış olan bu kitabın, içerisinde yer alan konulara ilgi duyan ve faydalanacak olan bilim insanlarına katkı sağlaması ve onlara yol gösterici olması dileğimizdir.

Dr. Gürcan YAVUZ

BÖLÜM 1

UYKU APNESİNDE EEG VERİLERİNİN SPEKTRAL ANALİZİ¹

MSc Alican YÖRÜK², Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TOSUN³

¹ Bu eser 563906 No'lu 2019 yılında Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İleri Teknolojiler Anabilim Dalı'nda yapılan "Uyku apnesinde EEG verilerinin spektral analizi" isimli yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

² Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 43500, Türkiye

³ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 43500, Türkiye. mustafa.tosun@dpu.edu.tr

1. GİRİŞ

Uyku yaşam için önemli bir süreçtir. İnsan ömrünün de yaklaşık üçte biri uykuda geçmektedir. İnsanlar zihinsel ve bedensel sağlığını korumak için uykuya ihtiyaç duyarlar. Uykusunu tam alamayan kişilerde gündüz aşırı uyku hali ve konsantrasyon eksikliğine neden olmaktadır (Held vd., 2006; Golrou vd., 2015). Bunlar da kişinin sosyal hayatını etkilemekte ve kişinin sağlığında bozulmaya neden olmaktadır. Yaklaşık 90 türde uyku hastalığı vardır (Guijarro-Berdiñas vd., 2012) ve bunların en önemlisi de uyku apnesi adı verilen uykuda solunumun en az 10 sn olarak durmasıdır (Elez ve Ömür, 2008). Uyku apnesi uykuda iken defalarca tekrarlamasına rağmen uyku halinde olunması nedeniyle fark edilmesi de güç olmaktadır. Dünyadaki uyku apnesi hastalarının %80-90'ına henüz tanı konulmadığı hesaplanmıştır; bu oranın Türkiye'de %95-98 olduğu sanılmaktadır (Elez ve Ömür, 2008).

Uyku apnesi, tanısı konulduktan sonra tedavisi mümkün olan bir hastalıktır. Tanısı uyku laboratuvarlarında polisomnografi adı verilen bir yöntemle konulur. Bu yöntemde hastanın vücuduna çeşitli elektrotlar yerleştirilerek bu elektrotlardan alınan veriler kaydedilir. Bu veriler uyku teknisyenleri ve hekimlerin değerlendirmesiyle apnenin çeşidi ve sıklığı hakkında bilgi verir. Bu bilgiler değerlendirilerek hasta için gerekli tedavi yöntemine geçilir.

Bu çalışmada polisomnografi verilerinden elde edilen EEG sinyallerinin güç spektral yoğunluğu hızlı fourier dönüşümü ile hesaplanmış ve spektral entropileri çıkarılmıştır. Çıkarılan sonuçlara

bağlı olarak apne 6ncesi ve apne sırasındaki veriler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına g6re spektral entropi değerlerinin apne 6n belirtisinde bir parametre olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

2. TEORİK GENEL BİLGİLER

2.1. Uyku Apnesi

Uyku apnesi uyku boyunca g6r6len en az 10 sn s6re ile solunumun durması olarak tanımlanır. Hemen hemen her yaş ve cinsiyette g6r6lebilen bu hastalık belirtilerini uyku esnasında g6stermesinden dolayı pek bilinmemektedir. Daha çok obez kişilerde, horlayanlarda ve 6st solunum yolları dar olan bireylerde g6r6lmektedir. Obstr6ktif tip, santral tip ve bileşik tip olmak 6zere 3 tip apne vardır (Papila ve Acioğlu, 2005).

2.1.1. Obstr6ktif (Tıkayıcı) uyku apnesi (OSA)

En sık g6r6len apne Obstr6ktif (Tıkayıcı) uyku apnesidir (Sezgin ve Tagluk, 2013). Bu tip uyku apnesi boğazdaki dokuların uyku esnasında gevşeyerek solunum yolunu tıkaması sonucu oluşur. Tıkanan hava yoluna bağlı olarak solunum durur. Beyin oksijen ihtiyacını hisseder ve uyku derinliğini azaltarak kişiyi uyandırmaya çalışır. Bu kişilerin derin uykuya geçmesi pek m6mk6n değildir.

OSA tipleri AHİ (Apne Hipopne İndeksi) değerlerine g6re belirlenmiştir (izelge 2.1) (Demir vd., 2012). Endeks bir saat içindeki apne sayısını belirtir.

Çizelge 2.1. OSA tipleri.

<u>Apne-Hipopne İndeksi (AHI)</u>	
<u>Hafif Dereceli OSA</u>	<u>5-15 arası</u>
<u>Orta Dereceli OSA</u>	<u>15-30 arası</u>
<u>Ağır Dereceli OSA</u>	<u>30'dan fazla</u>

OSA'ya göre nadir olarak görülen CSA, beynin solunum kaslarına sinyal göndermemesi sonucu oluşur. Kandaki oksijen miktarının azalmasına bağlı olarak kişi uyanır.

Mikst uyku apnesi de denilen bileşik apne, obstrüktif tip ve santral tip apnenin birleşimidir. Başlangıç kısmında tıkaçıcı tip apne özellikleri gösteren bileşik apne daha sonra merkezi uyku apne özelliklerini daha belirgin göstermeye başlar.

Hipopne, apneden ayrı olarak solunumun kısmi olarak azalması anlamına gelir. Apne esnasında solunum %75'ten fazla azalma gösterirken hipopne de ise bu oran %25-45 civarındadır (Bartolo vd., 2001).

2.2. Polisomnografi (PSG)

Uyku hastalıklarının tanısında kullanılan en önemli yöntem polisomnografidir. Uyku laboratuvarlarında uygulanan bu yöntemle kişinin çeşitli bölgelerine yerleştirilen elektrotlar sayesinde tüm gece boyunca uykularında alınan sinyaller kaydedilir. Uyku yapısı ve uyku esnasında vücudunda meydana gelen değişiklikleri içeren bu sinyaller

daha sonra uzman personelle incelenerek hastalığın teşhisi konulur (Bayrak vd., 2011).

Polisomnografide genellikle 12 kanallı kayıtlar kullanılmaktadır. Bunlar; EEG, EOG, EMG, EKG, solunum eforu, hava akımı, horlama, oksijen saturasyonu, pozisyon, karbondioksit ölçümü, vücut ısısı, ses ve video kayıtlarıdır (Koley ve Dey, 2013).

2.3. Elektroensefalografi (EEG)

Elektroensefalografi; beyinde bulunan milyarlarca sinir hücresinin elektriksel yük hareketlerinin sonucu oluşan biyolojik sinyallerin elektriksel yöntemlerle incelenmesidir. İlk kez beyindeki elektriksel aktivitenin varlığını Caton, 1875 yılında hayvanlar üzerinde yaptığı deneyler sonucu ortaya atmıştır. Daha sonra ise 1929 yılında Hans Berger kafaya yerleştirilen elektrotlarla ölçüm yapılarak ilk EEG işaretlerini kendi defterine çizmiş ve bu durum bilimsel olarak kesinlik kazanmıştır (Niedermeyer ve Da Silva, 2004).

2.3.1. Elektroensefalografi işaretleri ve dalga şekilleri

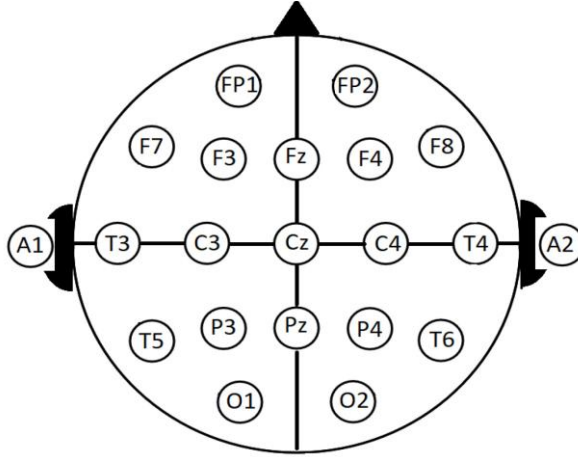
Saç derisi üzerinden ölçülen EEG işaretleri genellikle düşük genlikli işaretlerdir. 1-100 μV arasında bir genliğe sahiptir. Frekans aralıkları ise 0,5-100 Hz gibi geniş bir aralıkta olmasına rağmen klinik çalışmalarının çoğunda 0,5-40 Hz arasındaki frekans bandı kullanılmaktadır.

EEG çalışmalarının en başından beri yapılan araştırmalar sonucunda insan beyninin uyku, dinlenme, çalışma gibi farklı zihinsel aktivite seviyelerinde EEG işaretlerinin de farklılaştığı tespit edilmiştir. Farklı

seviyelerde yoğunlaşan bu EEG frekansları özel isimler verilerek 4 frekans bandına ayrılmıştır. Bunlar; Alfa Dalgaları (8-14 Hz), Beta Dalgaları (14-40 Hz), Delta Dalgaları (0,5-4 Hz), Teta Dalgaları (4-8 Hz)'dir (Duffy vd., 1989; Aydemir ve Kayıkçıoğlu, 2009; Al-Kadi vd., 2013).

2.3.2. Elektroensefalografi elektrot yerleşim sistemi

Biyoelektrik işaretlerini elektrik işaretlerine çeviren algılayıcılar elektrotlardır. Kullanıldığı alana göre farklı özelliklere sahip elektrotlar vardır. Kuru ve ıslak elektrotlar, iğne tip elektrotlar, kafa bantları ve başlıklar bunlardan bazılarıdır. EEG kayıtlarında elektrotların kafa yüzeyine yerleştirilmeleri için uluslararası standartlar geliştirilmiştir. Bu standartlar; 10/20, 10/10 ve 10/5 sistemidir. Uluslararası Elektroensefalografi ve Klinik Nöropsikoloji Federasyonu tarafından belirlenen 10-20 elektrot yerleştirme sistemi en yaygın kullanılan sistemdir (Malmivuo vd., 1995). Şekil 2.1'de bu yerleşim sistemi görölmektedir.



Şekil 2.1. Uluslararası 10/20 sistemi elektrot yerleşimi (Tosun vd., 2018).

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi her elektrot bazı harfler ve rakamlarla sembolize edilmiştir. Buradaki harfler elektrotun beynin hangi bölgesine yerleştirildiğini, sayılar ise beynin sağ ve sol lobundan hangisinde olduğunu ifade eder. Sol lob için tek rakamlar, sağ lob için de çift rakamlar kullanılmıştır. Harfler F: frontal (ön lob), Fp: frontal kutup (pole), C: central (merkez), T: temporal (şakak lobu), P: parietal (yan lob), O: oksipital (arka lob), A: auriküler (kulak) elektrotu için sembolize edilmiştir.

2.3.3. Elektroensefalografi sinyallerini ön işleme

EEG işaretleri elektrotlar yardımıyla ölçüldükten sonra işlenebilmesi için çeşitli işlemlerden geçmektedir. Çünkü EEG işaretleri karmaşık ve düşük genlikli sinyallerdir. Ayrıca ölçme sırasında çeşitli ortamlardan kaynaklanan parazit ve gürültüler de doğru bir şekilde ölçüm yapılmasını etkilemektedir. Bu nedenle genlikleri düşük olan işaretler

önce kuvvetlendirilmeli, parazit ve gürültüden temizlenmesi için filtre yapılarından geçirilip kayıt ortamına aktarılmalıdır.

Düşük genliğe sahip μV seviyesindeki EEG sinyallerinin daha detaylı bir şekilde incelenip yorumlanabilmesi için yükseltilmesi gerekmektedir. Genellikle EEG gibi çok küçük sinyaller diferansiyel kuvvetlendiriciler yardımı ile yükseltilir. Optimum sinyal kalitesi ve sonraki sinyal işleme aşamaları için yeterli bir gerilim seviyesi sağlayabilmek ve sinyal gürültü oranını koruyabilmek amacıyla, kuvvetlendiricilerin 100 ile 100 000 arasında değişebilen bir kazanç seviyesi sağlayabilmesi uygun olacaktır (Nagel, 2000). Ayrıca ortamdaki elektriksel gürültüleri bastırabilmek için diferansiyel kuvvetlendiricilerin ortak mod bastırma oranlarının (en az 100 dB) ve giriş empedanslarının yüksek olması (en az 100 M Ω) istenir (Teplan, 2006).

EEG sinyallerini gürültü ve diğer etkenlerden temizleyebilmek amacıyla çeşitli filtre yapıları kullanılmaktadır (Wu vd., 1997). Genellikle kullanılan frekans değeri 0,5-40 Hz arasında olduğundan bu değerlere uygun filtre seçilir. Yüksek geçiren filtre yapısı, sinyali bozabilecek olan solunum ve kan akışı gibi düşük frekans bileşenlerinin ve DC bileşen etkisinin bastırılması amacıyla kullanılır. Bu filtrelerin kesim frekansı (f_c) genellikle 0,1-0,7 Hz aralığında seçilir (Teplan, 2006). Alçak geçiren filtre, EEG sinyalini yüksek frekansların bozucu etkilerinden arındırmak amacıyla kullanılır. EEG bilgisi 0,5-40 Hz aralığında olduğu için genelde kesim frekansları 40 Hz olarak belirlenir.

Ayrıca alçak geçiren filtre, sinyali örnekleme frekansının oluşturabileceği girişim etkilerinden de korumuş olur (Teplan, 2006).

DC bir kaynaktan beslenmeyen EEG sistemlerinde, şebekenin bozucu etkileri ölçülen sinyal üzerinde bozucu bir etki oluşturur. Çentik (Notch) filtre, sinyal üzerine etkiyen şebeke frekansı gürültüsünü (50 Hz) bastırmak için kullanılır (Nagel, 2000; Teplan, 2006). Alınan işaretlerin sayısal ortamda kaydedilmesi ve işlenebilmesi için dijital verilere çevrilmesi gerekmektedir. EEG işaretleri analog olup sürekli sinyallerdir. Bu sinyallerin belli aralıklarla alınıp bit karşılıkları hesaplanarak ayırık zamanlı dijital sinyallere dönüştürülür. Dijital formata dönen bu EEG işaretleri bilgisayar ortamına aktararak kaydedilir (Gray, 2003; Gotman, 2009).

3. ÖZİNİTELİK ÇIKARMA YÖNTEMLERİ

EEG işaretlerindeki verileri analiz edebilmek için EEG işaretlerini tanımlayan çeşitli öznelikler vardır. Bunlar EEG işaretlerinin hem zamansal hem de frekans özelliklerinin belirlenmesi için ileri düzey sinyal işleme teknikleridir. Çizelge 3.1’de bu öznelikler sıralanmıştır.

Çizelge 3.1. Öznitelik tablosu.

No	Öznitelik	No	Öznitelik
1	Minimum değer (MinV)	12	Hjorth karmaşıklığı (HC)
2	Maksimum değer (MaxV)	13	Petrosian fractal uzunluğu (PFD)
3	Standart Sapma (SD)	14	Ortalama eğri uzunluğu (MCL)
4	Aritmetik ortalama (AO)	15	Ortalama enerji (ME)
5	Varyans (V)	16	Ortalama teager enerjisi (MTE)
6	Skewness (SK)	17	Wigner ville dönüşümü
7	Kurtosis (KH)	18	Spektral entropi (SpEn)
8	Medyan (MN)	19	Rényi entropi (REn)
9	Sıfır geçiş sayısı (ZC)	20	Yaklaşık entropi (ApEn)
10	Hjorth aktivitesi (HA)	21	Permütasyon entropi (PEn)
11	Hjorth hareketliliği (HM)		

3.1. Zaman Tabanlı Öznitelikler

3.1.1. İstatiksel öznitelikler

EEG işaretlerinin istatistiksel öznitelikleri Çizelge 3.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. İstatiksel öznitelikler.

Öznitelik	Formül
Minimum Değer (Min V)	$\text{MinV} = \min[x_n]$
Maksimum Değer (Max V)	$\text{MaxV} = \max[x_n]$
Standart Sapma (SD)	$\text{SD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \text{AO})^2}{N - 1}}$
Aritmetik Ortalama (AO)	$\text{AO} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n$
Varyans (V)	$\text{V} = \frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \text{AO})^2}{N - 1}$
Çarpıklık (Skewness, S)	$\text{S} = \frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \text{AO})^3}{(N - 1)\text{SD}^3}$
Basıklık (Kurtosis, K)	$\text{K} = \frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \text{AO})^4}{(N - 1)\text{SD}^4}$
Medyan Değeri (MN)	$\text{MN} = \left(\frac{N + 1}{2}\right)^{\text{th}}$ $\text{MN} = \frac{\left(\frac{N}{2}\right)^{\text{th}} \text{value} + \left(\frac{N}{2} + 1\right)^{\text{th}} \text{value}}{2}$

Burada x_n bir zaman serisidir. N data sayısı ve AO örneklerin ortalamasıdır. Sıfır geçiş sayısı (Number of zero crossing, ZC), Elektronik, matematik, görüntü işleme ve sinyal işleme alanlarında yaygın kullanılan zaman temelli bir özniteliktir. Bu öznitelik örnekler

arasında işaret farkı olduğu zaman meydana gelen sıfır geçişlerinin sayısını ifade eder. EEG sinyallerindeki sıfır geçiş sayısının uykunun farklı evrelerinde ve beyin aktivitesi sırasında değiştiği gözlemlenmiştir. Sıfır geçiş sayısı şu şekilde hesaplanır: ($x_{n-1} < 0$ ve $x_n > 0$) veya ($x_{n-1} > 0$ ve $x_n < 0$) veya ($x_{n-1} \neq 0$ ve $x_n = 0$) (Quyen vd., 1999; Boostani vd., 2003). Hjorth parametreleri: Uyku evrelerinin sınıflandırması ile ilgili çalışmalarda hjorth parametreleri EEG sinyal analizinde de sık sık kullanılmaktadır (Hjorth, 1975). Hjorth parametreleri Çizelge 3.3'te görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.3. Hjorth parametreleri.

Özniteli k ismi	Hjorth Aktivitesi (HA)	Hjorth Hareketliliği (HM)	Hjorth Karmaşıklığı (HC)
Formül	$HA = \sigma_0^2$	$HM = \sigma_1 / \sigma_0$	$HC = \sqrt{(\sigma_2 / \sigma_1)^2 - (\sigma_1 / \sigma_0)^2}$

3.2. Lineer Olmayan Öznitelikler

Petrosian fraktal boyutu (Petrosian fractal dimension, PFD): Fraktal Boyut, bir sinyalin karmaşıklığını hesaplayan kaotik bir yöntemdir (Petrosian, 1995). PFD;

$$PFD = \log_{10} k / (\log_{10} k + \log_{10} (k / (k + 0.4N_\delta))) \quad (3.1)$$

olarak hesaplanır. Burada k sinyalin örneklerinin sayısı ve N_δ sinyal türevlerindeki işaretlerin değişikliklerin sayısını ifade etmektedir.

Ortalama eğri uzunluğu (Mean curve length, MCL): EEG sinyallerinin aktivite tespitinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Esteller vd., 2001). MCL;

$$\text{MCL}[n] = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k |x[m] - x[m-1]| \quad (3.2)$$

olarak hesaplanır. Burada $x[m]$ bir EEG zaman serisi, N pencere uzunluğu ve k epoktaki en son örnektir.

Ortalama Enerji (Mean energy, ME): Farklı uyku evrelerinde farklı aktiviteler gözlemlenmiştir. Sinyallerin enerji değerlerinin de aktivite arttıkça artması dikkate alındığında ölçümlerde ortalama enerji daha doğru sonuçlar verecektir (Gardner vd., 2006). ME;

$$\text{ME}[n] = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+1}^k x[m]^2 \quad (3.3)$$

olarak hesaplanır. Burada $x[m]$ bir EEG zaman serisi, N pencere uzunluğu ve k epoktaki en son örnektir. Ortalama Teager Enerjisi (Mean Teager Energy MTE): EEG araştırmalarında yaygın olarak kullanılan diğer bir öznelik değeridir (Kaiser, 1990). MTE;

$$\text{MTE}[k] = \frac{1}{N} \sum_{m=k-N+3}^k (x(m-1)^2 - x[m]x[m-2]) \quad (3.4)$$

olarak hesaplanır. Burada $x[m]$ bir EEG zaman serisi, pencere uzunluğu ve k epoktaki en son örnektir.

3.3. Frekans Tabanlı Öznitelikler

Wigner-Ville dönüşümü (WV): Frekansın zamana bağlı dağılımıdır. Sinyal analizinde potansiyel olarak zamanla değişen sinyaller için kullanılan bir dönüşüm yöntemidir (Semmlow, 2004). Dönüşüm;

$$WV(t, \omega) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} f\left(t + \frac{t_0}{2}\right) f^*\left(t - \frac{t_0}{2}\right) e^{-j\omega t_0} d\omega_0 \quad (3.5)$$

olarak hesaplanır. Burada $WV(t, f)$, $f(t)$ sinyalinin t anındaki ve f frekansındaki enerji dağılımıdır. f^* , f 'in kompleks eşleniğini temsil eder. ω frekans değeridir.

Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT): Çeşitli genlik ve frekanstaki birçok sinüs sinyalinin toplamı şeklinde ifade edilen işlemlere fourier analizi denilmektedir. Buradaki en düşük frekanslı sinüs sinyali birinci harmonik denilen temel dalga, diğerleri ise bu sinyalin harmonik bileşenleridir. İşlem sonunda A_0 , A_n , B_n katsayıları hesaplanarak dalgaların genlikleri bulunmuş olur. Burada n indisi harmonik mertebesini göstermekte olup, A_n ve B_n n . harmoniğin bileşenleridir. İntegral alma işlemi ile yapılan fourier analizi dönüşüm süresini uzatmaktadır (Ertürk, 2005).

Daha sonraları periyodik olmayan sinyallerin de analizini yapmak için Ayrık Fourier Dönüşüm (AFD) yöntemi tanımlanmıştır. Bu yöntemde de uzun olan dönüşüm süresini kısaltmak için daha sonraları Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD) yöntemi geliştirilmiştir. Uygun veri sayısının ($2n$, $n = +$ tamsayı) işlenmesi ile HFD dönüşümünün hızlı olması sağlanmıştır. Bir işaretin ayrık fourier dönüşümü;

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]. e^{-j.\omega.n} \quad (k = 0,1, \dots, N - 1) \quad (3.6)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Bu durumda, dönüşümün her k değeri için N adet karmaşık çarpma ve N-1 adet karmaşık toplama işlemi yapılması gerekmektedir. N noktalı bir ayrık fourier dönüşümü için N^2 ile orantılı bir hesap yükü anlamına gelmektedir. Ayrık fourier dönüşümündeki faz faktörü,

$$W_n = e^{-j.(2.\frac{\pi}{N})} \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Faz faktörünün simetri özelliği,

$$W_N^{k+N/2} = -W_N^k \quad (3.8)$$

ifadesini; faz faktörünün periyodiklik özelliği de,

$$W_N^{k+N} = W_N^k \quad (3.9)$$

ilişisini vermektedir. Hızlı fourier dönüşümü, ayrık fourier hesabı için faz faktörünün simetri ve periyodiklik özelliğinden faydalanılarak daha hızlı bir hesaplama sağlamaktadır (Şenyurt, 2006).

Spektral Güç Yoğunluğu (PSD): Spektral güç yoğunluğu kestirimi için periyodogram yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemin temeli fourier dönüşümüne dayanmaktadır. İşaret 64, 128 ve 256 gibi çerçevelere bölünüp bölümlere ayrılır ve her bir bölümün Fourier dönüşümünün ortalaması alınıp güç spektrumu hesaplanır (Semmlow, 2004).

Welch Metodu: Sonlu veri setlerinin bölümlerde oluşan sızıntılar spektral kestirimin eksikliğidir. Welch yöntemi bu sorunu çözmek amacıyla geliştirilmiştir. Welch yöntemi güç spektral yoğunluğunu iyileştirilmiş periyodogramların ortalamasını alarak kestirir. i'inci iyileştirilmiş periyodogram:

$$\widehat{S}_{xx}^l(f) = \frac{Y_s}{K.M} \left| \sum_{n=1}^{M-1} x_i(n)w(n)e^{-j2\pi 2\pi} \right|^2 \quad (3.10)$$

şeklinde verilir. Burada $f = f_s$ normalize edilmiş frekans değişkeni, Y_s ölçekleme faktörü, $w(n)$ pencereleme fonksiyonu ve K normalize sabiti olup aşağıdaki ifade verilir.

$$K = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} W^2(n) \quad (3.11)$$

Welch metodu güç spektral yoğunluğu kestirimi:

$$\widehat{P}_w(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \widehat{S}_{xx}^l(f) \quad (3.12)$$

ifadesiyle verilir. Burada L işaretin uzunluğudur (Türk vd., 2015).

3.4. Entropi Tabanlı Öznitelikler

Entropi kavramı, bir olay hakkındaki belirsizliğin, düzensizliğin matematiksel ölçüsü olarak tanımlanabilir. 1948'de elektronik mühendisi ve matematikçi olan Claude Elwood Shannon ile ortaya çıkmıştır (Shannon, 1948). Entropi;

$$H(x) = - \sum_{i=1}^N p(X_i) \log p(X_i) \quad (3.13)$$

olarak hesaplanır. Burada, $p(X_i)$ mümkün olabilecek olan olasılıkları, N ise sinyal uzunluğunu ifade etmektedir.

Spektral Entropi (SpEn): Karmaşık sinyallerdeki düzenlilik derecesini belirleyen entropidir. Düzgün olasılık değerlerine sahip olan bir sinyalin entropisi yüksek, düzensiz olasılık değerlerine sahip bir sinyalin entropisi düşük olacaktır. Entropiden farklı olarak güç spektral yoğunluğunun olasılık değerini hesaplar (Sabeti vd., 2009). SpEn;

$$SEN = \sum_f p_f \log \frac{1}{p_f} \quad (3.14)$$

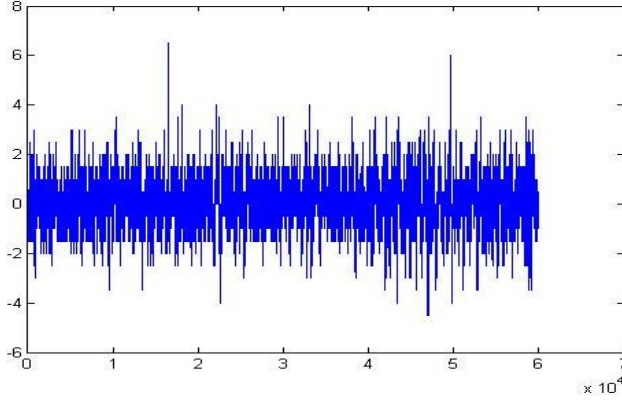
olarak hesaplanır.

4. MATERYAL

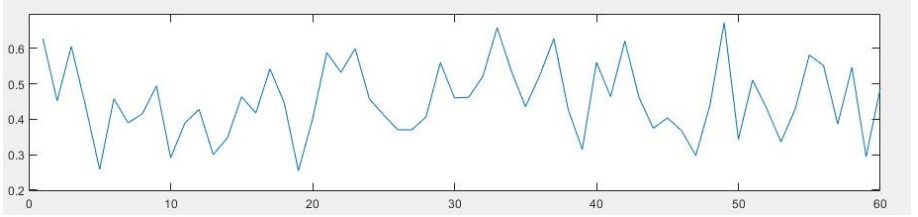
Bu çalışmada, Belçika Mons Üniversitesi TCTS Laboratuvarından elde edilen uyku apnesi ile ilgili veriler kullanılmıştır (Mons Üniversitesi, 2008). Bu veriler, 12 hastaya ait tüm gece polisomnografi kayıtlarından oluşmaktadır. Kayıtlar kliniğe başvuran hastalardan rastgele seçilmiş olup, hastaların hangi zaman diliminde, hangi tür apneye girdiği ve apne süresi, her hasta için hekimler tarafından ayrıntılı olarak belirlenmiş ve paylaşılmıştır.

Polisomnografi kayıtları dört kanal EEG (FP1-A2), (FP2-A1), (O1-A1), (CZ-A1); sol EOG, sağ EOG; EMG (çene), iki kanal EKG, bir solunum kanalı, bir vücut sıcaklığı kanalı, bir pozisyon kanalı, iki bacak hareketi kanalı, bir göğüs hareketi kanalı, bir karın hareketi kanalı, bir nabız kanalı, bir mikrofon kanalı içermektedir. EEG işaretlerinin örnekleme frekansı 200 Hz'dir. Uyku kayıtları 300 sn'lik dilimler şeklinde alınmıştır.

İlk aşamada EEG sinyallerinin (Şekil 4.1) Welch yöntemiyle spektral güç yoğunluğu bulunmuştur. Daha sonra sinyallerin spektral entropisi (Şekil 4.2) çıkartılarak sonuçlar analiz edilmiştir.



Şekil 4.1. Hasta 1'e ait EEG sinyalinin görüntüsü.

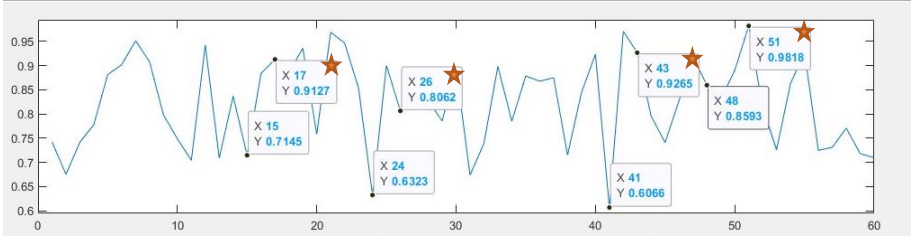


Şekil 4.2. Hasta 1'e ait EEG sinyalinin spektral entropisi.

5. BULGULAR

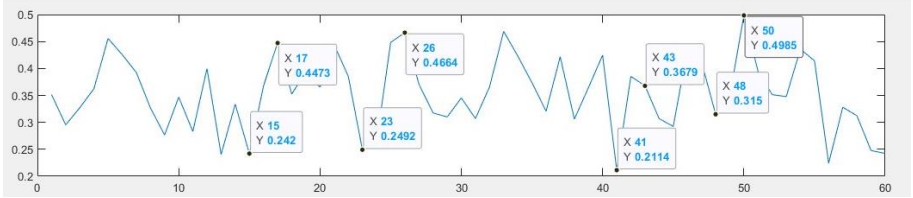
Bu çalışmada, polisomnografi kayıtlarından elde edilen EEG sinyalleri kullanılmıştır. EEG sinyallerinin güç spektral yoğunlukları bulunup spektral entropileri çıkarılarak uyku apnesi anındaki analizi yapılmıştır. Analiz için her bir hastanın ayrı ayrı EEG kanalları ve bu kanallardaki tüm EEG bantlarının entropileri incelenmiş ve bu çalışmada elde edilen spektral entropinin minimuma düşme verileriyle karşılaştırılmıştır.

Hasta 3'e ait EEG sinyalinin Fp1_A2 kanalının 1-4 Hz bandındaki spektral entropisi ve apne başlangıç zamanları Şekil 5.1'de verilmiştir. Uzman tarafından hastanın apneye girdiği zamanlar yıldız şekliyle işaretlenmiştir. İşaretli olmayanlar ise spektral entropinin apneden önce minimuma indiği noktalarıdır.



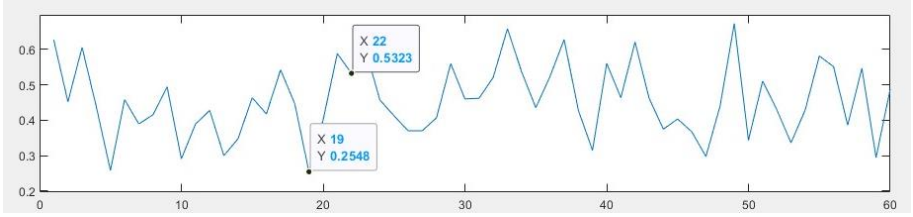
Şekil 5.1. Hasta 3 için Fp2_A1 kanalı 1-4 Hz spektral entropi değişim grafiği

Hasta 3'den elde edilen 4-8 Hz arası spektral entropi değişimine ait grafik Şekil 5.2'de verilmiştir. Benzer şekilde apneye girmeden 2 saniye önce spektral entropi değerleri minimuma ulaşmaktadır.



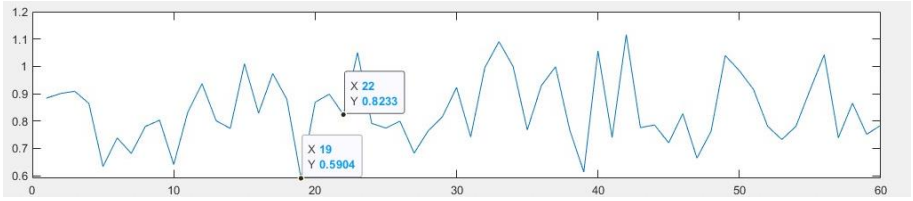
Şekil 5.2. Hasta 3 için Fp2_A1 kanalı 4-8 Hz spektral entropi değişim grafiği

Hasta 1'e ait EEG sinyalinin Fp1_A2 kanalının 1-4 Hz bandındaki spektral entropisi ve apne başlangıç zamanları Şekil 5.3'de verilmiştir. Uzman tarafından hastanın apneye girdiği zamanlar yıldız şekliyle işaretlenmiştir. İşaretli olmayanlar ise spektral entropinin apneden önce minimuma indiği noktalarıdır.



Şekil 5.3. Hasta 1 için Fp2_A1 kanalı 1-4 Hz entropisi.

Hasta 1'den elde edilen 4-8 Hz arası spektral entropi değişimine ait grafik Şekil 5.4'de verilmiştir. Benzer şekilde apneye girmeden 2 saniye önce spektral entropi değerleri minimuma ulaşmaktadır.



Şekil 5.4. Hasta 1 için Fp2_A1 kanalı 4-8 Hz entropisi.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Apne hastalığının teşhisi ve tedavisi hastaların kaliteli uyku alması için önemlidir. Apneye giren hastalara oksijen verilerek tıkanan nefes borusu açılmakta ve hasta uykusuna devam etmektedir. Bu çalışmada apne anındaki EEG sinyalleri kullanılarak verilerin analizi amaçlanmıştır. Apne anındaki EEG sinyallerinin analizi için PSG'den alınan EEG kayıtları içerisindeki Fp1-A2, Fp2-A1, Cz-A1, O1-A2 elektrotundan 200 Hz örnekleme frekansı ile alınan sinyaller kullanılmıştır. Elde edilen sinyal 300 sn'lik dilimlere ayrılmış ve her bir dilim için 5 sn'lik kısımlarının güç spektrumları FFT ile elde edilmiştir.

Daha sonra FFT dönüşümünden elde edilen güç spektrum değerleri kullanılarak spektral entropi değerleri hesaplanmıştır. Her bir örnekleme frekans aralığındaki spektral entropi değişimleri incelendiğinde hastanın apneye girmeden yaklaşık 2 saniye öncesinde spektral entropi değerlerinin minimum seviyelere ulaştığı görülmüştür.

Ayrıca, kullanılan kanallardan Fp2_A1 kanalından alınan verilerin diğer kanallara göre daha iyi sonuç verdiği; kullanılan bant aralıklarında ise 1-4 Hz ve 4-8 Hz bandının diğer bantlara göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Al-Kadi, M. I., Mamun, B. I. R. ve Mohd, A. M. A. (2013). Evolution of electroencephalogram signal analysis techniques during anesthesia. *Sensors* 13(5): 6605-6635.
- Aydemir, Ö. ve Kayıkçıoğlu, T. (2009). Akademik Bilişim'09-XI. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, Türkiye.
- Bartolo, A., Clymer, B. D., Burgess, R. C., Turnbull, J. P., Golish, J. A., Perry, M. C. (2001). An arrhythmia detector and heart rate estimator for overnight polysomnography studies. *IEEE transactions on biomedical engineering*, Cilt 48, no. 5, s. 513-521.
- Bayrak, T., Koçak, O., Erdamar, A. (2011). Uyku Bozukluklarının Araştırılmasında Biyomedikal Mühendislik Yaklaşımları, TMMOB EMO Ankara Şubesi Haber Bülteni.
- Boostani R., Moradi, M. H. (2003). Evaluation of the Forearm EMG Signal Features for the Control of a Prosthetic Hand. *Physiological Measurement*, Cilt 24, s. 309-319.
- Demir, A., Ursavaş A., Aslan, A. T., Gülbay, B., Çiftçi, B., Çuhadaroğlu, Ç., Keyf, F., Fırat, H., Yılmaz, M., Gerek, M., Köktürk, O., İtil, O., Karakoç, Ö., Başoğlu, Ö. K., Ersu, R., Ardıç, S., Öktem, S., Güven, S. F., Çiftçi, T. U. (2012). Türk Toraks Derneği Obstrüktif Uyku Apne Sendromu Tanı Ve Tedavi Uzlaşı Raporu, Rapor Editörü: Tansu Ulukavak Çiftçi. Elez, F., Ömür, M. (2008). Obstrüktif uyku apnesi sendromu. *Türk Aile Hekimleri Dergisi*, 12,(2): 65-69.
- Ertürk, S. (2005). Sayısal işaret işleme. Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul, 85-97, 111-133, 145-153.

- Esteller, R., Echaus, J., Tcheng, T., Litt, B. ve Pless, B. (2001). Line length: an efficient feature for seizure onset detection. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, İstanbul*, 1707- 1710.
- Frank H., Iyer, V. G. ve Surwillo, W. W. (1989). *Brain Electrical Activity: An Introduction to EEG Recording. Clinical Electroencephalography and Topographic Brain Mapping*, Springer New York, 1-10.
- Gardner, A. B., Krieger, A. E., Vachtsevanos, G. ve Litt, B. (2006). One-Class Novelty Detection for Seizure Analysis from Intracranial EEG. *Journal of Machine Learning Research, Cilt 7*, s. 1025-1044.
- Gray, N. (2003). *Abcs of ADCs*. National Semiconductor Corporation. Golrou, A., Maghooli, K., Amiri, A. M., Mankodiya, K., Ghaemi, K. (2015, Aralık). Automatic sleep apnea detection using fuzzy logic. *Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB) 2015 IEEE*, s. 1-5.
- Gotman, J. (2009). *Digital EEG From Basics to Advanced Analaysis*. McGill University, Montreal Neurological Institutue.
- Guijarro-Berdiñas, B., Hernández-Pereira, E., Peteiro-Barral, D. (2012). A mixture of experts for classifying sleep apneas. *Expert Systems with Applications*, 39, 7084-7092.
- Held, C. M., Heiss, J. E., Estévez, P. A., Perez, C. A., Garrido, M., Algarín, C., Peirano, P. (2006). Extracting fuzzy rules from polysomnographic recordings for infant sleep classification. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Cilt 53, no. 10, s. 1954-1962.
- Hjorth, B. (1975). Time domain descriptors and their relation to a particular model for generation of EEG activity. *CEAN – Computerized EEG analysis, Stuttgart*, 3-8.

- Kaiser, J. F. (1990). On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'90), USA, 1: 381-384.
- Koley, B., Dey, D. (2013). Classification of Sleep Apnea using Cross Wavelet Transform, IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems.
- Malmivuo, P., Malmivuo, J. ve Plonsey, R. (1995). Bioelectromagnetism: principles and applications of bioelectric and biomagnetic fields. USA, Oxford University Press.
- Mons Üniversitesi, (2008). [http://www.tcts.fpms.ac.be/~devuyt/Databases/ Database Apnea /](http://www.tcts.fpms.ac.be/~devuyt/Databases/Database_Apnea/) Nagel, J. H. (2000). Biopotential amplifiers. The Biomedical Engineering Handbook.
- Niedermeyer, E. ve Da Silva, F. H. L. (2004). Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications and Related Fields. 5th edition, Lippincott Williams and Wilkins, ABD.
- Papila, İ., Acioğlu, E. (2005). Obstrüktif Uyku Apne Sendromu. Klinik gelişim, 18(1):42-50.
- Petrosian, A. (1995). Kolmogorov complexity of finite sequences and recognition of different preictal EEG patterns. IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems, Texas, 212-217.
- Sabeti, M., Katebi, S. ve Boostani, R. (2009). Entropy and complexity measures for EEG signal classification of schizophrenic and control participants. Artificial Intelligence in Medicine, 47: 263-274.
- Semmlow, J. (2004). Biosignal and biomedical image processing MATLAB based applications. (1st ed.), New York: Marcel Decker, 150-165.

- Sezgin, N., Tagluk, M. E. (2013). Diagnosing apnea using extreme learning machine with bicoherence features of snore signals. *AWERProcedia Information Technology & Computer Science*, Cilt 03, 841-846, 3rd World Conference on Information Technology (WCIT-2012).
- Shannon, C. E. (1948). Communication theory of secrecy systems. *Bell system technical journal*, 28(4):656-715.
- Şenyurt, Ö. (2006). Elektrik Tesislerinde Hızlı Fourier Dönüşümü İle Harmonik Analizinin Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Teplan, M. (2006). Fundamentals of EEG measurement. *Measurement science review*, 2(2):1-11.
- Tosun, M., Erginli, M., Kasım, Ö., Uğraş, B., Tanrıverdi, Ş., Kavak, T. (2018). EEG Verileri Kullanılarak Fiziksel El Hareketleri ve Bu Hareketlerin Hayalinin Yapay Sinir Ağları İle Sınıflandırılması. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 1(2), 1-9.
- Türk, Ö., Özerdem, M. S., Akpolat, N. (2015). Gözler açık/kapalı durumunda EEG bantlarındaki frekans değişiminin Güç Spektral Yoğunluğu ile belirlenmesi. *Mühendislik Dergisi*, 6(2), 131-138.
- Quyen, M. L. V., Martinerie, J., Baulac, M. ve Varela, F. (1999). Anticipating epileptic seizures in real time by a non-linear analysis of similarity between EEG recordings. *Neuroreport*, 10:2149-215.
- Wu, J., Ifeachor, E. C., Allen, E. M., Wimalaratna, S. K., Huson, N. R. (1997). Intelligent artefact identification in electroencephalography signal processing. *IEEE Proceedings of Science, Measurement and Technology*, 144, 5, 193-201.

BÖLÜM 2

METASEZGİSEL ALGORİTMALARIN KARŞILAŞTIRILMASINDA KULLANILAN ÖLÇÜT SETLERİ

Dr. Gürcan YAVUZ¹

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği
Bölüm, gurcan.yavuz@dpu.edu.tr

GİRİŞ

Metasezgisel algoritmalar, belirli bir probleme özgü olmayan optimizasyon için kullanılan “Yaklaşık Algoritmalar”dır (Approximate Algorithms) (Blum & Raidl, 2016). Basit yapıları, Np-Hard problemlerinde gösterdikleri üstün performans, bu algoritmaların mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmasını ve yeni varyantlarının üretilmesini sağlamıştır (Mahdavi, Shiri, & Rahnamayan, 2015).

Metasezgisel algoritmaların yenilerinin üretilmesi ve daha sonra gerçek dünya problemlerinin çözümlerinde kullanılması için test edilmeleri gerekmektedir. Algoritmalar, geliştiricileri tarafından test edilerek daha sonra uygulanacak problemlerde etkin sonuçlar üretebilmeleri için en iyi hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için araştırmacılar, optimizasyon alanının bir standart halini almış ölçüt setlerinden faydalanmaktadırlar. Bu setler, birbirlerinden farklı sayılarda ve çeşitli özelliklerdeki fonksiyonlara sahiptirler. Ayrıca her bir setin kendine has değerlendirme kriterleri vardır.

Algoritma değerlendirmede kullanılması için çok sayıda ölçüt setinin bulunması, araştırmacıların farklı alternatiflerinin olması yönünden yararlı olmaktadır. Böylelikle algoritmalarını farklı özelliklere sahip fonksiyonlar ile test etme imkanları olmaktadır. Buna karşın bu kadar ölçüt seti içinden algoritma geliştiricilerinin bir seçim yapma işi zorlaşmaktadır. Bir seçimin yapılabilmesi içinde bu setlere ait

fonksiyonların özelliklerinin bilinmesi ve ölçüt setlerinin çalışma şartlarına hâkim olunması gerekmektedir.

Bu çalışmada artık bir standart halini almış gerçek parametre optimizasyonunda yoğun olarak kullanılan başlıca ölçüt setlerine ve bunların çalışma şartlarına değinilecektir.

ÖLÇÜT SETLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde, ölçüt setlerinde yer alan problemlerin özelliklerini tanımlamada kullanılan bazı terimler kısaca açıklanacaktır.

Döndürülmüş Fonksiyonlar (Rotated)

Döndürülmüş fonksiyon elde etmek için dik bir M matrisi kullanılır. Bunun için $y = M \times X$ hesaplanır. Uygunluk fonksiyonu hesaplanırken x yerine y kullanılmaktadır (Salomon, 1996)(Beheshti, Shamsuddin, & Hasan, 2013). Döndürülmüş fonksiyon sayesinde fonksiyonun karmaşıklığı artmakta böylelikle fonksiyonun çözülmesi zorlaşmaktadır.

Ötelenmiş Fonksiyonlar (Shifted)

Bir fonksiyonun şekli değiştirilmeden her bir boyutta optimum değerinin farklı bir değer ile ötelenmesidir (De Falco, Della Cioppa, & Trunfio, 2019). Bu sayede fonksiyon karmaşıklığı artırılarak fonksiyonun çözülmesi zorlaştırılmaktadır.

Hibrit Fonksiyonlar (Hybrid)

Çözüm vektörü 3 veya 5 gruba rastgele olarak ayrılmaktadır ve her grup farklı bir temel fonksiyon ile hesaplanmaktadır (Tanabe & Fukunaga, 2014).

Kompozit (Composition)

Kompozit fonksiyonlar, rastgele yerleştirilmiş bir global optimum değeri elde etmek için temel bazı fonksiyonları kullanmaktadır. Böylece fonksiyonun çözülmesi daha zorlaşmaktadır (Zhang & Shi, 2018).

Ayrılabilirlik

Ayrılabilirlik (Separability), bir fonksiyonun tanımlanmasında kullanılan bir özelliktir. Eğerki bir fonksiyon, bir veya daha fazla fonksiyonun toplamı şeklinde yeniden ifade edilebilirse bu fonksiyona ayrılabilir (separable) denir (Garden & Engelbrecht, 2014). Eğer ifade edilemez ise ayrılamaz (non-separable) fonksiyon olarak tanımlanır.

ÖLÇÜT SETLERİ

Bu bölümde gerçek parametre optimizasyonu alanında standart halini almış bazı ölçüt setlerine ve bunlarda yer alan problemlere kısaca değinilecektir.

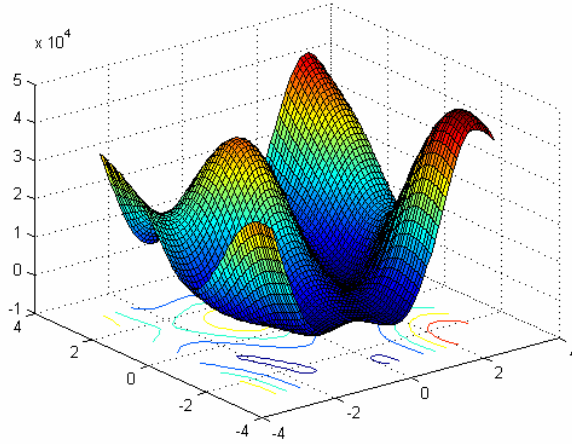
CEC 2005 Ölçüt Seti

Optimizasyon algoritmalarının performans testleri için kullanılan ölçüt setlerinin başında Evrimsel Hesaplama Kongresindeki Real Parametre Optimizasyonu (CEC) özel oturumlarında kullanılan ölçüt setleri gelmektedir. Aslında bu CEC oturumları, her yıl dünya üzerinde farklı ülkelerde düzenlenen ve algoritma tasarımcılarının geliştirdikleri algoritmaları yarıştırdıkları bir yarışmadır. Bu oturuma katılan geliştiriciler yarışma kriterlerini uygulayarak algoritmaları ile sonuçlar elde ederler. Bütün katılımcıların sonuçları karşılaştırılarak kazanan algoritma ilan edilir.

CEC ölçüt setlerinin en bilineni 2005 yılında düzenlenen Evrimsel Hesaplama Kongresindeki Real Parametre Optimizasyonu özel oturumuna ait ölçüt setidir. Kısaca CEC 2005 olarak bilinen bu set toplam 25 adet fonksiyon içermektedir (Suganthan vd., 2005). Ölçüt setinde yer alan problemler birbirinden zor ve farklı özelliklere sahiptir (Şekil 1). Bu fonksiyonlar dört grup altına toplanmaktadır. Bunlar; f1-f5 unimodal, f6-f12 multimodal, f13-f14 expanded ve f15-f25 hibrittir. Test setinde yer alan bütün problemler 10, 30, 50 adet değişken için çözülmektedir. Ölçüt setinde yer alan problemler Tablo 1’de listelenmiştir. Bu set içerisinde yer alan problemler farklı arama aralıklarına sahiptir.

Ölçüt seti, JAVA, C ve Matlab kodu şeklinde dağıtılmaktadır. Araştırmacılar, geliştirdikleri algoritmaların performansını değerlendirmek için (Suganthan vd., 2005)'de belirtilmiş olan değerlendirme kriteri adımlarını izlemeleri gerekmektedir. Bunlar,

- Algoritmalar, her problem için 25 defa bağımsız olarak çalıştırılması gerekmektedir. Daha sonra ortalama hata değeri kaydedilmelidir.
- Algoritmalar, $10000 \times D$ fonksiyon çağırımı kadar bütçeye sahiptir. Burada D problem boyutunu göstermektedir. Örnek olarak, bir algoritma bir fonksiyonu 10 boyutta çözmek için 100000 fonksiyon çağırımı kadar bütçeye sahiptir.
- Çalıştırma işlemi, çalıştırma bütçesi tükeninceye veya elde edilen hata değeri 10^{-8} oluncaya kadar devam eder.



Şekil 1 CEC 2005 ölçüt setinde yer alan f2 fonksiyonunun 2 boyut için grafiği (Suganthan vd., 2005)

2005 yılında düzenlenmiş olan CEC 2005 yarışmasında birinciliği IPOP-CMAES algoritması elde etmiştir (García-Martínez, Gutiérrez, Molina, Lozano, & Herrera, 2017)(Auger & Hansen, 2005).

Tablo 1 CEC 2005 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Tür	Id	Fonksiyonlar	Aralık
Uni modal	F1	Ötelenmiş Sphere Fonksiyonu	[-100, 100]
	F2	Ötelenmiş Schwefel Problem 1.2	[-100, 100]
	F3	Ötelenmiş Döndürülmüş Yüksek Koşullu Eliptik Fonksiyonu	[-100, 100]
	F4	Fitnessda Gürültülü Ötelenmiş Schwefel Problem 1.2	[-100, 100]
	F5	Sınırların Global Optimumlu Schwefel'in Problem 2.6	[-100, 100]
Multi modal	F6	Ötelenmiş Rosenbrock Fonksiyonu	[-100, 100]
	F7	Sınırı Olmayan Ötelenmiş Döndürülmüş Griewank Fonksiyon	[0, 600]
	F8	Sınırlarda Global Optimum ile Ötelenmiş Döndürülmüş Ackley Fonksiyonu	[-32, 32]
	F9	Ötelenmiş Rastrigin Fonksiyonu	[-5, 5]
	F10	Ötelenmiş Döndürülmüş Rastrigin Fonksiyonu	[-5, 5]
	F11	Ötelenmiş Döndürülmüş Weierstrass Fonksiyonu	[-0.5, 0.5]
	F12	Schwefel Problem 2.13	[-pi, pi]
Expanded	F13	Genişletilmiş Griewank plus Rosenbrock Fonksiyonu (F8F2)	[-3, 1]
	F14	Ötelenmiş Döndürülmüş Genişletilmiş Scaffer F6	[-100, 100]
Hibrit Komposit	F15	Hybrid Kompozit Fonksiyon	[-5, 5]
	F16	Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyon	[-5, 5]
	F17	Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyon with Noise in Fitness	[-5, 5]
	F18	Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyon	[-5, 5]

Tablo 1 (Devam Ediyor) CEC 2005 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Hibrit Kompozit	F19 Global Optimum için Dar Havzalı Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyonus	[-5, 5]
	F20 Sınırlarda Global Optimum Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyon	[-5, 5]
	F21 Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyon	[-5, 5]
	F22 Yüksek Şartlı Sayı Matrisli Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyon	[-5, 5]
	F23 Sürekli Olmayan Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyon	[-5, 5]
	F24 Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyon	[-5, 5]
	F25 Sınırsız Döndürülmüş Hibrit Kompozit Fonksiyon	[2, 5]

CEC 2014 Ölçüt Seti

Algoritmaların performanslarını sınaması için tercih edilen CEC 2014 ölçüt seti, 2014 yılında düzenlenmiş Evrimsel Hesaplama Kongresindeki Real Parametre Optimizasyonun özel oturumuna aittir (Liang, Qu, & Suganthan, 2013). Bu ölçüt seti 30 adet fonksiyondan oluşmaktadır. CEC 2014’de yer alan problemler ve özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu sete ait bir fonksiyonun grafiksel gösterimi Şekil 2’de görülmektedir.

Tablo 2 CEC 2014 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Tür	Id	Fonksiyonlar
Uni modal	f1	Döndürülmüş yüksek şartlı elliptic fonksiyonu
	f2	Döndürülmüş bent cigar fonksiyonu
	f3	Döndürülmüş discus fonksiyonu
Multi modal	f4	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Rosenbrock fonksiyonu
	f5	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Ackley fonksiyonu
	f6	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Weierstrass fonksiyonu

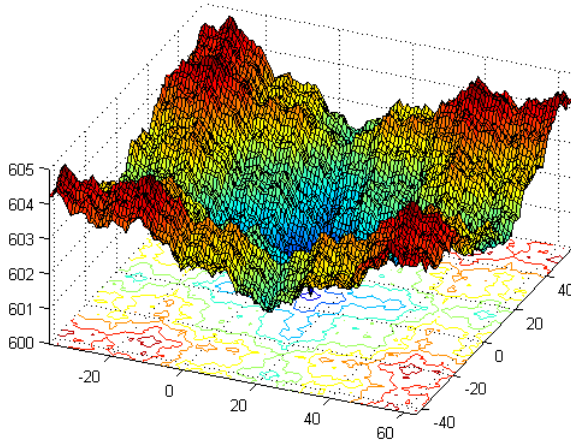
Tablo 2 (Devam Ediyor) CEC 2014 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Multi modal	f7	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Griewank fonksiyonu
	f8	Ötelenmiş Rastrigin fonksiyonu
	f9	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Rastrigin fonksiyonu
	f10	Ötelenmiş Schwefel fonksiyonu
	f11	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Schwefel fonksiyonu
	f12	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Katsuura fonksiyonu
	f13	Ötelenmiş ve Döndürülmüş HappyCat fonksiyonu
	f14	Ötelenmiş ve Döndürülmüş HGBat fonksiyonu
f15	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Genişletilmiş Griewank plus Rosenbrock fonksiyonu	
	f16	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Genişletilmiş Scaffer's F6 fonksiyonu
Hibrit	f17	Hibrit fonksiyon 1 (f9,f8,f1f9,f8,f1)
	f18	Hibrit fonksiyon 2 (f2,f12,f8f2,f12,f8)
	f19	Hibrit fonksiyon 3 (f7,f6,f4,f14f7,f6,f4,f14)
	f20	Hibrit fonksiyon 4 (f12,f3,f13,f8f12,f3,f13,f8)
	f21	Hibrit fonksiyon 5 (f14,f12,f4,f9,f1f14,f12,f4,f9,f1)
	f22	Hibrit fonksiyon 6 (f10,f11,f13,f9,f5f10,f11,f13,f9,f5)
Kompozit	f23	Kompozit fonksiyon 1 (f4,f1,f2,f3,f1f4,f1,f2,f3,f1)
	f24	Kompozit fonksiyon 2 (f10,f9,f14f10,f9,f14)
	f25	Kompozit fonksiyon 3 (f11,f9,f1f11,f9,f1)
	f26	Kompozit fonksiyon 4 (f11,f13,f1,f6,f7f11,f13,f1,f6,f7)
	f27	Kompozit fonksiyon 5 (f14,f9,f11,f6,f1f14,f9,f11,f6,f1)
	f28	Kompozit fonksiyon 6 (f15,f13,f11,f16,f1f15,f13,f11,f16,f1)
	f29	Kompozit fonksiyon 7 (f17,f18,f19f17,f18,f19)
	f30	Kompozit fonksiyon 8 (f20,f21,f22f20,f21,f22)
Tüm fonksiyonların Arama aralığı: [-100, 100]		

CEC 2014 ölçüt setindeki fonksiyonlar 10, 30, 50 ve 100 boyut için çalıştırılması gerekmektedir. Ölçüt setini kullanmak isteyen araştırmacılar deneylerini (Liang vd., 2013)'de yer alan kriterleri göz önünde tutarak yapmaları gerekmektedir. Bunlar,

- Algoritmalar her problem için 51 defa bağımsız olarak çalıştırılması gerekmektedir. Ortalama hata değeri kaydedilmektedir.
- Algoritmalar $10000 \times D$ fonksiyon çağırımı kadar bütçeye sahiptir. Burada D problem boyutunu göstermektedir.
- Çalıştırma işlemi çalışma bütçesi tükenince veya elde edilen hata değeri 10^{-8} oluncaya kadar devam eder.

CEC 2014 yarışmasını bir yinelemeli Diferansiyel Gelişim algoritması varyantı L-SHADE yöntemi kazanmıştır (Tanabe & Fukunaga, 2014).



Şekil 2 CEC 2014 ölçüt setindeki f6 fonksiyonun 2 boyut gösterimi (Liang vd., 2013)

CEC 2015 Ölçüt Seti

Evrimsel Hesaplama Kongresindeki Real Parametre Optimizasyonu özel oturumuna ait olan CEC 2015 ölçüt seti, daha önceki CEC ölçüt setleri olan CEC 2005, CEC 2014’de yer alan fonksiyonlardan oluşmaktadır (Liang, Qu, Suganthan, & Chen, 2014). Unimodal, Multimodal, Hibrit ve Komposit özelliklere sahip 15 adet fonksiyon bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar ve özellikleri Tablo 3’de listelenmiştir. Ayrıca bu ölçüt setlerinde yer alan bir fonksiyonun gösterimi Şekil 3’de verilmiştir.

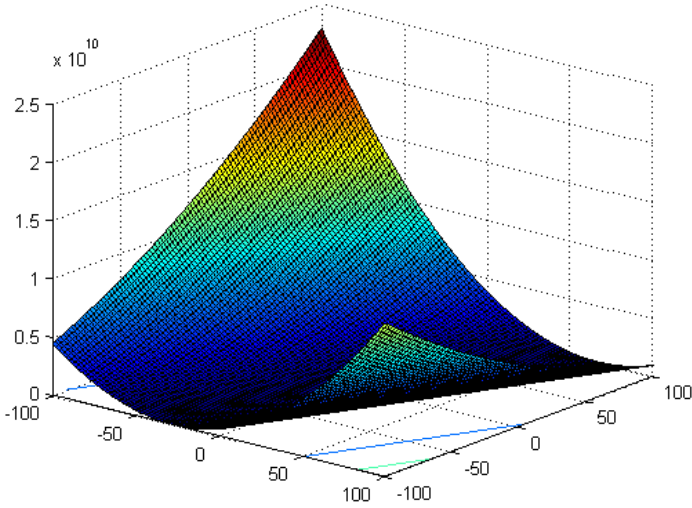
Tablo 3 CEC 2015 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Tür	Id	Fonksiyonlar
Uni modal	1	Döndürülmüş Yüksek Şartlı Elliptic Fonksiyon
	2	Döndürülmüş Cigar Fonksiyon
Multi modal	3	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Ackley Fonksiyonu
	4	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Rastrigin Fonksiyonu
	5	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Schwefel Fonksiyonu
Hibrit	6	Hibrit Fonksiyon 1 (N=3)
	7	Hibrit Fonksiyon 2 (N=4)
	8	Hibrit Fonksiyon 3(N=5)
Komposit	9	Kompozit Fonksiyon 1 (N=3)
	10	Kompozit Fonksiyon 2 (N=3)
	11	Kompozit Fonksiyon 3 (N=5)
	12	Kompozit Fonksiyon 4 (N=5)
	13	Kompozit Fonksiyon 5 (N=5)
	14	Kompozit Fonksiyon 6 (N=7)
	15	Kompozit Fonksiyon 7 (N=10)

Arama aralığı: [-100, 100]D

Ölçüt setinin değerlendirme kriterleri (Liang vd., 2014)'de detaylıca anlatılmıştır. Ölçüt setindeki fonksiyonlar 10, 30, 50 ve 100 boyut için çözülmesi gerekmektedir. Çalıştırılma işlemi aşağıdaki adımlara göre yapılması gerekmektedir:

- Algoritmalar, her problem için 51 defa bağımsız olarak çalıştırılması gerekmektedir. Ortalama hata değeri kaydedilmektedir.
- Algoritmalar $10000 \times D$ fonksiyon çağırımı kadar bütçeye sahiptir. Burada D problem boyutu göstermektedir.
- Çalıştırma işlemi çalışma bütçesi tükenince veya elde edilen hata değeri 10^{-8} oluncaya kadar devam eder.



Şekil 3 CEC 2015 ölçüt setinde yer alan f1 Fonksiyonun 2 boyutta gösterimi (Liang vd., 2014)

CEC 2015 yarışmasını bir önceki yılda düzenlenmiş CEC 2014’ü kazanan L-SHADE algoritmasının bir varyantı SPS-L-SHADE-EIG algoritması kazanmıştır (Guo, Tsai, Yang, & Hsu, 2015).

CEC 2017 Ölçüt Seti

2017 ve 2018 yıllarında düzenlenmiş olan Evrimsel Hesaplama Kongresindeki Real Parametre Optimizasyonu özel oturumlarında kullanılan ölçüt setidir (Awad, Ali, Liang, Qu, & Suganthan, 2016). Unimodal, Multimodal, Hibrit ve Komposit olmak üzere dört kategoride 29 adet fonksiyon (Şekil 4) içermektedir ve özellikleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4 CEC 2017 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Tür	Id	Fonksiyonlar
Uni modal	f1	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Bent Cigar Fonksiyonu
	f2	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Zakharov Fonksiyonu
Multi modal	f3	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Rosenbrock Fonksiyonu
	f4	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Rastrigin Fonksiyonu
	f5	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Genişletilmiş Scaffer F6 Fonksiyonu
	f6	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Lunacek Bi_Rastrigin Fonksiyonu
	f7	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Non-Continuous Rastrigin Fonksiyonu
	f8	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Levy Fonksiyonu
	f9	Ötelenmiş ve Döndürülmüş Schwefel Fonksiyonu
Hibrit	f10	Hibrit Fonksiyon 1 (N=3)
	f11	Hibrit Fonksiyon 2 (N=3)
	f12	Hibrit Fonksiyon 3 (N=3)
	f13	Hibrit Fonksiyon 4 (N=4)

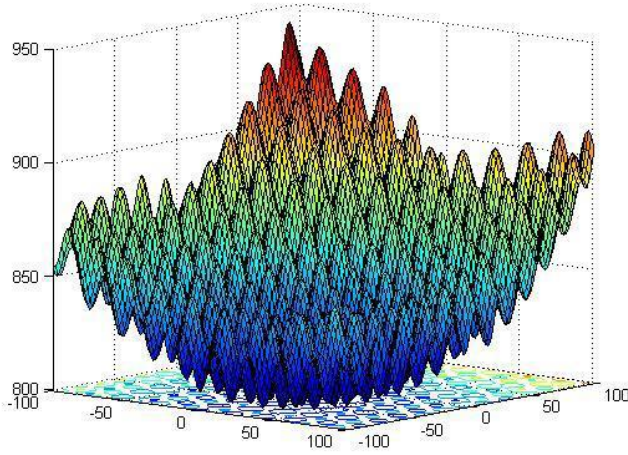
Tablo 4 (Devam Ediyor) CEC 2017 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Hibrit	f14 Hibrit Fonksiyon 5 (N=4)
	f15 Hibrit Fonksiyon 6 (N=4)
	f16 Hibrit Fonksiyon 6 (N=5)
	f17 Hibrit Fonksiyon 6 (N=5)
	f18 Hibrit Fonksiyon 6 (N=5)
	f19 Hibrit Fonksiyon 6 (N=6)
Kompozit	f20 Kompozit Fonksiyon 1 (N=3)
	f21 Kompozit Fonksiyon 2 (N=3)
	f22 Kompozit Fonksiyon 3 (N=4)
	f23 Kompozit Fonksiyon 4 (N=4)
	f24 Kompozit Fonksiyon 5 (N=5)
	f25 Kompozit Fonksiyon 6 (N=5)
	f26 Kompozit Fonksiyon 7 (N=6)
	f27 Kompozit Fonksiyon 8 (N=6)
	f28 Kompozit Fonksiyon 9 (N=3)
	f29 Kompozit Fonksiyon 10 (N=3)

Arama aralığı: [-100, 100]

Ölçüt setlerinde yer alan fonksiyonlar 10, 30, 50 ve 100 boyut için çözülmektedir. Çalıştırılma işlemi aşağıdaki adımlara göre yapılması gerekmektedir:

- Algoritmalar her problem için 51 defa bağımsız olarak çalıştırılması gerekmektedir. Ortalama hata değeri kaydedilmektedir.
- Algoritmalar $10000 \times D$ fonksiyon çağırımı kadar bütçeye sahiptir. Burada D problem boyutu göstermektedir.
- Çalıştırma işlemi çalıştırma bütçesi tükenince veya elde edilen hata değeri 10^{-8} oluncaya kadar devam eder.



Şekil 4 CEC 2017 ölçüt setinde yer alan f7 fonksiyonun 2 boyuttaki grafiği (Awad vd., 2016)

2017 yılındaki CEC yarışmasında EBOwithCMAR algoritması kazanmıştır (Kumar, Misra, & Singh, 2017). 2018 yılında yapılan CEC yarışmasında ilk sırada Evrimsel Strateji ile CMA-ES algoritmasının hibritleştirilmesiyle oluşan HS-ES algoritması yer almıştır (Zhang & Shi, 2018).

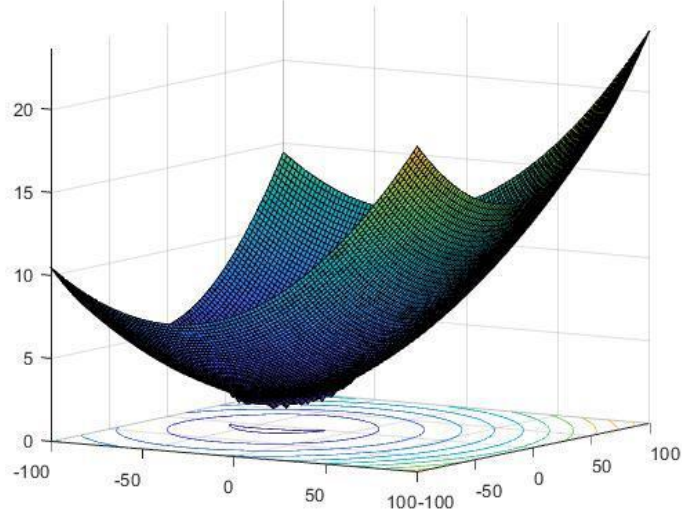
CEC 2019 Ölçüt Seti

CEC 2019 yarışması, 2002 yılındaki SIAM100 Digit Challenge ilham alınarak geliştirilmiştir (Price, Awad, Ali, & Suganthan, 2018). Bu ölçüt seti, optimumu 1 olan 10 adet multimodal fonksiyon içermektedir ve Tablo 5’de listelenmiştir. Ayrıca bu fonksiyonlardan bir tanesine ait grafik Şekil 5’te verilmiştir. Amaç 10 basamaklı doğru sonucun 10 fonksiyonda da elde edilmesidir.

- Algoritmalar her problem için 50 defa bağımsız olarak çalıştırılması gerekmektedir. Ortalama hata değeri kaydedilmektedir.
- Algoritmaların fonksiyon çağırımı olarak herhangi bir sınırlama yoktur. Algoritmalar 10 basamaklı doğru sağlanıncaya kadar veya artık sonuçta herhangi bir gelişme meydana gelmeyeceği görülmesine kadar devam edilir.

Tablo 5 CEC 2019 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Id	Fonksiyonlar	Bo-yut	Aralık
1	Storn's Chebyshev Polynomial Fitting Problem	9	[-8192, 8192]
2	Inverse Hilbert Matrix Problem	16	[-16384, 16384]
3	Lennard-Jones Minimum Energy Cluster	18	[-4, 4]
4	Rastrigin Fonksiyonu	10	[-100, 100]
5	Griewangk Fonksiyonu	10	[-100, 100]
6	Weierstrass Fonksiyonu	10	[-100, 100]
7	Modified Schwefel Fonksiyonu	10	[-100, 100]
8	Geniştirilmiş Schaffer F6 Fonksiyonu	10	[-100, 100]
9	Happy Cat Fonksiyonu	10	[-100, 100]
10	Ackley Fonksiyonu	10	[-100, 100]



Şekil 5 CEC 2019 ölçüt setinde yer alan f9 fonksiyonun 2 boyuttaki grafiği (Price vd., 2018)

CEC 2019 yarışmasını bir yinelemeli Diferansiyel Gelişim algoritması varyantı olan JDE100 algoritması kazanmıştır (Brest, Maucec, & Boskovic, 2019).

BBOB Ölçüt Seti

Algoritma performans ölçümünde kullanılan diğer bir ölçüt seti ise Genetik ve Evrimsel Hesaplama Konferansına (GECCO) ait “Kara Kutu Optimizasyon Kıyaslaması”dır (Black-Box Optimisation Benchmarking, BBOB) (Hansen, Auger, Ros, Finck, & Pošćik, 2010). CEC fonksiyonlarından farklı olarak bu ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar farklı boyutlarda çözülmektedir. BBOB, beş kategoride 24 adet fonksiyon içermektedir ve Tablo 6’da listelenmiştir. Bu kategoriler, ayrılabilir fonksiyonlar ve düşük veya orta koşullu fonksiyonlar, yüksek

koşullama ve unimodal fonksiyonlar, yeterli küresel yapılı multimodal fonksiyonlar, zayıf küresel yapılı multimodal fonksiyonlardır.

- Algoritmalar $10000 \times D$ fonksiyon çağırımı kadar bütçeye sahiptir. Burada D problem boyutunu göstermektedir.

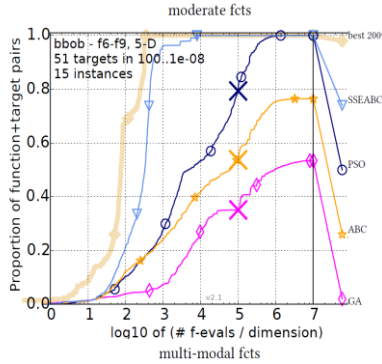
BBOB ölçüt setleri, Comparing Continuous Optimizer platformu (COCO) yazılımı ile dağıtılmaktadır. Bu yazılım algoritmanın test edilmesini otomatikleştirmektedir (Hansen, Auger, Mersmann, Tusar, & Brockhoff, 2016). Kolayca grafikler elde etmek (Bu grafiklere örnek olarak Şekil 6 verilebilir), makaleler için LaTeX şablonları oluşturmak, algoritma karşılaştırması için html sayfaları üretmek gibi avantajları vardır.

Tablo 6 BBOB ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Tür	Id	Fonksiyonlar
Ayrılabilir Fonksiyonlar	f1	Sphere Fonksiyonu
	f2	Ellipsoidal Fonksiyonu
	f3	Rastrigin Fonksiyonu
	f4	Büche-Rastrigin Fonksiyonu
	f5	Linear Slope
Düşük veya orta şartlandırma fonksi- yonları	f6	Attractive Sector Fonksiyonu
	f7	Step Ellipsoidal Fonksiyonu
	f8	Rosenbrock Fonksiyonu, ori- ginal
	f9	Rosenbrock Fonksiyonu, rota- ted
Yüksek koşullama ve unimodal fonksi- yonlar	f10	Ellipsoidal Fonksiyonu
	f11	Discus Fonksiyonu
	f12	Bent Cigar Fonksiyonu
	f13	Sharp Ridge Fonksiyonu
	f14	Different Powers Fonksiyonu

Tablo 6 (Devam Ediyor) BBOB ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Yeterli küresel yapı pılı multimodal fonksiyonlar	f15	Rastrigin Fonksiyonu
	f16	Weierstrass Fonksiyonu
	f18	Schaffers F7 Fonksiyonu, moderately ill-conditioned
	f19	Composite Griewank-Rosenbrock Fonksiyonu F8F2
	f20	Schwefel Fonksiyonu
	f21	Gallagher's Gaussian 101-me Peaks Fonksiyonu
Zayıf küresel yapı pılı multimodal	f22	Gallagher's Gaussian 21-hi Peaks Fonksiyonu
	f23	Katsuura Fonksiyonu
	f24	Lunacek bi-Rastrigin Fonksiyonu



Şekil 6 COCO yazılımı ile üretilmiş bir grafik (Aydin & Yavuz, 2017)

CEC 2020 ÖLÇÜT SETİ

2020 yılındaki Evrimsel Hesaplama Kongresindeki Real Parametre Optimizasyonu özel oturumuna (CEC 2020) ait ölçüt setidir. CEC 2014 ölçüt setinden 3 adet ve CEC 2017 ölçüt setinden 7 adet fonksiyon

alınarak oluşturulmuş bir ölçüt setidir. CEC 2020’de yer alan 10 adet fonksiyonun isimleri ve özellikleri (Şekil 7) Tablo 7’de görülmektedir. Önceki yıllardan farklı olarak çalıştırılacak boyut ve fonksiyon çağırım sayılarında değişiklikler yapılmıştır. Ölçüt setlerinde yer alan fonksiyonların 5, 10, 15, ve 20 boyut için çözülmesi istenmektedir.

Ölçüt setini kullanmak isteyen araştırmacılar deneylerini (Yue vd., 2019)’de yer alan kriterleri göz önünde tutarak yapmaları gerekmektedir. Bunlar,

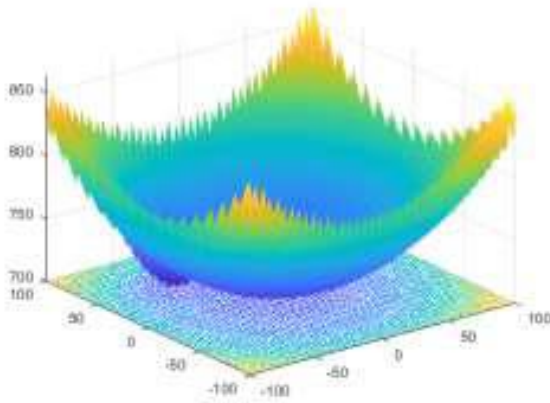
- Algoritmalar, her problem için 30 defa bağımsız olarak çalıştırılması gerekmektedir. Ortalama hata değeri kaydedilmektedir.
- Algoritmalar D=5 için 50000, D=10 için 1000000, D=15 için 3000000, D=20 için 10000000 fonksiyon çağırımı kadar bütçeye sahiptir. Burada D problem değişken sayısını göstermektedir.
- Çalıştırma işlemi çalıştırma bütçesi tükenince veya elde edilen hata değeri 10^{-8} oluncaya kadar devam eder. 10^{-8} ’den küçük hata değerleri 0 olarak alınması gerekmektedir.

Tablo 7 CEC 2020 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

Id	Fonksiyonlar	Aralık
1	Döndürülmüş ve Döndürülmüş Bent Çigar Fonksiyonu	[-100, 100]
2	Döndürülmüş ve Döndürülmüş Schwefel’s Fonksiyonu	[-100, 100]

Tablo 7 (Devam Ediyor) CEC 2020 ölçüt setinde yer alan fonksiyonlar ve özellikleri

3	Döndürülmüş ve Döndürülmüş Lunacek bi-Rastrigin Fonksiyonu	[-100, 100]
4	Genişletilmiş Rosenbrock's plus Griewangk's Fonksiyonu	[-100, 100]
5	Hibrit Fonksiyon 1 (N = 3)	[-100, 100]
6	Hibrit Fonksiyon 2 (N = 4)	[-100, 100]
7	Hibrit Fonksiyon 3 (N = 5)	[-100, 100]
8	Kompozit Fonksiyon 1 (N = 3)	[-100, 100]
9	Kompozit Fonksiyon 2 (N = 4)	[-100, 100]
10	Kompozit Fonksiyon 3 (N = 5)	[-100, 100]



Şekil 7 CEC 2020 ölçüt setine ait f3 Fonksiyonunun 2 boyut grafiği (Yue vd., 2019)

SONUÇ

Algoritma tasarımcıları, geliştirdikleri algoritmalarını test etmek için artık bir standart halini almış olan ölçüt setlerinden faydalanmaktadır. Bunlardan öne çıkan belli başlı setler mevcuttur. Yıllardan beri düzenlenen Evrimsel Hesaplama Kongresindeki Real Parametre Optimizasyonun özel oturumuna ait CEC ölçüt setleri, optimizasyon alanında artık birer standart halini almıştır. Bununla birlikte Genetik ve Evrimsel Hesaplama Konferansında kullanılan BBOB de rağbet gören bir diğer ölçüt setidir. CEC ve BBOB ölçütlerinde problem yapısı ve boyutu gibi farklı özelliklere sahip çok sayıda problemler içermektedir. Her iki sette kendine özgü çalıştırma kriterlerine sahiptir. Bu sayede algoritma geliştiricilerine, ölçüt setlerinde yer alan adımları tam olarak uygulayan başka araştırmacıların sonuçlarını kendi sonuçları ile adilane bir şekilde karşılaştırabilme imkanını verir. Ayrıca BBOB ölçüt seti kullanıcılarına özel bir yazılım aracı sağlayarak geliştiricilere kolaylıklar sunmakta ve kullanılması cazip bir ortam yaratmaktadır.

KAYNAKÇA

- Auger, A., & Hansen, N. (2005). A Restart CMA Evolution Strategy With Increasing Population Size. 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2, 1769–1776.
- Awad, N. H., Ali, M. Z., Liang, J. J., Qu, B. Y., & Suganthan, P. N. (2016). Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2017 special session and competition on single objective real-parameter numerical optimization. Tech. Rep.
- Aydin, D., & Yavuz, G. (2017). Self-Adaptive search equation-based artificial bee colony algorithm with CMA-ES on the noiseless BBOB testbed. İçinde GECCO 2017 - Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion.
- Beheshti, Z., Shamsuddin, S. M. H., & Hasan, S. (2013). MPSO: Median-oriented Particle Swarm Optimization. Applied Mathematics and Computation, 219(11), 5817–5836.
- Blum, C., & Raidl, G. R. (2016). Hybrid Metaheuristics. Cham: Springer International Publishing.
- Brest, J., Maucec, M. S., & Boskovic, B. (2019). The 100-Digit Challenge: Algorithm jDE100. 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2019 - Proceedings, 19–26.
- De Falco, I., Della Cioppa, A., & Trunfio, G. A. (2019). Investigating surrogate-assisted cooperative coevolution for large-Scale global optimization. Information Sciences, 482, 1–26.
- García-Martínez, C., Gutiérrez, P. D., Molina, D., Lozano, M., & Herrera, F. (2017). Since CEC 2005 competition on real-parameter optimisation: a decade of

- research, progress and comparative analysis's weakness. *Soft Computing*, 21(19), 5573–5583.
- Guo, S., Tsai, J. S., Yang, C.-C., & Hsu, P.-H. (2015). A self-optimization approach for L-SHADE incorporated with eigenvector-based crossover and successful-parent-selecting framework on CEC 2015 benchmark set. *Çinde 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) (ss. 1003–1010)*. IEEE.
- Hansen, N., Auger, A., Mersmann, O., Tusar, T., & Brockhoff, D. (2016). COCO: A Platform for Comparing Continuous Optimizers in a Black-Box Setting, 1–10.
- Hansen, N., Auger, A., Ros, R., Finck, S., & Poš\`ik, P. (2010). Comparing results of 31 algorithms from the black-box optimization benchmarking BBOB-2009. *Çinde Proceedings of the 12th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation (ss. 1689–1696)*.
- Kumar, A., Misra, R. K., & Singh, D. (2017). Improving the local search capability of Effective Butterfly Optimizer using Covariance Matrix Adapted Retreat Phase. *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2017 - Proceedings, 1835–1842*.
- Liang, J. J., Qu, B. Y., & Suganthan, P. N. (2013). Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2014 special session and competition on single objective real-parameter numerical optimization. *Computational Intelligence Laboratory*.
- Liang, J. J., Qu, B. Y., Suganthan, P. N., & Chen, Q. (2014). Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2015 competition on learning-based real-parameter single objective optimization. *Technical Report201411A, Computational Intelligence Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou China and Technical Report, Nanyang Technological University, Singapore, 29, 625–640*.
- Mahdavi, S., Shiri, M. E., & Rahnamayan, S. (2015). Metaheuristics in large-scale

- global continues optimization: A survey. *Information Sciences*, 295, 407–428.
- Price, K. V, Awad, N. H., Ali, M. Z., & Suganthan, P. N. (2018). Problem definitions and evaluation criteria for the 100-digit challenge special session and competition on single objective numerical optimization. İçinde Technical Report. Nanyang Technological University.
- Suganthan, P. N., Hansen, N., Liang, J. J., Deb, K., Chen, Y.-P., Auger, A., & Tiwari, S. (2005). Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2005 special session on real-parameter optimization. KanGAL Report, 2005005.
- Tanabe, R., & Fukunaga, A. S. (2014). Improving the search performance of SHADE using linear population size reduction. *Proceedings of the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2014*, 1658–1665.
- Yue, C., Price, K., Suganthan, P., Liang, J., Ali, M., Qu, B., ... Biswas, P. (2019). Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2020 special session and competition on single objective bound constrained numerical optimization. *Comput. Intell. Lab., Zhengzhou Univ., Zhengzhou, China, Tech. Rep*, 201911.
- Zhang, G., & Shi, Y. (2018). Hybrid Sampling Evolution Strategy for Solving Single Objective Bound Constrained Problems. *2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2018 - Proceedings*, 1–7.

BÖLÜM 3

DAHA İYİ ÇÖZÜMLERİ EZBERLEYEN KARINCA KOLONİ SİSTEMİNDE (DİÇE-KKS) FEROMON SEVİYESİNİN TRANSFER FONKSİYONLARIYLA BELİRLENMESİ

Dr. Dursun EKMEKÇİ¹

¹ Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Bilgisayar Programcılığı Programı, Karabük, Türkiye, dekmekci@karabuk.edu.tr

GİRİŞ

Matematiksel açıdan optimizasyon, kısaca, incelenen fonksiyonun minimum ya da maksimum değerinin bulunması olarak tanımlanabilir. Yapay zekâ açısından yorumlandığında ise, optimizasyon, “ele alınan problemin, farklı koşullar altında, en uygun çözümünün belirlenmesi süreci” olarak değerlendirilir. Bu bağlamda, tasarlanacak sistemin, çoğu kez, birbiriyle çelişen koşullar için geçerli sonuçlar üretebilmesi hedeflenir ve sistem konfigürasyonu, bir hayli karmaşık hâl alır. Optimizasyon problemleri, genel bir sınıflandırmayla iki ana kategoriye ayrılmaktadır. İlk kategoride, çözüm bileşenleri gerçek sayılardan oluşan, sürekli optimizasyon problemleri yer alır ve sayısal fonksiyon için, belirlenen kriterleri sağlayan parametre değerleri aranır. İkinci kategoride ise, çözüm elemanları, sonlu sayıdaki nesnelere oluşan ayrık yapıları (kombinatorial) optimizasyon problemleri vardır. Kombinatorial optimizasyon problemlerinde çözüm bileşenleri genellikle, harfler, tamsayılar, alt kümeler ya da graf yapılarıdır ve oluşturulan çözümlerin başarısı, bu nesnelere dizilişleriyle ilişkilidir. Gezgin satıcı, araç rotalama, graf boyama, çizelgeleme, kuadratik atama, kutu paketleme ve sırt çantası problemleri, bu kategorideki en popüler örneklerdendir.

Genellikle NP-Zor (polinomal deterministik zamanda çözüm bulunacağı ispatlanamayan) problemler sınıfındaki kombinatorial optimizasyon problemlerini çözmek için, daha çok meta-sezgisel algoritmalar tercih edilir. Meta-sezgisel teknikler, optimizasyon problemleri için en uygun çözümü garanti etmeseler de makul sürelerde

geçerli çözümler üretebilen tekniklerdir. Bu teknikler ayrıca, statik problem çözümlerinde başarılı olabildikleri gibi, dinamik karakteristiği olan problemlerde de yüksek seviyedeki esneklikleriyle verimli çözümler üretebilmektedir. Daha çok, doğadan esinlenerek geliştirilen meta-sezgisel yöntemler arasında, koloni halinde yaşayan canlıların, aralarındaki iş bölümünü taklit eden sürü-zekâsı temelli algoritmalar, hatırı sayılır bir yere sahiptir. Bu algoritmalar, bakteri, termit, karınca gibi mikroorganizmalar ile, kuş, balık, kanguru gibi hayvanların kolektif yaşamları, matematiksel fonksiyonlarla modellenerek geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında karınca koloni optimizasyonu (KKO) ele alındığından, sonraki bölümlerde KKO algoritmaları ve bu algoritmaların temel bileşeni olan feromon salgısı açıklanacaktır.

1. KARINCA KOLONİ OPTİMİZASYONU (KKO)

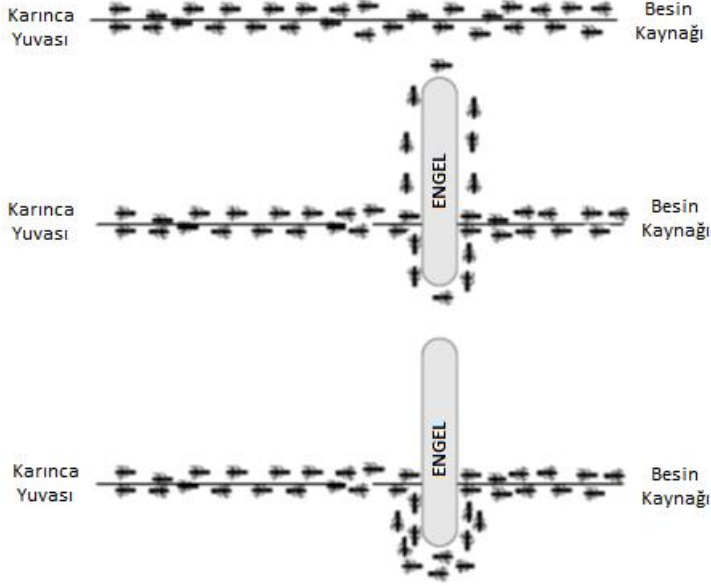
Karınca koloni optimizasyonu (KKO), 1991 yılında (Marco Dorigo, Maniezzo, & Coloni, 1991) gerçek dünyadaki karınca kolonisi üyelerinin, yiyecek arama faaliyetlerindeki iş bölümünü modelleyerek geliştirilmiş meta-sezgisel bir yöntemdir. Yöntem ilk olarak, gezgin satıcı problemi (GSP) ve kuadratik atama problemi (KAP) gibi kombinatoriyal optimizasyon problemleri üzerinde denenmiş ve başarılı sonuçlar üretebilmiştir. Bu kapsamda öncelikle, KKO tekniğine ilham kaynağı olan karıncaların yiyecek arama davranışları kısaca açıklanacak ve sonra algoritma modeli sunulacaktır.

1.1. Gerçek Yaşamdaki Karıncalar

Yuvalarından, yiyecek aramak üzere çıkan karıncalar, yararlı bir besin kaynağı bulduklarında, gurup halinde hareket ederek kaynaktaki besini yuvalarına taşırlar. Gurubun, kolektif faaliyeti ile, kısa bir sürede, yuva ile besin kaynağı arasındaki en kısa yol belirlenir. Değişen ortam koşulları ya da farklı dış etkenlerden ötürü, kullanılan güzergâh, artık en kısa yol değilse, karıncalar, ortama uyum sağlayarak, yeni en kısa yolu çok kısa sürede bulabilirler.

Karıncalar, besin kaynağı ile yuvaları arasındaki en kısa yolu bulurken, feromon kimyasalından yararlanır. Feromon, birçok böcek türünün, aralarındaki etkileşimde kullandığı salgının genel adıdır. Yuvasından, kaynağa doğru hareket eden bir karınca, ardından gelen karıncaların da bu yolu takip edebilmeleri için, ortama feromon yayar. Bu sayede, yol güzergahına konulan bir engelde bile, karıncalar en kısa yolu bulmakta zorlanmazlar. Öndeki karıncalar, engelin hangi tarafından gideceklerine rastgele karar verirler. Bu otokatalitik davranış, ortamdaki daha kısa yolların keşfini kolaylaştırır. Kısa yolu takip eden karınca güzergahında, birim zamanda bırakılan feromon daha fazla, buharlaşma ise daha az olacağından, sonradan gelen karıncalar, ortamdaki feromon yoğunluğuna göre, kısa yolu bulmakta zorlanmazlar. Dolayısıyla zamanla, kısa yol hattında karınca sayılarında artış olur ve belli bir süre sonunda tüm karıncalar kısa yolu kullanırlar. Karıncaların bu kolektif davranışına dayalı sinerji, koloninin sömürü yeteneğini güçlendirmektedir. Karınca kolonisinin

yiyecek toplama sürecinde en kısa yolu bulma davranışı, Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1: Karıncaların en kısa yolu bulma davranışı

Kombinatoriyal optimizasyon problem çözümlerinde, meta-sezgisel algoritmalar, genel bir yaklaşımla, başlangıçta rastgele çözüm dizileri oluşturur ve sonrasında iteratif olarak, bu çözüm dizilerindeki bileşenlerin diziliş sırasını değiştirerek en uygun çözümü bulmaya çalışır. KKO algoritmaları ise bu genellemeden farklı olarak, çözüm bileşenleri arasındaki ilişkiyi analiz etmeye çalışır ve bu ilişkiye bağlı olarak en uygun çözüm dizisini oluşturmayı hedefler. Nesnelere arasındaki korelasyon, feromon yoğunluğu bilgisiyle ifade edilir ve bu yoğunluk, çözüm dizisinin başarı seviyesiyle ilişkilendirilir. Bu

bağlamda nesnelere arası feromon konsantrasyonu, iteratif olarak güncellenmekte ve sonraki çevrimlerde daha başarılı nesne sıralaması kolaylaştırılmaktadır. Algoritma kapsamında yapay karıncalar, arama uzayını örnekleme için kullanılan stokastik yemleme prosedürleridir (Marco Dorigo & Blum, 2005). Gerçek karıncalardan farklı olarak, yapay karıncalar, hafızaya sahiptirler ve tamamen kör değildirler. Algoritmada ayrıca, yiyecek toplama faaliyeti ayrık zamanlı ortamda yürütülür.

1.2. Algoritma Modeli

KKO yaklaşımıyla geliştirilen en meşhur optimizasyon algoritmaları, karınca sistemi (KS), karınca koloni sistemi (KKS) ve maksimum-minimum karınca sistemi (MMKS)'dir. Bu algoritmaların genel yapısı Şekil 2'deki gibi gösterilebilir.

Algoritma 1: Karınca Koloni Optimizasyonu

Parametre değerlerini ata

Başlangıç feromon değerlerini belirle

Tekrarla

Yapay karıncalarla çözümleri oluştur

Probleme özgü hesaplamalar (tercihe bağlı)

Feromon değerlerini güncelle

Ta ki sonlanma şartları oluşuncaya kadar

Çıktı: Bulunan en iyi çözüm

Şekil 2: KKO'nun genel algoritmik yapısı

Öncelikle algoritmanın kontrol parametreleri için değerler atanır. KKO algoritmalarının farklı kontrol parametreleri bulunabilir. Ardından, her

iki çözüm bileşeni arasına, 0.1 gibi mümkün olduğunca düşük seviyede feromon değerleri atanır (M. Dorigo & Di Caro, 1999).

1.2.1. Yapay Karıncalarla Çözümlerin Oluşturulması

KKO kapsamında geliştirilen ilk algoritma KS algoritmasıdır. KS’de her bir çevrimde, sırasıyla (ya da eş zamanlı olarak) m adet karıncanın her biri ile çözümler oluşturulur. Çözümler için, dizinin ilk elemanı rastgele seçilir. Daha sonra bu alt çözüm, komşular kümesindeki uygulanabilir bileşenlerden biri eklenerek genişletilir ve bu ekleme işlemi, çözüm dizisi tamamlanıncaya kadar devam eder. Komşu bileşenler arasından seçim yapılırken, olasılık hesabı uygulanır. Toplam nesne sayısı V olan bir problemde, i adet çözüm bileşeni bulunan bir k karıncasının, j bileşenini seçme olasılığı (p_{ij}^k) , (1) eşitliğiyle hesaplanır.

$$p_{ij}^k = \frac{(\tau_{ij})^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{u \in V_i^k} (\tau_{iu})^\alpha (\eta_{iu})^\beta} \quad (1)$$

(1) denkleminde V_i^k k karıncasının oluşturulan çözümde henüz değerlendirilmemiş çözüm bileşenlerini, u seçilebilecek muhtemel çözüm bileşenlerini, τ_{ij} ise i - j bileşenleri arasındaki feromon miktarını temsil eder. Çözüm aranan problem GSP ise, η_{ij} i - j düğümleri arasındaki mesafenin (δ_{ij}) tersidir $(1/\delta_{ij})$. (1) eşitliğindeki α feromon miktarının önemini, β ise düğümler arası mesafenin önemini belirleyen sezgisel parametrelerdir.

KKS’de, KS’den farklı olarak, yapay karıncalar bir sonraki çözüm bileşenini seçerken, $[0,1]$ aralığında rastgele bir sayı (q) seçerler ve bu değer, q_0 parametresiyle karşılaştırılır. Eğer $q \leq q_0$ ise, i bileşeninden sonra seçilecek bileşen, $(\tau_{iu})^\alpha (\eta_{iu})^\beta$ değeri en yüksek olan bileşendir. Aksi takdirde seçim için (1) denklemi uygulanır.

1.2.2. Optimizasyon Problemine Özel Hesaplamalar

İnşa edilen çözümler değerlendirildikten ve feromon güncellemesi işlemine geçilmezden evvel, probleme özel birtakım işlemler gerekebilir. “Arka plan işlemleri” olarak isimlendirilen bu hesaplamalar için, verilen örnekler oluşturulan çözümlere yerel arama uygulamayı içermektedir (Marco Dorigo & Stützle, 2003).

1.2.3. Feromon Değerlerinin Güncellenmesi

KKO algoritmaları için en vurgulayıcı, temel özellik feromon salgısıdır. Bu bağlamda, çözüm parçaları arasındaki bağlantıyı doğru şekilde yorumlayabilen feromon güncelleme adımları, başarılı çözümlerin oluşturulabilmesine olanak sağlarken, kötü çözümlere neden olan bileşen kombinasyonları arasındaki bağlantıyı zayıflatır. Feromon değeri, aynı zamanda algoritmanın arama yönünü de belirleyen bir bileşendir.

Farklı KKO algoritmaları, feromon güncellemede farklı teknikler kullanırlar. KS algoritmasında tüm karıncalar turlarını tamamlayıp yuvaya döndüklerinde, feromon güncelleme işlemi (2) ile gerçekleştirilir.

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (2)$$

(2)'deki ifadede ρ (0, 1] aralığında değer alan feromon buharlaşma oranıdır. $\Delta\tau_{ij}^k$ ise k karıncası ile elde edilen çözüm değeri (L_k) dikkate alınarak, i - j bileşenleri arasına eklenecek feromon değeridir. Bu değer (3) ile hesaplanır.

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{1}{L_k} & \text{eğer } k \text{ karıncası } i - j \text{ bileşenlerini kullanmışsa} \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3)$$

KKS algoritmasında ise feromon güncelleme işlemi iki kategoriye ayrılmaktadır. İlk kategoride yer alan KS algoritmasındaki güncelleme işlemleri, “Yerel Feromon Güncelleme” olarak isimlendirilir ve bu işlemler, arama boyunca her bir çevrimde turu tamamlayan tüm karıncalar için uygulanır. Yerel feromon güncelleme adımları, sonradan gelen karıncaların aramayı daha da çeşitli hale getirebileceği şeklinde yorumlanmaktadır. İkinci kategorideki “Genel Feromon Güncelleme” ise, algoritmanın sömürü yeteneğini daha aç gözlü hale getirmek için, ilgili çevrimdeki en iyi çözümü elde eden karınca için (4)'deki ifade ile uygulanır (Blum, 2005).

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \Delta\tau_{ij}^{en\ iyi} \quad (4)$$

MMKS algoritmasında daha aç gözlü bir yaklaşım olarak, her bir çevrimde yalnızca en başarılı karıncanın güzergahı için (4) ile feromon güncellemesi uygulanır. MMKS algoritmasını bu algoritmalarından ayıran diğer bir özellik ise, çözüm bileşenleri arasındaki feromon değerlerinin alabileceği alt ve üst sınır değerlerin belirlenmiş olmasıdır.

KS ve KKS algoritmalarındaki arama sürecinde feromon değerleri değişmektedir.

2. ÖNERİLEN METOT

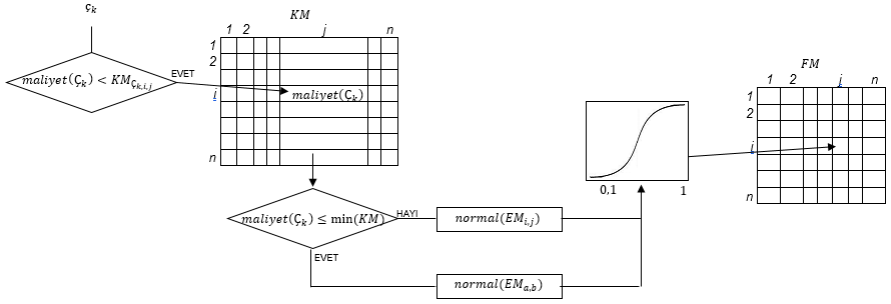
KKO algoritmaları genel itibariyle, yerel aramada başarılı ve güçlü sömürü yeteneğine sahip algoritmalarlardır. Algoritmalar, karıncaların gerçek yaşamdaki yiyecek toplama faaliyetini etkin bir şekilde modelleyebilmekte, yapay karıncaları başarılı çözümler etrafında biriktirebilmektedir. Ancak bu durum, algoritmaların keşif yeteneklerini önemli ölçüde azaltmaktadır. KKO algoritmaları, diğer birçok meta-sezgisel yöntemle karşılaştırıldıklarında, birkaç çevrimde bile çok başarılı sonuçlara ulaşabilen, yakınsama performansı güçlü algoritmalarlardır. Ancak daha iyi çözümler oluşturabilmekte güçlük yaşarlar. KS ve KKS algoritmalarındaki $q0$ parametresi için, genellikle 0.9 gibi yüksek bir değer seçilir. Bu sayede, algoritma güçlü bir sömürü yeteneği kazanır, ancak keşif kabiliyeti azalır. $q0$ için daha küçük bir değer seçildiğinde ise tam tersi etki oluşur. MMKS, KS ve KKS algoritmalarına nazaran daha aç gözlü bir yaklaşım sergiler. Ancak ilgili çevrime kadar bulunan en başarılı çözüm civarında toplanan ajanlar, arama bölgesinin farklı alanlarına dağılmakta zorlanırlar. Bu anlatılanlar ışığında, çözüm bileşenleri arasındaki feromon miktarını daha doğru güncelleyebilmek ve arama bölgesini etkin bir biçimde tarayabilmek için daha iyi çözümleri ezberleyen karınca koloni sistemi (kısaca DİÇE-KKS) önerilmiştir (Ekmekci, 2019). Önerilen metotta, geçiş kuralı için KKS algoritmasındaki işlemler uygulandığından, metoda bu isim verilmiştir.

2.1. DİÇE-KKS Yaklaşımı

DİÇE-KKS yönteminde feromon matrisine (FM) ek olarak bir de “kenarlar matrisi (KM)” kullanılmaktadır. FM’de kaydedilecek feromon miktarları, KM’deki değerlere göre hesaplanır. Çevrimlerde, yapay karıncalar ile çözümler oluşturulduktan sonra, her bir karıncanın elde ettiği çözüm maliyeti, KM’de, ilgili çözümdeki bileşenlere karşılık gelen hücre değerleriyle karşılaştırılır. Eğer karıncanın elde ettiği çözüm değeri, ilgili hücredeki değerden daha başarılıysa, bu hücredeki değer, karıncanın çözüm maliyeti olarak, FM’deki hücre değeri ise yeni feromon değeri olarak güncellenir. Öncelikle KM hücresindeki değer için normalizasyon uygulanarak, maliyet değeri $[0.1, 1]$ arasına indirgenir. (5) eşitliğinde, k karıncası ile elde edilen çözümdeki (C_k), i - j bileşenlerine karşılık gelen KM hücresi için uygulanan normalizasyon işlemi gösterilmektedir.

$$KM_{C_k, i, C_k, j} = 1 - \frac{[maliyet(C_k) - \min(KM)] * 0.9}{[maks(KM) - \min(KM)]} \quad (5)$$

(5) ile elde edilen normalizasyon değeri, seçilen transfer fonksiyonu için giriş değeridir ve elde edilen sonuç, feromon miktarı olarak FM’ye kaydedilir. Karınca k , o ana kadarki en başarılı çözümü elde etmişse, FM’de genel güncelleme, aksi takdirde yerel güncelleme yapılır. DİÇE-KKS ile feromon güncelleme işlemi kısaca Şekil 3’te şematize edilmiştir.

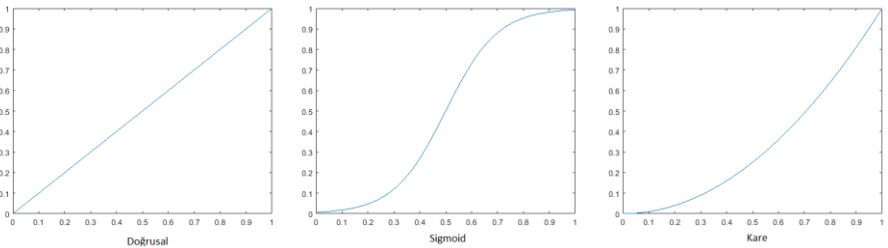


Şekil 3: DİÇE-KKS ile feromon güncelleme

Feromon seviyesinin belirlenmesinde farklı transfer fonksiyonları kullanılabilir.

2.2. Feromon Miktarının Belirlenmesinde Transfer Fonksiyonlarının Kullanımı

DİÇE-KKS ile kombinatoriyal optimizasyon problemi çözümünde, problem karmaşıklığına, parametre karakteristiğine ve tahmini çözüm alanına bağlı olarak farklı transfer fonksiyonları tercih edilebilir. Bu çalışmada, feromon değerlerini belirlemek için Şekil 4'te gösterilen “doğrusal”, “sigmoid” ve “kare” transfer fonksiyonları kullanılmıştır.



Şekil 4: DİÇE-KKS için seçilen transfer fonksiyonları

Doğrusal transfer fonksiyonu feromon değeriyle çözüm başarısını birebir ilişkilendirebilmek için, sigmoid fonksiyon iyi ve kötü çözümleri gruplandırabilmek ve iyi çözümlerin seçilebilme olasılığını artırabilmek için ve kare transfer fonksiyonu ise daha aç gözlü bir yaklaşımla iyi çözümlerin seçilebilme olasılığını daha da artırabilmek için seçilmiştir.

2.3. Feromon Güncelleme

Tüm yapay karıncalar turlarını tamamlayıp yuvaya döndüklerinde ya da algoritmik ifadeyle her bir çevrimde, tüm çözümler oluşturulduktan sonra, çözüm bileşenleri arasındaki feromon değerleri güncellenir. Her ne kadar DİÇE-KKS yöntemindeki feromon güncelleme işlemi de KKS'deki gibi yerel ve genel olmak üzere iki adımda gerçekleştirilse bile yöntemler farklıdır. İlgili çözüm bileşenleri kullanılarak daha başarılı bir çözüm elde edilmişse yerel güncelleme, o ana kadar bulunandan daha iyi bir çözüm elde edilmişse tüm FM'yi etkileyen genel güncelleme uygulanır. En düşük maliyetin araştırıldığı bir optimizasyon probleminde DİÇE-KKS'de k karıncasıyla elde edilen çözüm için feromon güncelleme prosedürü Şekil 5'teki gibidir.

Algoritma 2: DİÇE-KKS'de feromon güncelleme prosedürü

Procedure FeromonGuncelle(ζ_k)

for $i=1$ **to** $n-1$ **do**

if ($\text{maliyet}(\zeta_k) < \text{KM}_{\zeta_k,i,\zeta_k,i+1}$) **then**

$\text{KM}_{\zeta_k,i,\zeta_k,i+1} = \text{maliyet}(\zeta_k)$

end if

end for

if ($\text{maliyet}(\zeta_k) < \text{KM}_{\zeta_k,n,\zeta_k,0}$) **then**

$\text{KM}_{\zeta_k,n,\zeta_k,0} = \text{maliyet}(\zeta_k)$

end if

if ($\text{maliyet}(\zeta_k) < \min(\text{KM})$) **then**

// Genel güncelleme

$\min(\text{KM}) = \text{maliyet}(\zeta_k)$

for $i=1$ **to** n **do**

for $j=1$ **to** n **do**

$\text{normal}_{i,j} = 1 - (\text{maliyet}(\text{KM}_{ij}) - \min(\text{KM})) * 0.9 / (\max(\text{KM}) - \min(\text{KM}))$

// τ_{ij} değerini seçilen transfer fonksiyonuna göre hesapla

$\text{FM}_{ij} = \tau_{ij}$

end for

end for

Else

// Yerel güncelleme

for $i=1$ **to** $n-1$ **do**

$\text{normal}_{\zeta_k} = 1 - (\text{maliyet}(\text{KM}_{\zeta_k i, \zeta_k i+1}) - \min(\text{KM})) * 0.9 / (\max(\text{KM}) - \min(\text{KM}))$

// $\tau_{\zeta_k ij}$ değerini seçilen transfer fonksiyonuna göre hesapla

$\text{FM}_{\zeta_k i, \zeta_k i+1} = \tau_{\zeta_k ij}$

end for

$\text{normal}_{\zeta_k} = 1 - (\text{maliyet}(\text{KM}_{\zeta_k n, \zeta_k 0}) - \min(\text{KM})) * 0.9 / (\max(\text{KM}) - \min(\text{KM}))$

// $\tau_{\zeta_k ij}$ değerini seçilen transfer fonksiyonuna göre hesapla

$\text{FM}_{\zeta_k n, \zeta_k 0} = \tau_{\zeta_k ij}$

end if

End Procedure

Şekil 5: DİÇE-KKS'de feromon güncelleme prosedürü

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Önerilen yöntem, .net ortamında, C# programlama dili ile kodlanmış ve i7-4710MQ 2.50 işlemcili, 8 GB RAM'e sahip ve Windows 7 İşletim Sistemi kurulu makinede çalıştırılmıştır. Uygulama, kombinatoryal

optimizasyon problemlerinin popüler örneklerinden olan GSP üzerinde test edilmiştir.

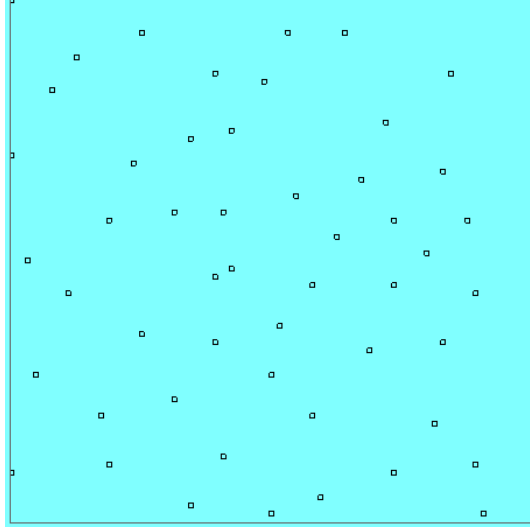
3.1. Gezgin Satıcı Problemi (GSP)

Ayrık yapılı optimizasyon problemlerinin en popüler örneklerinden biri olarak GSP, yöneylem araştırmacıları tarafından, geliştirilen yöntemlerin test edildiği ilk örneklerdendir. İlk örnekleri 1800'lü yıllarda ortaya atılan problemde temel prensip, en kısa uzunlukta kapalı bir graf elde etmeye çalışmaktır. Ziyaret edilecek n tane düğümü olan bir ağ modelinde, satıcı herhangi bir düğümden seyahatine başlayıp tüm düğümleri ziyaret etmek koşuluyla başlangıç düğümüne geri döner (Ateş, 2012). Çözüm maliyeti, doğrudan tur mesafesine bağlıdır. N düğümler kümesi ve E bu düğümler arası kenarlar kümesi olmak üzere, $G(N, E)$ kapalı grafında en kısa Hamilton turu arandığından, problem NP-zor sınıfındadır (Gilbert, 1992). Mesafeler dizisi (D), N ile ilişkilidir ve GSP'nin birçok örneğinde düğümler arası mesafeler simetrik ($d_{ij}=d_{ji}$). Mesafeler hesaplanırken genellikle Öklid formülü kullanılır. Bu bağlamda toplam rota maliyeti (f) eşitlik (6) ile hesaplanır.

$$f = \sum_{i=1}^{n-1} d_{ij} + d_{n1} \quad (6)$$

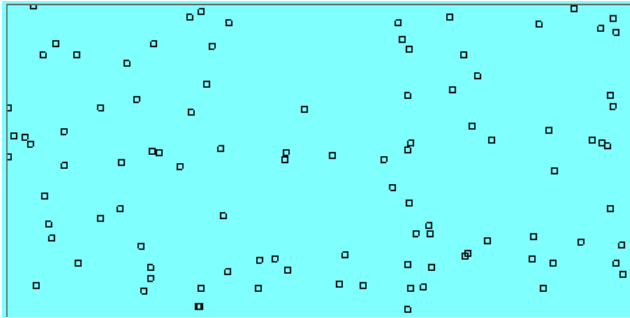
Çalışma kapsamında, önerilen yöntemin başarısını, çözüm arama stratejisini ve yakınsama performansını test edebilmek için TSPLİB kütüphanesinden iki adet test problemi seçilmiştir. Seçilen ilk test problemi (eil51)'nde 51 adet düğüm vardır ve bu problem için elde

edilebilecek en uygun çözüm maliyeti 426'dır. eil51 örneğindeki düğümlerin yerleşimi Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6: eil51 test probleminde düğümlerin yerleşimi

Seçilen ikinci örnekte (KroA100) ise Şekil 7'de gösterildiği gibi 100 adet düğüm bulunur ve bugüne kadar ulaşılabilen en başarılı çözüm maliyeti 21282'dir.

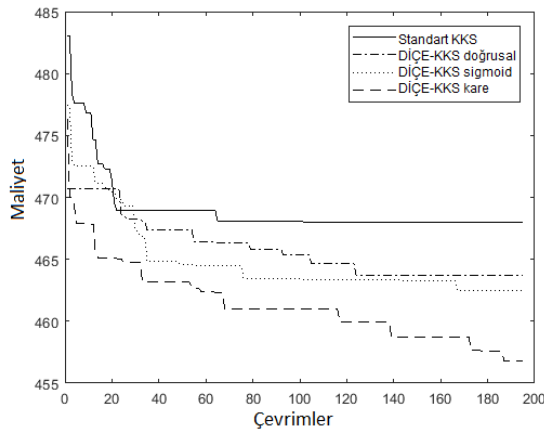


Şekil 7: KroA100 test probleminde düğümlerin yerleşimi

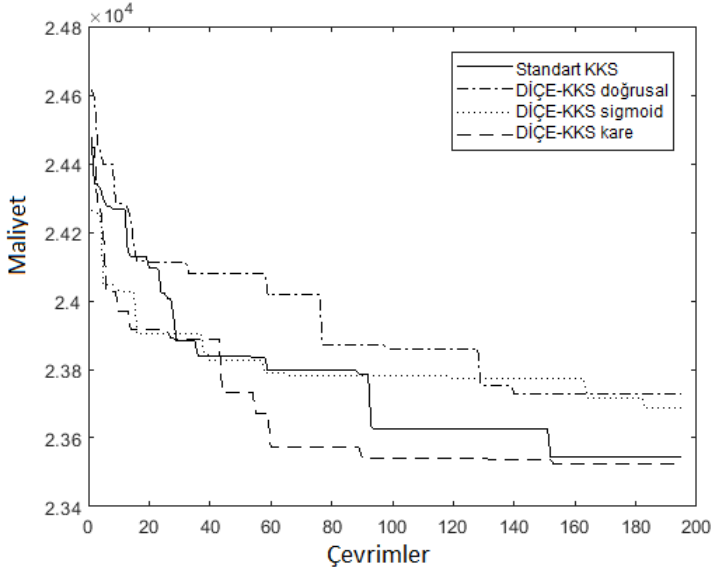
Daha başarılı çözümleri ezberleyen ve feromon seviyesini belirlemek için transfer fonksiyonlarından yararlanan KKS modelinin, standart KKS algoritmasına göre performansını karşılaştırabilmek için algoritmalar aynı parametre değerleriyle ve aynı çevrim sayısınca (1000 çevrim) birbirinden bağımsız olarak 20'şer kez çalıştırılmıştır. DİÇE-KKS algoritması, seçilen üç transfer fonksiyonu için de çalıştırılmıştır. Buna göre algoritmalar için: $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.1$, parametre değerleri seçilmiş ve karınca sayıları, test problemindeki düğüm sayısına eşitlenmiştir ($m=n$).

4. DENEY SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMA

Algoritmaların hepsi de ilk 5 çevrimde başarılı bir yakınsamayla düşük maliyetli çözümlere ulaşabilmişlerdir. Algoritmaların eil51 ve KroA100 test problemleri için 6-200. çevrimlerde elde ettikleri maliyetler Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 8: Algoritmalarının eil51 örneğinden elde edilen sonuçlar



Şekil 9: Algoritmalarının KroA100 örneğinden elde edilen sonuçlar

Şekil 8’deki sonuçlara bakarak, eil51 problemi için, seçilen transfer fonksiyonlarının her üçüyle de KKS algoritmasına kıyasla daha düşük maliyetli çözümler oluşturulmuş ve ilerleyen çevrimlerde daha başarılı çözümlere ulaşabilen bir yakınsama elde edilmiştir. KroA100 test probleminde ise, standart KKS, doğrusal ve sigmoid transfer fonksiyonları kullanan DİÇE-KKS’ye göre daha başarılı çözümler üretmiş ancak kare transfer fonksiyonu kullanan DİÇE-KKS’den geri kalmıştır. Her iki test problemi için elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, kare transfer fonksiyonunun her iki problemde de en başarılı yakınsama ile en iyi sonuçlara ulaştığı görülebilmektedir.

Yakınsama analizinden sonra, önerilen yöntemin performansı diğer KKO algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda DİÇE-KKS, en başarılı sonuçlar ürettiği kare transfer fonksiyonuyla, Stützle ve Hoos'un (Stützle & Hoos, 2000) KS, KKS ve MMKS algoritmalarını karşılaştırmada seçtikleri parametre değerleriyle: $\alpha=1$, $\beta=5$, $\rho=0.02$ ve $m=n$ çalıştırılmıştır. Algoritma, birbirinden bağımsız olarak 25 kez, en çok $2500.n$ çevrim sayısınca çalıştırılmıştır. DİÇE-KKS ile elde edilen ve Stützle ve Hoos'un çalışmalarında elde ettikleri sonuçlar Tablo 1'de karşılaştırılmaktadır. (En iyi sonuçlar eğik olarak yazdırılmaktadır.)

Tablo 1: DİÇE-KKS algoritmasının diğer KKO algoritmalarıyla karşılaştırılması

<i>Problem</i>	<i>Optimum</i>	DİÇE-KKS		MMKS		KKS		KS	
		<i>Sonuç</i>	<i>Başarı Oranı</i>	<i>Sonuç</i>	<i>Başarı Oranı</i>	<i>Sonuç</i>	<i>Başarı Oranı</i>	<i>Sonuç</i>	<i>Başarı Oranı</i>
eil51	426	428.3	0.54	427.6	0.38	428.1	0.49	437.3	2.65
KroA100	21282	21390.7	0.51	21320.3	0.18	21420.0	0.65	22471.4	5.59

Tablo 1'deki sonuçlar incelendiğinde, DİÇE-KKS algoritmasının MMKS haricindeki KKO algoritmalarından daha başarılı sonuçlara ulaşabildiği görülebilmektedir. Önerilen yöntem için, farklı transfer fonksiyonları kullanılarak yöntemin başarısı daha da artırılabilir.

5. SONUÇ

Çalışma kapsamında, KKO algoritmalarının sömürü yeteneğini daha da artırabilmek ve algoritmanın, arama bölgesini etkin bir şekilde tarayabilmesini sağlamak için farklı bir feromon güncelleme tekniği paylaşılmıştır. Bu kapsamda öncelikle daha başarılı çözümleri kaydeden bir kenarlar matrisi ve feromon miktarını bu matrise göre

belirleyen transfer fonksiyonları kullanılmıştır. Yöntem, GSP örnekleri üzerinde test edildiğinde, başarılı bir yakınsama performansı elde ettiği ve diğer bazı KKO algoritmalarından daha başarılı sonuçlar üretebildiği görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Ateş, E. (2012). Gezin Satıcı Probleminin Çözümü Ve 3 Boyutlu Benzetimi.
- Blum, C. (2005). Ant colony optimization: Introduction and recent trends. *Physics of Life Reviews*, 2(4), 353–373. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2005.10.001>
- Dorigo, M., & Di Caro, G. (1999). Ant colony optimization: a new meta-heuristic. In *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)* (Vol. 2, pp. 1470–1477). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEC.1999.782657>
- Dorigo, Marco, & Blum, C. (2005). Ant colony optimization theory: A survey. *Theoretical Computer Science*, 344(2–3), 243–278. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2005.05.020>
- Dorigo, Marco, Maniezzo, V., & Colomi, A. (1991). *Positive feedback as a search strategy*. Milano, Italy.
- Dorigo, Marco, & Stützle, T. (2003). The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances. In *Journal of the Operational Research Society* (Vol. 60, pp. 250–285). https://doi.org/10.1007/0-306-48056-5_9
- Ekmekci, D. (2019). An Ant Colony Optimization Memorizing Better Solutions (ACO-MBS) for Traveling Salesman Problem. In *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT.2019.8932768>
- Gilbert, L. (1992). The Traveling Salesman Problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal Of Operational Research*, 59, 231–247. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.461.189&rep=rep1&type=pdf>
- Stützle, T., & Hoos, H. H. (2000). MAX-MIN Ant System. *Future Generation*

Computer Systems, 16(8), 889–914. [https://doi.org/10.1016/S0167-739X\(00\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0167-739X(00)00043-1)

BÖLÜM 4

AKADEMİK SINAV ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜNDE ÇAKIŞMA MATRİSİ KULLANAN 0-1 TAMSAYILI PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Mutlu AKINCI¹

¹ Erzurum Teknik Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Ekonometri Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE, mehmet.akinci@erzurum.edu.tr

*Bu çalışma, 12-14 Şubat 2020 tarihlerinde Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Ekonometri Bölümü ev sahipliğinde İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi yerleşkesinde gerçekleşen 20. Uluslararası Ekonometri, Yöneylem Araştırması ve İstatistik (EYİ2020) Sempozyumu'nda "Akademik Sınav Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde 0-1 Tamsayı Programlama Yaklaşımı ve İİBF'de Bir Uygulama" adıyla sunulan özet bildirinin genişletilmiş ve gözden geçirilmiş halidir.

GİRİŞ

Çizelgeleme; belirli bir amaç doğrultusunda kıt kaynakların mevcut kısıtlar altında ve önceden tanımlı zaman dilimi için nasıl kullanılacağıının planlanması sürecidir. Günümüzde eğitim alanında ders programı ve sınav, ulaşım alanında araçların rotalarının ve mürettebatlarının, fabrikalarda montaj hatlarının, sağlık sektöründe doktor ve hemşire mesaipleri ve ameliyathane kullanımını vb. daha birçok alanda çizelgeleme yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve oldukça önem arz etmektedir.

Bu açıdan çizelgeleme sürecinde, kıt kaynakların sınırsız ihtiyaçlar doğrultusunda en optimal şekilde kullanımını inceleyen Yöneylem Araştırması'ndan faydalanılması kaçınılmaz olmuştur. Bu kadar farklı alanlardaki önemli ihtiyaçları karşılaması nedeniyle, çizelgeleme problemlerinin çözümü oldukça popüler ve güncel bir konu haline gelmiş; Çizelgeleme problemlerinin çözümüne ilişkin birçok model, yöntem geliştirilmiş ve halen geliştirilmeye devam etmektedir.

Özellikle akademik çizelgeleme problemleri konusunda üniversitelerde yaygın olarak çalışılmalar devam etmektedir. Akademik çizelgeleme problemleri iki alt problemden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla ders çizelgeleme problemleri ve sınav çizelgeleme problemleridir (Demir ve Çelik, 2016). Genel olarak aynı yapıda olmalarına karşın bazı farklılıkları vardır. Bunlar kısaca; ders çizelgeleme problemlerine ilişkin geliştirilen matematiksel modellerde genellikle amaç fonksiyonları öğretim isteklerini karşılamaya çalışan bir fonksiyondan oluşurken dersler arası çakışmayı önlemek katı bir kısıt değildir.

Oluşturulan çizelgeler uygulamaya konulduğunda dersi çakışan öğrenciler olabilmektedir ki bu durum çizelgenin iptalini veya güncellenmesini gerektirmeyebilir. Sınav çizelgeleme problemlerine ilişkin geliştirilen matematiksel modellerde ise genellikle amaç fonksiyonları öğrencilerin sınavlarını homojen şekilde dağıtmaya çalışan bir fonksiyondan oluşurken sınavlar arası çakışmayı önlemek katı bir kısıt yapısındadır. Oluşturulan çizelgeler uygulamaya konulduğunda sınavı çakışan herhangi bir öğrencinin olması durumunda çizelgenin iptali veya çakışmayı önleyici bir güncellenmenin yapılması zorunludur. Bu nedenden dolayı sınav çizelgeleme problemlerinin çözümü ve optimal sonuca ulaşılabilmesi daha zordur.

Birçok üniversitede sınav çizelgelerinin oluşturulması aşamasının elde yapılmaya devam edildiği görülmektedir. Önsel bilgi olan tecrübe, bu süreçte başlıca rolü oynamakla beraber bu yöntemde öğrencilerin günlük sınav sayıları ve sınav dağılımları gibi performans kriterlerine göre ne kadar optimal bir çizelgeleme oluşturulduğu bilinmemektedir. Diğer taraftan literatürdeki akademik zaman çizelgeleme problemleri için oluşturulan matematiksel modellerin birçoğunda ise çakışmaması gereken dersler önsel bilgiye dayalı varsayımlarla belirlenmektedir. Ancak bu yöntemin öğrencilerin aldığı derslerden elde edilen çakışma matrisini kullanan yöntem kadar sağlıklı sonuç üretmeyeceği ve bir öğrenciye aynı anda iki veya daha fazla sınava atamayacağının garantisi yoktur. Bu çalışma kapsamında üniversitelerde doğan ihtiyacı karşılamak amacıyla ortaya çıkan akademik zaman çizelgeleme problemlerinden sınav çizelgeleme üzerinde durulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatürdeki ilgili çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü bölümde matematiksel model kurulum aşamaları açıklanarak model oluşturulmuştur. Dördüncü bölümde ETÜ İİBF’de geçmiş dönemlerinden birisi seçilerek önerilen model kullanılarak dönem sonu sınav çizelgesi oluşturulmuş, alternatif kısıtlar ile alternatif amaç fonksiyonları incelenmiş ve performansları değerlendirilmiştir. Sonuç bölümünde oluşturulan çizelge ile önceden elde hazırlanan çizelge karşılaştırılarak yöntemin faydası incelenmiştir.

1. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmada çizelgeleme problemlerinden üniversitelerde kullanılan sınav çizelgelerine yönelik model geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu nedenden dolayı literatür taramasında özellikle sınav çizelgeleme problemi ile ilgili çalışmalara odaklanılmıştır. Ancak literatürdeki akademik çizelgeleme problemi üzerine yazılmış yayınların çoğu ders çizelgeleme problemi alanında olduğu için sınav çizelgeleme problemleri alanında aynı oranda yayına rastlanmamıştır. Bu nedenden dolayı sınav çizelgeleme problemleri alanında yapılan yayınların genelinde kaynakçalar incelendiğinde yayınların büyük bir çoğunluğu ders çizelgeleme problemleri hakkında yazılmış yayınlardan oluşmaktadır.

Altunay ve Eren (2017), ders ve sınav çizelgeleme problemleri konusunda 1960’tan 2015 yılına kadar toplam 202 akademik yayının 2 ana başlık toplam 14 alt başlıkta sınıflandırıp inceleyerek geniş

kapsamlı bir literatür taraması yapmışlardır. Kaynakçada yer alan 202 yayının başlıkları incelendiğinde bunların büyük bir çoğunluğu ders çizelgeleme problemleri üzerine olduğu görülmektedir.

Qu, Burke, McCollum, Merlot ve Lee (2009), çalışmalarının başlıca amacının sınav çizelgeleme problemleri alanındaki son on yıldaki yeni eğilimler ile başarıları vurgulamak ve önemli araştırma konuları ile zorluklarını özetlemek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında sınav çizelgeleme problemleri alanında kullanılan yöntemleri ve bu yöntemlere ilişkin zengin bir literatür taramasını sunmuşlardır.

Al-Yakoob, Sherali ve Al-Jazzaf, M. (2007), sınav çizelgeleme problemi için önerdikleri modeli Kuveyt Üniversitesi'nde denemişlerdir. Bu çalışma karşılaşılan kısıt yapılarının çeşitliliği ve hem sınav hem de gözetmen atamasının yapılması sebebiyle literatürdeki en geniş kapsamlı çalışmalardan biridir. Elde edilen sonuçlar mevcut durumda elde hazırlanan çizelgelerle karşılaştırıldığında çakışmaları ortadan kaldırmanın yanında genel verimlilik açısından anlamlı iyileştirmelerin olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmalarında önerilen model sınav çizelgeleme problemi ve gözetmen atama problemi olmak üzere iki alt problemin modellenmesi ile oluşturulmuştur. Çözüm aşamasında öncelikle sınav çizelgeleme problemi çözümlenmiş ve elde edilen sonuçlar kullanılarak gözetmen atama problemi çözümlenmiştir.

Acar ve Şevkli (2013), öğretim üyelerinin ve öğrencilerin isteklerini göz önünde bulunduran sınav çizelgeleme probleminin çözümüne yönelik yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Çözüm

aşamasında karşılaşılan çözüm zamanının uzunluğu nedeniyle tüm modelin tek seferde çözümlenmesi yerine yeni bir sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Her ders, dersi alan öğrencilerin hangi fakülteden olduğuna göre kümelerle ayrılarak her küme kendi içi içinde aşamalı olarak çözümlenmiştir.

Fealko (2005), sınav çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılmak üzere ilk defa Parçacık Sürü Optimizasyonu kullanan bir yöntem geliştirmiştir.

Akbulut ve Yılmaz (2013), çift ana dal, yan dal yapan ve tekrar durumunda olan öğrencilerin olduğu durumlarda sınav çizelgelerinin hazırlanmasının zorluklarına değinmişlerdir. Problemin çözümünde Grafik Renklendirme Algoritmasını kullanan bir yöntem önermişlerdir. Ayrıca derslik kapasitesinin en verimli şekilde değerlendirilmesi için farklı derslerin sınavlarının aynı anda aynı derslikte yapılmasını önermişlerdir.

Abou Kasm, Mohandes, Diabat ve El Khatib (2019), Masdar Bilim ve Teknoloji Enstitüsü'nde yapılan sınavlar için çizelge oluşturmuşlardır. Çalışmalarında problemlerinin kısıt yapısının karmaşıklığına ve problemin genelinin zorluğuna vurgu yapmışlardır. Problemlerinin küçük bir kısmının ticari çözümleri ile çözülebildiğini ancak problemin tamamına uygulandığında çözümlerin performansının kötüleştiğini vurgulamışlardır. Sonuç olarak çalışmalarında Grafik Renklendirme Algoritmasını kullanan bir yöntem önermişlerdir. Ayrıca

önerdikleri sezgisel yöntemin kısa bir süre içerisinde optimal ve optimale yakın sonuçlar ürettiğini göstermişlerdir.

Ceylan, Yüksel, Yıldız ve Şimşak (2019), gözetmen atama ve sınav çizelgelemeyi içeren bir hedef programlama model önermişlerdir. Hedefleri sırasıyla gözetmenlerin taleplerini olabildiğince karşılamak ve başarı oranı %85'ten düşük sınavları arasındaki süreyi olabildiğince açmak. Modelin çözümlenmesinde GAMS/CPLEX yazılımı kullanılmıştır. Ardından elde edilen sonuçların, elde hazırlanan çizelgeden elde edilen sonuçlara üstünlüğü sunulmuştur.

Çavdur ve Köse (2016), öğrencilerin sınavlarının dengeli bir dağılımda olması için bulanık mantık ve hedef programlama kullanan bir model önermişlerdir. Ayrıca çalışmalarında derslerin kredileri, başarı oranları ve sınıf türleri olmak üzere üç başlıkta topladıkları bilgileri kullanarak sınavların kritiklik seviyelerini bulan bir bulanık kritiklik düzeyi tanımlama yöntem geliştirmişlerdir. Çavdur, Değirmen ve Köse (2018), sınavların kritiklik seviyelerinin elde edilmesi konusunda Ward yöntemi ve k-ortalamlar kümeleme algoritmasının kullanımı önermişlerdir. Çalışmalarının sonucunda bulanık mantık temelli yaklaşım ile Ward & k-ortalamlar kümeleme algoritması yaklaşımlarının yaklaşık aynı sonuçları ürettiğini göstermişlerdir.

2. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL

Modelin kurulum aşamasında sırasıyla kullanılan indisler, parametreler ve tanım kümeleri verilmiş. Ardından karar değişkenleri, kısıtlar ve amaç fonksiyonu açıklanarak adım adım model oluşturulmuştur.

Önerilen modele ilişkin indisler ve tanım kümeleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1: İndisler, Açıklamaları ve Tanım Kümeleri

İndis	Açıklama	Tanım Kümesi
d,e	Ders indisi	$D=\{1,2,\dots,d_{\max}\}$ d_{\max} : Dönemdeki toplam ders sayısı
g	Gün indisi	$G=\{1,2,\dots,g_{\max}\}$ g_{\max} : Sınav dönemdeki toplam gün sayısı
o	Oturum indisi	$O=\{1,2,\dots,o_{\max}\}$ o_{\max} : Sınav dönemde bir gündeki maksimum sınav sayısı
i	Öğrenci indisi	$I=\{1,2,\dots,i_{\max}\}$ i_{\max} : Dönemdeki toplam öğrenci sayısı
s	Sınıf indisi	$S=\{1,2,\dots,s_{\max}\}$ s_{\max} : Sınav döneminde sınav yapılabilecek toplam derslik sayısı

Önerilen modele ilişkin parametreler ve açıklamaları Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2: Parametreler ve Açıklamaları

Parametre	Açıklama
ödad_{id}	ödad , her bir öğrencinin dönemde aldığı dersleri gösteren bir matris. ödad_{id} , i. öğrencinin d. dersi alıp almadığını göstermektedir. Değer 0 ise i. öğrencinin dersi almadığını, 1 ise aldığını göstermektedir.
çakışma_{de}	çakışma, d dersinin e dersi ile ortak öğrencisi olup olmadığını göstermektedir. Köşegeni 1'lerden, geri kalan kısmı 1 ve 0'lardan oluşan simetrik bir matristir. Değeri 0 ise d ve e derslerinin çakışmadığını, 1 ise çakıştığını göstermektedir.
dm_d	dm , d dersini alan öğrenci sayısını göstermektedir.
sınıfk_s	sınıfk, s. sınıfta sınava girebilecek maksimum öğrenci sayısını göstermektedir.
msınıfk	Sınav döneminde sınav yapılabilecek dersliklerden kapasitesi en küçük dersliğin kapasitesi

Önerilen modele ilişkin karar değişkenleri ve açıklamaları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3: Karar Değişkenleri ve Açıklamaları

Parametre	Açıklama
atama_{dgo}	d. dersin sınavının g. günün o. oturumuna atanması durumunda 1, atanmadığı durumda 0 değerini alan ikili türde bir değişkendir.
sınıfa_{dgos}	d. dersin sınavının g. günün o. oturumunda s. sınıfa atanması durumunda 1, atanmadığı durumda 0 değerini alan ikili türde bir değişkendir.
asınıfk_d	d dersinin sınavı için atanan sınıflardaki kullanılmayan atıl kapasiteyi gösteren tamsayı türde bir değişkendir.
ögss_{ig}	i. öğrencinin g. günde girmesi gereken toplam sınav sayısını gösteren tamsayı türde bir değişkendir.
ögmss_i	i. öğrencinin sınav döneminde bir gününde girmesi gereken maksimum sınav sayısını gösteren tamsayı türde bir değişkendir.
gmss	Sınav döneminin her hangi bir gününde bir öğrencinin girmesi gereken maksimum sınav sayısını gösteren tamsayı türde bir değişkendir.

Kısıtlar

Önerilen model geliştirilme aşamasında probleme ilişkin bazı kısıtlar farklı şekillerde oluşturulmuştur.

1. denklemden her dersin sınavının sınav döneminde herhangi bir günün herhangi bir oturumuna muhakkak atanmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{g=1}^{g_{max}} \sum_{o=1}^{o_{max}} atama_{dgo} = 1 \quad \forall d \in D \quad (1)$$

Sınavların dersliklere atanması sağlamak için literatürde 2. denklemden sunulan kısıt veya benzerleri yapılar önerilmektedir. Bu kısıt yapısının, dersi alan öğrencilerin sayısını karşılayacak kadar sınıf atanması yapabilmeye karşın daha fazla sayıda gereksiz derslik kullanımını engelleyecek bir mekanizması bulunmamaktadır.

$$\sum_{s=1}^{s_{max}} (sinifa_{dgos} * sinifk_s) \geq (atama_{dgo} * dm_d) \quad \forall d \in D, g \in G, o \in O \quad (2)$$

Bu çalışma kapsamında sınavların dersliklere atanmasını sağlamak için 3. denklemden sunulan kısıt önerilmiştir. Ancak mevcut dersliklerin kapasiteleri birbirine benzer olduğu durumlarda kullanılmalıdır. Farklılığın çok olduğu durumlarda 3. denklemden sunulan kısıtın kullanımını en küçük dersliğin kullanımını konusunda baskı oluşturarak modelin çözümünü güçleştirebilir. Bu çalışma kapsamında kullanımının sebebi uygulamada kullanılan mevcut dersliklerin

kapasitelerinin 28 veya 30 gibi homojen bir yapıda olmasından kaynaklıdır.

$$\left(\sum_{s=1}^{s_{max}} (sınıfa_{dgos} * sınıfk_s) \right) \quad \begin{array}{l} \forall d \in D, g \\ \in G, o \in O \end{array} \quad (3)$$

$$- (atama_{dgo} * dm_d) \leq msınıfk$$

Eğer çalışmanın amacı en az sayıda derslik kullanımı ve dolayısıyla gözetmen yükünün azaltılması ise; 4. denklemde sunulan kısıt ile

$$\left(\sum_{s=1}^{s_{max}} (sınıfa_{dgos} * sınıfk_s) \right) \quad \begin{array}{l} \forall d \in D, g \\ \in G, o \in O \end{array} \quad (4)$$

$$- (atama_{dgo} * dm_d) = asınıfk_d$$

5. denklemde sunulan amaç fonksiyonu beraber kullanılabilir.

$$Min \sum_{d=1}^{d_{max}} asınıfk_d \quad (5)$$

6. denklemde bir dersliğe aynı gün ve aynı oturumda birden fazla dersin sınavının atanmasını engellemektedir.

$$\sum_{d=1}^{d_{max}} sınıfa_{dgos} \leq 1 \quad \forall g \in G, o \in O, s \in S \quad (6)$$

7.,8. ve 9. denklemlerde ortak öğrencisi olan derslerin sınavlarının aynı gün ve aynı oturuma atanmasını engellemektedir. 7. denklemde çakışmayı önlemek için çakışma matrisi dersleri ikili olarak eşleştirerek kullanılırken,

$$\begin{aligned} atama_{dgo} + (\text{çakışma}_{de} * atama_{ego}) & \leq 1 & \forall d(d = 2, \dots, d_{max}), \\ & & e(e = 1, \dots, d), \\ & & g \in G, o \in O \end{aligned} \quad (7)$$

8. denklemde çakışmayı önlemek için çakışma matrisi ders bazında kullanılmaktadır.

$$\sum_{e=1}^{d_{max}} (\text{çakışma}_{de} * atama_{dgo}) \leq 1 \quad \forall d \in D, g \in G, o \in O \quad (8)$$

9. denklemde ise öğrencinin aldığı dersleri gösteren ödad matrisini kullanılmaktadır.

$$\sum_{d=1}^{d_{max}} (\text{ödad}_{id} * atama_{dgo}) \leq 1 \quad \forall i \in I, g \in G, o \in O \quad (9)$$

Nihai modelde 7.,8. ve 9. denklemden sadece birisi kullanılacaktır.

Bu noktaya kadar sunulan kısıtlar teknik açıdan sınav çizelgeleme problemleri için zorunlu olan temel kısıtlardır. Bu noktadan sonra sunulan kısıtlar öğrencilerin sınav yüklerinin sınav dönemine daha homojen yayılımını sağlamak için önerilmiştir.

10. denklem ile model içinde öğrencilerin günlük sınav sayıları elde edilmektedir.

$$\text{ögss}_{ig} = \sum_{d=1}^{d_{max}} \sum_{o=1}^{o_{max}} (\text{ödad}_{id} * \text{atama}_{dgo}) \quad \forall i \in I, g \in G \quad (10)$$

11. denklem ile model içinde öğrencilerin sınav döneminde bir gününde girmesi gereken maksimum sınav sayıları elde edilmektedir.

$$\text{ögss}_{ig} \leq \text{ögmss}_i \quad \forall i \in I, g \in G \quad (11)$$

12. denklem ile model içinde öğrencilerin sınav döneminde her hangi bir gününde bir öğrencinin girmesi gereken maksimum sınav sayısı elde edilmektedir.

$$\text{ögss}_{ig} \leq \text{gmss} \quad \forall i \in I, g \in G \quad (12)$$

Amaç Fonksiyonu

Önerilen model geliştirilme aşamasında probleme ilişkin alternatif amaç fonksiyonları oluşturulmuştur.

13. denklemdeki amaç fonksiyonu öğrencilerin sınav döneminde her hangi bir gününde bir öğrencinin girmesi gereken maksimum sınav sayısı en küçükmeye çalışmaktadır.

$$\text{Min } (gmss) \quad (13)$$

14. denklemdaki amaç fonksiyonu ise öğrencilerin sınav döneminde bir gününde girmesi gereken maksimum sınav sayılarının toplamını en küçüklemeye çalışmaktadır. Bu amaç fonksiyonun 12. denklemdaki amaç fonksiyonundan üstün olduğu nokta her bir öğrencinin sınav takviminin daha homojen olmasını sağlamasıdır.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^{i_{max}} \text{ögmss}_i \quad (14)$$

3. UYGULAMA

Bu çalışmada önerilen model, ETÜ İİBF'ye ait 2017-2018 Bahar yarıyılına ait dönem sonu sınav çizelgesi oluşturmak için kullanılmıştır. Geliştirilen model, Intel® Core™ i7-2670QM @ 2,2GHz işlemci ve 6GB RAM donanımına sahip bir bilgisayarda çözümlenmiştir. Kullanılan yazılımlar sırasıyla verilerin ve sonuçların düzenlenmesi için Microsoft® Office Excel, Excel'deki veriler ile çözücü arasındaki bağlantı için SolverStudio (Mason, 2013), matematiksel modelin yazımı için Julia programlama dili (Bezanson, Edelman, Karpinski ve Shah, 2017) ile JuMP paketi (Dunning, Huchette ve Lubin, 2017) ve modelin çözümlenmesi için Gurobi Optimizer (Gurobi Optimization, 2018).

Fakülte'deki 38(d_{max}) derse ilişkin sınavlar 11(g_{max}) günde bir zaman diliminde ve günde 3(o_{max}) oturumda yapılmaktadır. Sınavlar, ikisi 30

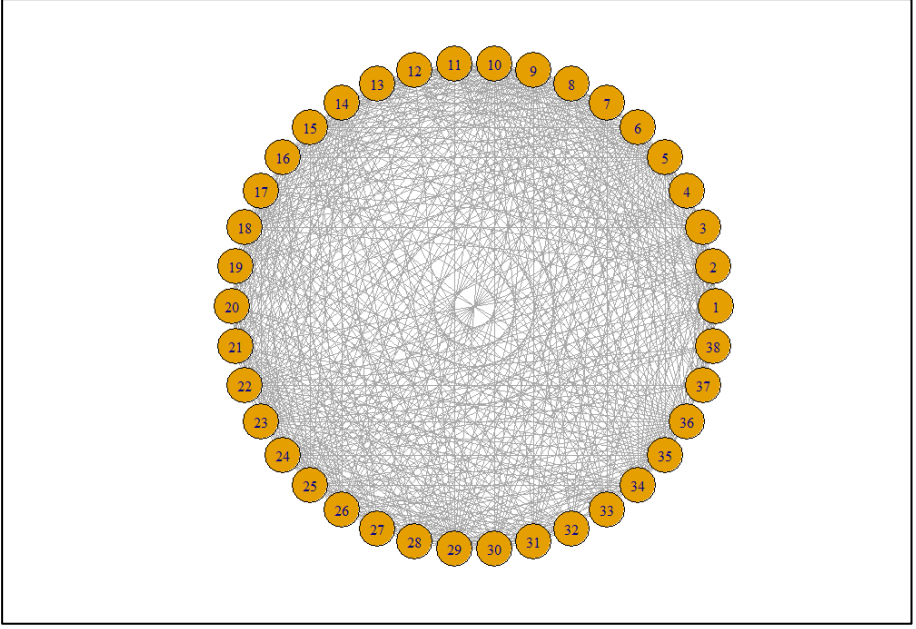
kalan altısı 28 kişilik sınav kapasitesine sahip toplam $8(s_{max})$ derslik kullanılarak yapılmaktadır. Fakülte de kayıtlı $559 (i_{max})$ öğrenci bulunmaktadır.

Öğrenci bilgi sisteminden, her dersin öğrenci listesi alınmıştır. Bu çalışma kapsamında Excel’de yazılan makro kullanılarak ders listelerinden her bir öğrencinin dönemde aldığı dersleri gösteren ödad ve dersler arasındaki çakışma olup olmadığını gösteren çakışma matrisleri ve ders mevcudunu gösteren dm vektörü elde edilmiştir. Elde edilen çakışma matrisinin küçük bir kısmı Tablo 4’te sunulmuştur.

Tablo 4: Çakışma Matrisinden Bir Kesit

	ISL448	SEC481	UOD102	UOZ-TA2	UOZ-YD2	YDY102	YDY202
ISL448	1	0	0	1	1	0	0
SEC481	0	1	0	1	0	0	0
UOD102	0	0	1	1	1	1	1
UOZ-TA2	1	1	1	1	1	1	1
UOZ-YD2	1	0	1	1	1	0	0
YDY102	0	0	1	1	0	1	1
YDY202	0	0	1	1	0	1	1

Şekil 1’de 38 derse ilişkin çakışma matris sunulmuştur.



Şekil 1: Çakışma Matrisinin Grafiksel Gösterimi

Şekil 1'de görüldüğü üzere dersler arası çok fazla çakışma bulunmaktadır. Bu çakışmalardan sadece dönem derslerinin kendi aralarında ve bir alt yılın dersleri ile çakışmasını önlemeye çalışarak kaçınmanın Şekil 1'den de görüldüğü üzere yetersiz kalabileceği anlaşılmaktadır.

3. bölümde sunulan kısıtların ve amaç fonksiyonlarının performansını incelemek ve nihai modelde hangilerinin kullanılacağına karar vermek için mevcut veri setinden alt kümeler alınarak geliştirilen çeşitli modeller test edilmiştir.

Çakışmayı önlemek için önerilen 7., 8. ve 9. denklemlerde önerilen kısıtların performansı incelendiğinde 8. denklemdeki kısıt yapısı

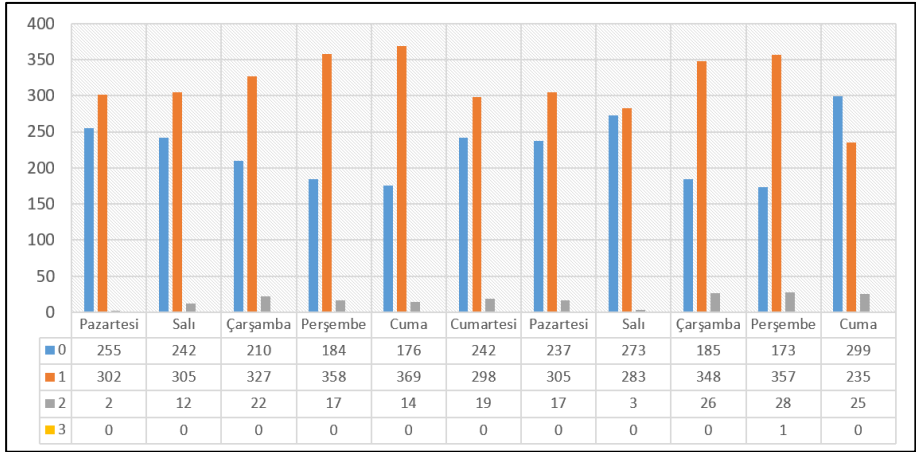
kullanıldığında model çözümlenmeden çok kısa bir süre içerisinde çözücü sonlanmıştır. Denemelerin hiç birisinde bu durum değişmemiştir. 9. denklemdeki kısıt yapısı kullanıldığında ders sayısının az olduğu (559 öğrenci için 20 dersten az) durumlarda daha kısa sürede çözüme ulaşılmıştır. Ancak ders sayısı arttığında çözüm süresi çok fazla artmıştır. Bu kısıt yapısı özellikle öğrenci sayısı 500'ü geçmeyen tek bölüm için kullanılacak sınav çizelgeleme problemlerinde tercih edilmelidir. 7. denklemdeki kısıt yapısı kullanıldığında ders sayısının artmasının çözüm süresi üzerindeki etkisi daha az olmuştur. Bu kısıt yapısı özellikle çok öğrencisi olan fakültelerdeki sınav çizelgeleme problemleri için daha uygundur. Her ne kadar çözüm süresi çok uzun da olsa denemelerde 1-2 saat içerisinde elde edilen sonuçların optimal sonuç ile aynı olduğu görülmüştür.

Öğrencilerin sınavlarının takvime daha homojen dağıtılabilmesi için 13. ve 14. denklemlerde sunulan amaç fonksiyonlarının performansı incelendiğinde 13. denklemde sunulan amaç fonksiyonu (12. denklemde sunulan kısıt yapısı ile birlikte) kullanıldığı her denemede saniyeler içerisinde optimal sonuca ulaşılmıştır. Ancak günlük maksimum sınav sayısı 3 bulunmuş ve günde 2 ve 3 sınava giren öğrenci sayılarının çok fazla olduğu sonuçlar elde edilmiştir. Hata sınavların takvime homojen dağıtım bakımından elde hazırlanan sınav çizelgesi sonuçlarından çok daha kötü sonuçlara ulaşılmıştır. Bu yapı özellikle iş yükleme problemlerinin çözümünde homojen dağıtım konusunda başarılı sonuçlar üretirken sınav çizelgeleme probleminin çözümünde beklenen sonuçları verememiştir. Bu durumda 13.

denklemden sunulan amaç fonksiyonunda değişikliğe gidilmiştir. Genel bir maksimum değerin en küçükleme yerine her bir öğrenciden elde edilen maksimum değerlerin toplamının en küçükleme yolu tercih edilmiştir. Bu yapı bazı durumlarda iş yükleme problemlerinin çözümünde de kullanılmaktadır. Böylece 14. denklemden sunulan amaç fonksiyonuna ulaşılmış ve çok daha iyi sonuçlara elde edilmiştir.

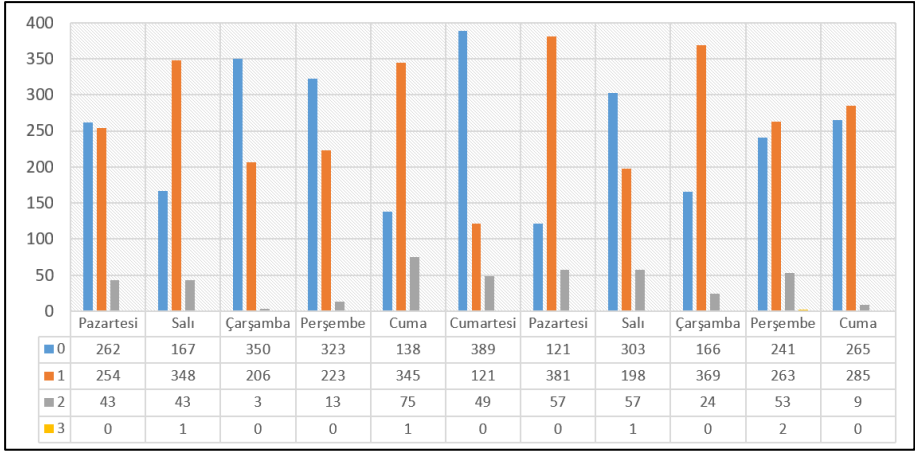
Testlerin sonucunda modelin 14. denklemden sunulan amaç fonksiyonu ve 1.,3.,6.,7.,10. ve 11. denklemlerden sunulan kısıtlardan oluşmasına karar verilmiştir.

Önerilen modelin çözümlenmesiyle elde edilen günlere göre öğrencilerin sınav dağılımları Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2: Modelden Elde Edilen Günlük Sınav Dağılımları

Elde hazırlanan çizelgeden elde edilen günlere göre öğrencilerin sınav dağılımları ise Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 3: Elde Hazırlanan Çizelgeden Elde Edilen Günlük Sınav Dağılımları

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında sınav çizelgelemesi problemlerinde kullanılmak üzere matematiksel bir model önerilmiştir. Model ile elde edilen sonuçların üstünlüğünü görmek açısından Şekil 2 ve Şekil 3 birlikte incelendiğinde;

Bir günde 3 sınava giren öğrenci sayısı 5 öğrenciden 1'e indirilmiştir. Bu öğrencinin durumu incelendiğinde öğrenciler dönemde ortalama 7 ders alırken bu öğrenci birinci sınıftan 2 ikinci sınıftan 6 ve üçüncü sınıftan 1 ders toplam 11 ders almaktadır. Aynı güne denk gelen sınavları incelendiğinde sınavların birisi birinci sınıf, diğeri ikinci sınıf ve sonuncusu üçüncü sınıf dersidir. Tablo 5'te sunulan bu üç derse ilişkin çakışma matrisi incelendiğinde ilk iki dersin mevcudunun ortalama ders mevcudu olan 101 kişiden fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 5: 3 Derse İlişkin Çakışma Matrisi

172	12	3
12	144	12
3	12	52

2 sınava giren öğrenci sayısının günlük ortalaması 39'dan 17'ye düşürülerek %56'lık bir iyileşme sağlanmıştır. Elde hazırlanan çizelgeye göre bir günde 2 sınava giren öğrenci sayısı maksimum 75 iken bu sayı model ile elde edilen çizelgeye göre 28 öğrenciye kadar düşürülmüştür. Bu da %63 oranında bir iyileştirmeyi göstermektedir.

1 sınava giren öğrenci sayısının günlük ortalaması 272'den 317'ye yükseltilerek %17'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Elde hazırlanan çizelgeye göre bir günde 1 sınava giren öğrenci sayısı en az 121 iken bu sayı model ile elde edilen çizelgeye göre 235 öğrenciye kadar yükselmiştir. Bu da %94 oranında bir iyileştirmeyi göstermektedir.

Sınava girmeyen öğrenci sayısının günlük ortalaması 248'den 225'e düşürülerek %9'luk bir iyileşme sağlanmıştır. Elde hazırlanan çizelgeye göre bir günde hiç sınava girmeyen öğrenci sayısı en fazla 389 iken bu sayı model ile elde edilen çizelgeye göre 299 öğrenciye kadar düşürülmüştür. Bu da %23 oranında bir iyileştirmeyi göstermektedir.

Sonuçta bu çalışma kapsamında yapılan uygulamada 33³⁸ olası durumu içeren bir uzayda çözüm aranmıştır. Ayrıca 38 dersin ikili çakışma durumu toplamda en fazla 703 olabilirken uygulamada 544 adet

çakışmayla karşılaşmıştır. Bu durumlar çalışma kapsamında çözümlenen problemin büyüklüğü ve zorluğu göstermektedir.

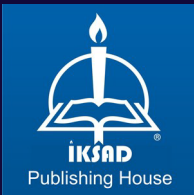
Sonuç olarak hiçbir öğrencinin aynı anda iki veya daha fazla sınava atanmadığı tespit edilmiş olması ve ayrıca öğrencilerin sınavlarının takvime daha homojen bir şekilde dağıtılması çalışmada kullanılan yöntemin başarılı sonuçlara ulaştığını göstermektedir. Ayrıca elde edilen çizelgede ihtiyaca göre günlerin kendi arasında, oturumlarında aynı gün içinde olması kaydıyla kendi içlerinde hiçbir soruna yol açmadan değiştirilebilmesi de yöntemin ne kadar esnek olduğunu göstermektedir. Ayrıca önerilen modelin geliştirilme aşamasında alternatif kısıt yapıları ve amaç fonksiyonları da geliştirilmiş ve incelenmiştir.

KAYNAKLAR

- Abou Kasm, O., Mohandes, B., Diabat, A. ve El Khatib, S. (2019). Exam Timetabling with Allowable Conflicts within a Time Window. *Computers & Industrial Engineering*, 127(January 2019), 263–273. doi:10.1016/J.CIE.2018.11.037
- Acar, M. F. ve Şevkli, M. (2013). Sınav Çizelgelemesi için Matematiksel Model Yaklaşımı. *Verimlilik Dergisi*, 2013(1), 75–86. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/verimlilik/issue/21765/233945> adresinden erişildi.
- Akbulut, A. ve Yılmaz, G. (2013). University Exam Scheduling System Using Graph Coloring Algorithm and RFID Technology. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 4(1), 66.
- Al-Yakoob, S. M., Sherali, H. D. ve Al-Jazzaf, M. (2007). A Mixed-Integer Mathematical Modeling Approach to Exam Timetabling. *Computational Management Science*, 7(1), 19. doi:10.1007/s10287-007-0066-8
- Altunay, H. ve Eren, T. (2017). Ders Programı Çizelgeleme Problemi İçin Bir Literatür Taraması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 55–70. <https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/28108/298434> adresinden erişildi.
- Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S. ve Shah, V. B. (2017). Julia: A Fresh Approach to Numerical Computing. *SIAM Review*, 59(1), 65–98. doi:10.1137/141000671
- Çavdur, F., Değirmen, S. ve Köse Küçük, M. (2018). Sınav Çizelgeleme Problemlerinde Homojen Sınav Dağılımının Oluşturulması için Kümeleme ve Hedef Programlama Temelli Bir Yaklaşım. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(1), 167–188. doi:10.17482/uumfd.346748
- Cavdur, F. ve Kose, M. (2016). A Fuzzy Logic and Binary-Goal Programming-Based Approach for Solving the Exam Timetabling Problem to Create a Balanced-Exam Schedule. *International Journal of Fuzzy Systems*, 18(1), 119–129.

doi:10.1007/s40815-015-0046-z

- Ceylan, Z., Yüksel, A., Yıldız, A. ve Şimşak, B. (2019). Sınav Çizelgeleme Problemi için Çok Amaçlı bir Matematiksel Model ve bir Uygulama. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 942–956. doi:10.18185/erzifbed.513981
- Demir, Y. ve Çelik, C. (2016). Müfredat Bazlı Akademik Zaman Çizelgeleme Probleminin Çözümüne Tam Sayılı Doğrusal Programlama Yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1). doi:10.17341/gummfd.53230
- Dunning, I., Huchette, J. ve Lubin, M. (2017). JuMP: A Modeling Language for Mathematical Optimization. *SIAM Review*, 59(2), 295–320. doi:10.1137/15M1020575
- Fealko, D. R. (2005). *Evaluating Particle Swarm Intelligence Techniques for Solving University Examination Timetabling Problems*. https://nsuworks.nova.edu/gscis_etd/513/ adresinden erişildi.
- Gurobi Optimization, L. (2018). Gurobi Optimizer. <http://www.gurobi.com> adresinden erişildi.
- Mason, A. J. (2013). SolverStudio: A New Tool for Better Optimisation and Simulation Modelling in Excel. *INFORMS Transactions on Education*, 14(1), 45–52. doi:10.1287/ited.2013.0112
- Qu, R., Burke, E. K., McCollum, B., Merlot, L. T. G. ve Lee, S. Y. (2009). A Survey of Search Methodologies and Automated System Development for Examination Timetabling. *Journal of Scheduling*, 12(1), 55–89. doi:10.1007/s10951-008-0077-5



ISBN: 978-625-7897-29-7