



Genetic algorithm based on weighted goal programming for doctor rostering problem

Anıl Yalçın¹, Derya Deliktaş*²

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kütahya Dumlupınar University, 43020, Kütahya, Türkiye

Highlights:

- We propose a genetic algorithm based on a weighted goal programming model for the doctor rostering problem
- The preferences of doctors for shifts and day-offs are taken into account
- The model is successfully applied to a real-life case
- Study

Keywords:

- Doctor Rostering
- Experimental Design
- Genetic Algorithm
- Weighted Goal Programming
- Sensitivity Analysis

Article Info:

Research Article
Received: 08.09.2023
Accepted: 03.02.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1355533

Correspondence:

Author: Derya Deliktaş
e-mail:
derya.deliktas@dpu.edu.tr
phone: +90 274 443 4310

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a more efficient, more effective and fairer way of doctor rostering for a real case application in the lateral branch department and the internal diseases department of a training and research hospital was investigated, and was found that use of weighted goal programming based genetic algorithm (WGP-GA) is advantageous due to efficiency, effectiveness, fairness and meeting multiple demands at the same time rather than scheduling manually.

Weeks	Week 1							Week 2							Week 3							Week 4							
	Days	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	M	M	M	M	M	T	T	M	M	N	M	M	T	T	M	M	M	M	M	T	T	M	N	M	M	M	T	T	
2	M	M	M	M	N	T	T	M	M	M	M	M	T	T	M	M	M	M	M	T	T	M	N	M	M	M	M	T	T
3	M	M	M	M	M	T	T	M	M	M	M	N	T	T	M	M	N	M	M	T	T	M	M	M	M	M	M	T	T
4	M	M	M	M	M	T	T	M	M	N	M	N	T	T	M	N	M	M	M	T	T	M	M	M	M	M	M	T	T
5	M	M	M	M	M	T	T	N	M	M	M	M	T	T	M	N	M	M	M	T	T	M	M	M	M	M	M	T	T
6	M	M	M	M	M	T	T	M	M	M	M	M	T	T	N	M	M	M	M	T	T	N	M	M	M	M	M	T	T
7	M	M	N	M	M	T	T	İ	İ	İ	İ	İ	T	T	İ	İ	İ	İ	İ	T	T	M	M	N	M	M	T	T	
8	M	M	M	M	N	T	T	M	M	M	M	M	T	T	M	M	M	M	M	T	T	N	M	M	M	M	M	T	T
9	M	M	M	M	N	T	T	İ	İ	İ	M	M	T	T	M	M	M	N	M	T	T	M	M	M	M	M	M	T	T
10	M	M	M	N	M	T	T	M	M	M	M	M	T	T	M	M	M	M	M	T	T	M	N	M	M	M	M	T	T
11	M	N	M	M	M	T	T	M	M	M	M	M	T	T	M	M	M	M	N	T	T	M	M	M	M	M	M	T	T
12	M	M	M	M	M	T	T	M	M	M	M	M	T	T	M	M	M	M	N	T	T	M	M	M	N	M	M	T	T
13	M	M	M	M	M	T	T	M	N	M	M	M	T	T	M	M	M	M	M	T	T	M	M	M	N	M	M	T	T

Figure A. The schedule of the professor for main building problem

Purpose:

In the healthcare sector, uninterrupted service is essential for hospitals. Therefore, shift work plays a vital role in satisfying constraints such as coverage requirements and government regulations. The doctor rostering problem is classified as an NP-hard problem due to its complexity and scale. In addition to the fairness of assignments, including hospital management policies, and government regulations, many related factors must be taken into account during the scheduling process in this scheduling problem.

Theory and Methods:

This study aims to generate a rostering system that can satisfy the requirements of the hospital, ensure fairness amongst the doctors, and take preferences into account. A genetic algorithm based on a weighted goal programming model was proposed to solve the doctor rostering problem. The proposed model was applied to the internal diseases department and the lateral branches department of a training and research hospital.

Results:

15 different scenarios were constructed, considering different problem scales and different preference patterns of the doctors that may occur in the future. It is approved that the proposed algorithm can be applied to different problem scales and conditions. The parameters of the proposed algorithm were calibrated with an experimental design method.

Conclusion:

In this study, two main contributions were presented. A model with new constraints was introduced for researchers. In addition, a genetic algorithm based on weighted goal programming was proposed to solve the problem and applied to a real-world case study.



Doktor nöbet cetveli çizelgeleme problemi için ağırlıklı hedef programlama tabanlı genetik algoritma

Anıl Yalçın^{ID}, Derya Deliktaş*^{ID}

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 43020, Kütahya, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Ağırlıklı hedef programlama modeli üzerine temellendirilmiş bir genetik algoritma önerilmiştir
- Nöbetler ve izinler için doktor tercihleri hesaba katılmıştır
- Model, başarılı biçimde bir gerçek-hayat problemine uygulanmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 08.09.2023
Kabul: 03.02.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1355533

Anahtar Kelimeler:

Ağırlıklı hedef programlama,
deney tasarımı,
doktor nöbet cetveli
çizelgeleme,
genetik algoritma,
duyarlılık analizi

ÖZ

Sağlık hizmeti alanında, hastaneler için kesintisiz hizmet esastır. Bu nedenle, vardiyalı çalışma, talep kısıtları ve devlet düzenlemeleri gibi kısıtların karşılanabilmesi açısından oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Doktor nöbet cetveli çizelgeleme problemi, problemin karmaşıklığı ve büyüklüğü sebebiyle NP-zor problem grubu içerisinde tanımlanmaktadır. Bu çizelgeleme probleminde, atamaların adilliğine ek olarak, hastane yönetim politikaları ve hükümet düzenlemeleri dâhil olmak üzere ilgili pek çok faktör hesaba katılmalıdır. Bu çalışma, hastane gereksinimlerini, doktorlar arasındaki adilliği karşılayabilen ve doktor tercihlerini göz önünde bulundurabilen bir nöbet cetveli çizelgeleme sistemi oluşturmayı amaçlamıştır. Ele alınan nöbet cetveli çizelgeleme probleminin çözümü için bir ağırlıklı hedef programlama-tabanlı genetik algoritma önerilmiştir. Önerilen model Türkiye’de bir eğitim ve araştırma hastanesinin Dahiliye Departmanı ve İç Hastalıkları Departmanı’na uygulanmıştır. Gelecekte, oluşabilecek problem boyutları, şartları ve farklı tercih modelleri düşünülerek 15 farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolarla önerilen algoritmanın farklı durumlarda da uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Önerilen algoritmanın parametreleri, bir deneysel tasarım yöntemiyle kalibre edilmiştir. Bu çalışma ile iki ana katkıda bulunulmuştur. Araştırmacılar için yeni kısıtlara sahip bir model önerilmiştir. Ek olarak, problemin çözümü için bir ağırlıklı hedef programlama-tabanlı genetik algoritma önerilerek gerçek-hayat problemine uygulanmıştır.

Genetic algorithm based on weighted goal programming for doctor rostering problem

H I G H L I G H T S

- We propose a genetic algorithm based on a weighted goal programming model for the doctor rostering problem
- The preferences of doctors for shifts and day-offs are taken into account
- The model is successfully applied to a real-life case study

Article Info

Research Article
Received: 08.09.2023
Accepted: 03.02.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1355533

Keywords:

Doctor rostering,
experimental design,
genetic algorithm,
weighted goal programming,
sensitivity analysis

ABSTRACT

In the healthcare sector, uninterrupted service is essential for hospitals. Therefore, shift work plays a vital role in satisfying constraints such as coverage requirements and government regulations. Due to its complexity and scale, the doctor rostering problem is classified as an NP-hard problem. In addition to the fairness of assignments, including hospital management policies and government regulations, many related factors must be considered during the scheduling process for this scheduling problem. This study aims to generate a rostering system that can satisfy the requirements of the hospital, ensure fairness amongst the doctors, and take preferences into account. A genetic algorithm based on a weighted goal programming model was proposed to solve the doctor rostering problem. The proposed model was applied to the Internal Diseases Department and the Lateral Branches Department of a training and research hospital in Turkey. Fifteen different scenarios were constructed, considering different problem scales and different preference patterns of the doctors that may occur in the future. It is approved that the proposed algorithm can be applied to different problem scales and conditions. The parameters of the proposed algorithm were calibrated using an experimental design method. In this study, two main contributions were presented. A model with new constraints was introduced for researchers. In addition, a genetic algorithm based on weighted goal programming was proposed to solve the problem and applied to a real-world case study.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : uemt.yalcinanil@gmail.com, *derya.deliktas@dpu.edu.tr,
*derya.deliktas@outlook.com / Tel: +90 274 443 4310

1. Giriş (Introduction)

Personel çizelgeleme konusunda pek çok farklı alanda çalışma yapılmıştır. Literatürde personel nöbet cetveli çizelgeleme konusuna geniş bir yer ve önem verilmiştir. Ancak karmaşık ve çok kısıtlı problemler olmaları sebebiyle, hepsini kapsayabilecek bir çözüm mevcut değildir. Probleme özgü kısıtlar, gereksinimler ve problemlerin birbirinden farklı yapısı sebebiyle, her bir durum eşsiz ve karakteristiktir [1-3]. Bu problemlerden biri olan doktor nöbet cetveli çizelgeleme problemi, her bir vardiyada/çalışma gününde ihtiyaç duyulan talep karşılanarak doktorların tercihleri göz önünde bulundurularak çalışılan kurumun ihtiyaçlarına uygun şekilde doktorların nöbet atamalarının yapılması biçiminde tanımlanmaktadır [4]. Ekonomik Kalkınma ve İş birliği Örgütü (OECD) ve AB İstatistik Ofisi'nin (Eurostat) 2017 yılı verilerine göre, ülkemizde bir doktor başına 534 hasta düşmektedir [5]. Doktor sayısının az oluşu gerçeğinin dışında son yıllarda salgın hastalıkların gündemde olması sebebiyle doktor nöbet cetveli çizelgeleme alanında bir çalışma gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.

1.1. Sağlık Sektöründe Nöbet Çizelgeleme Problemlerinde Sık Kullanılan Kısıtlar (Constraints Frequently Used in Rostering Problems in the Healthcare Sector)

Çalışılan problemde ve diğer pek çok sağlık alanında yapılan çizelgeleme problemlerinde kanun düzenlemeleri, hastane gereksinimleri sert kısıtlara dâhil edilmiştir. Bu kısıtların sağlanması uygun bir çözüm elde etmenin temel şartını oluşturmaktadır. Bu kısıtlara çalışanların belirli bir periyotta doldurması gereken çalışma süresi ve çizelgeleme periyodu boyunca atanabilecek en fazla vardiya sayısı örnek gösterilebilmektedir. Personel çizelgeleme problemleri çok kısıtlanmış kaynak bölüştürme problemleridir. Literatürde çizelgeleme problemlerinde kullanılan birbirinden farklı çok sayıda kısıt bulunmaktadır. Çizelgeleme probleminde kullanılan kısıtlar genel olarak sert kısıtlar ve yumuşak kısıtlar olmak üzere iki grupta incelenebilmektedir. Sert kısıtlar genelde kapsama gereksinimlerini içermekte (en az/en fazla personel sayısı gibi), yumuşak kısıtlarsa genellikle personel çizelgelerindeki zaman gereksinimlerini içermektedir [4]. Literatürde sağlık alanındaki nöbet cetveli çizelgeleme problemlerinde sıklıkla kullanılan sert kısıtlar EK 1'de verilmiştir. EK 1'de görülen SK#1'den SK#38'e kadar kodlanmış 38 sert kısıt, 2010-2023 yılları arasında literatürde sağlık alanındaki nöbet cetveli çizelgeleme problemlerinde kullanılan sert kısıtları oluşturmaktadır.

Tüm ekler Mendeley Data veritabanında halka açık biçimde erişilebilir olacaktır (<https://data.mendeley.com/datasets/9wzdxpkb9/1>).

Sağlık alanında yapılan çizelgeleme çalışmalarında sıklıkla kullanılan yumuşak kısıtlara ise çalışan personelin tercihleri ve nöbet dağılımının adaleti örnek verilebilmektedir. Bu kısıtların karşılanmaması problemlerin çözümlerinin fizibilitesini etkilememekte, ancak problemlerin çözümlerinin kalitesini düşürmektedir. Literatürde sağlık alanında yapılan çizelgeleme çalışmalarında bahsedilen pek çok problemin çözümünde çözüm kalitesinin iyileştirilmesi için ceza fonksiyonları, sapma değişkenleri ve yumuşak kısıtlar kullanılmıştır. Bahsedilen yumuşak kısıtlar EK 2'de verilmiştir, EK 2'de görüldüğü gibi, bu problemlerde sıklıkla kullanılan bazı yumuşak kısıtlar YK#1'den YK#41'e kadar kodlanarak her birine ait açıklamaları verilmiştir. EK 1'de bahsedilen sert kısıtlar ve EK 2'de bahsedilen yumuşak kısıtlar kullanılan çalışmalara göre sınıflandırılmıştır ve sıklıkları hesaplanmıştır. EK 1 ve EK 2'de bahsedilen kısıtların Zhang vd. [61], Valoux vd. [30], Burke vd. [62], Fan vd. [63], Awadallah vd. [18], Wong vd. [35], Tassopoulos vd. [19], Rasip vd. [64], Awadallah vd. [37], Rahimian

vd. [38], Zheng vd. [20], Aktunc ve Tekin [47], Hadwan vd. [50], Legrain vd. [65], Legrain vd. [66], Kheiri vd. [55], Chen vd. [6], Sarkar vd. [67], Chen vd. [68], Michael vd. [69] çalışmalarındaki dağılımları EK 3'te ve EK 4'te verilmiştir. Bu kısıtların literatürdeki kullanım sıklıkları EK 5'te ve EK 6'da verilmiştir. EK 3 ve EK 4'te literatürde sağlık alanındaki nöbet cetveli çizelgeleme çalışmalarına ait referanslar, problem tipleri, amaç fonksiyonları ve ilgili kısıtlar verilmiştir. Bu çalışmalarda hangi sert kısıtların ve hangi yumuşak kısıtların kullanıldığı sırasıyla EK 3'te ve EK 4'te belirtilmiştir. EK 3'te dağılımları verilen literatürde sıklıkla kullanılan sert kısıtlardan bazıları diğerlerinden çok daha fazla sayıda çalışmada kullanılmıştır. EK 5'te görüldüğü gibi 2010 – 2023 yılları arasında SK#2 on dokuz çalışmada, SK#1 on yedi çalışmada ve SK#38 on üç çalışmada kullanılmıştır. EK 4'te dağılımları verilen literatürde sıklıkla kullanılan yumuşak kısıtlardan bazıları diğerlerinden çok daha fazla sayıda çalışmada kullanılmıştır. EK 6'da görüldüğü gibi YK#37 ve YK#34, 2010 – 2023 yılları arasında dokuz çalışmada kullanılmıştır.

Bu çalışmada, literatür incelemesi, sağlık sektöründe doktor ve hemşire meslek grubuna ait nöbet cetveli çizelgeleme çalışmaları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Sağlık alanındaki personel çizelgeleme çalışmaları incelendiğinde doktor nöbet cetveli çizelgeleme çalışmalarının daha az, hemşire nöbet cetveli çizelgeleme çalışmalarının ise epey geniş yer tuttuğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, doktor ve hemşire sağlık sektöründe yer alan iki farklı meslek grubu olsa da, doktorların kısıtları ve beklentileri hemşirelerden farklı olabilmektedir. Bu sebeplerden ötürü, bu çalışmada doktor nöbet cetveli çizelgeleme problemi ele alınmıştır. İncelenen çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1'de çalışmalara ait problem tipleri, problem boyutları, amaç fonksiyonları ve çözüm metodları verilmiştir. En çok kullanılan çözüm yöntemleri açısından çalışmaları incelediğimizde M'Hallah ve Alkhabbaz [8] tarafından, KTP modeliyle Kuveyt Sağlık Biriminde çalışan 32 hemşire için 28 günlük çizelgeleme yatay ve 3 tip vardiya ve izin günü içeren bir vaka çalışmasında çizelgeleme gerçekleştirilmiştir. Tablo 1'de verilen çalışmaların dışında son yıllarda, sağlık sektöründe güvenlik personeli çizelgeleme [21], gezici sağlık hizmeti rotalama ve çizelgeleme [22], evde sağlık hizmetleri rotalama [23], bir hastane için ameliyat robotu değerlendirme [24], hasta sınıflandırma ve hemşire çizelgeleme [25] problemleri de sağlık sektöründe çalışılan konular arasında yer almaktadır.

Doktor nöbet cetveli çizelgeleme problemleri ve hemşire nöbet cetveli çizelgeleme problemleri NP-zor problem sınıfı içerisinde yer almaktadır ve çözümünde pek çok farklı çözüm metodu kullanılmıştır [60, 30]. Np-zor problemlerin çözümünde meta-sezgisel yöntemler tercih edilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada doktor nöbet cetveli çizelgeleme probleminin çözümü için bir ağırlık hedef programlama-tabanlı GA yaklaşımı önerilmiştir.

Sağlık sektöründeki kaynakların (tıbbi malzeme, doktor, hemşire, personel gibi) sınırlı olması ve maliyetinin yüksek olması nedeniyle, sağlık sektöründe bir planma yapılması zorunludur ve birçok araştırmacının da bu konu ilgisini çekmektedir. Ancak, yasal düzenlemeler, kaynak sınırlamaları gibi ihlal edilemeyen sert kısıtlar ve personel tercihleri, izin günleri gibi yumuşak kısıtlar nedeniyle, diğer kurumlara aksine 24 saat çalışılan bu sektörde çizelgeleme problemi zorlu bir iştir. Ancak personel eksikliği, düzensiz çalışma vardiyaları, personellerin iş yüklerinin adil olmaması personelde iş memnuniyetsizliğine yol açmakta ve bu da hasta memnuniyetini etkileyebilmektedir. Öncesinde sağlık sektöründe yapılan pek çok personel çizelgeleme çalışması bulunmasına rağmen, bu çalışmalar arasında doktor nöbet cetveli çizelgeleme çalışmalarının sayısı epey azdır. Ayrıca, doktor tercihlerini de dikkate alacak gerçek hayat

Tablo 1. Sağlık sektöründe çizelgeleme problemleri üzerine yapılan çalışmalara genel bir bakış
(Overview of studies on scheduling problems in the healthcare industry)

No	Ref.	Problem Tipi	Problem Boyutu			Amaç Fonksiyonu				Çözüm Metodu
			H/D	Gün	Çalışma/İzin Tipi	Tek	Çok	Ağırlıklı	Enb/Enk	
1	[26]	HÇP	10-25	7-28	3/1		√		Enk	SSA
2	[27]	HNCÇP	30	28	3/1		√		Enk	EA
3	[15]	DNCÇP	30	30	1/1	-	-	-	-	PSO
4	[12]	DNCÇP	-	-	-	-	-	-	-	GA
5	[28]	HNCÇP	8	28	3/1		√		Enk	KP-SO
6	[29]	HNCÇP	10-50	28	3-5/1		√	√	Enk	ADKA
7	[30]	HNCÇP	10-50	28	3-5/1		√	√	Enk	2 aşamalı bir algoritma
8	[17]	HNCÇP	11	14	3/1		√	√	Enk	HAA
9	[31]	HNCÇP	19-27	28-42	9-27/1		√	√	Enk	ATO
10	[18]	HNCÇP	10-50	28	3-5/2		√	√	Enk	HAA
11	[32]	HÇP	80	28	3/1		√	√	Enk	TP-SO
12	[10]	HÇP	90	35	3/1		√	√	Enk	TP
13	[33]	HYÇP	30	28	3/1	-	-	-	-	KÇY-EA
14	[8]	HÇP	32	28	3/1		√		Enk	KTP
15	[34]	HNCÇP	8-54	7-42	1-12/1		√	√	Enk	DFA-ÇZY
16	[35]	HÇP	50-60	7	3/1		√	√	Enk	SA-AYA
17	[36]	HNCÇP	20-38	14	4/2		√	√	Enk	DMY, SO ve KP
18	[16]	HNCÇP	10	28	3/1		√		Enk	PSO
19	[37]	HNCÇP	10	28	4/2		√	√	Enk	HYAKA
20	[19]	HNCÇP	10-50	28	3-5/1		√	√	Enk	DKA
21	[9]	HNCÇP	40	30	3/-		√		Enk	KTP
22	[38]	HNCÇP	8-150	14-364	1-32/1		√	√	Enk	TP-DKA
23	[39]	HNCÇP	2-51	26-48	3-12/1		√		Enk	HSA
24	[13]	DNCÇP	25	28	2/2	-	-	-	-	GA
25	[14]	DÇP	24	29	3/1		√	√	Enk	GA
26	[40]	DNCÇP	-	-	-	-	-	-	-	BOHO
27	[41]	DNCÇP	12-40	-	4/1		√		Enk	BT
28	[42]	HNCÇP	8-50	7-28	2-5/1		√	√	Enk	KP-TP
29	[20]	HNCÇP	10-50	28	3-5/1		√	√	Enk	DKA
30	[43]	HNCÇP	-	14	2/1		√	√	Enb	BT- HYAKA
31	[44]	HNCÇP	35-110	28	3/1		√	√	Enk	DKA-SO-GSS
32	[7]	DÇP	20	7	3/1		√	√	Enk	KKCENKM
33	[45]	DNCÇP	50	31	1/1		√	√	Enk	YA-AA-TA
34	[46]	HNCÇP	17-28	14	8/1		√	√	Enk	KTP
35	[47]	HÇP	30	28	3/1		√	√	Enk	HP
36	[48]	HNCÇP	10-50	28	3-5/1	-	-	-	-	MEKS
37	[49]	HNCÇP	35-110	28-56	3/1		√	√	Enk	DKİA
38	[50]	HNCÇP	11-79	7	3/1		√	√	Enk	THAA
39	[51]	HNCÇP	8-150	14-364	1-32/1		√	√	Enk	SO-BT
40	[52]	HNCÇP	30-45	28	3/1		√		Enk	ÖHP
41	[11]	HNCÇP	30-45	28	3/1		√	√	Enk	KTP
42	[53]	HNCÇP	16	30	3/1		√	√	Enk	KAM-AA-YA-PSO
43	[54]	HNCÇP	8-150	14-364	1-32/1		√	√	Enk	DP-SO
44	[55]	HNCÇP	30-120	28-56	4/1		√	√	Enk	MM temelli bir HS
45	[56]	HNCÇP	15-100	7-45	2-3/-		√	√	Enk	DEA
46	[57]	HÇP	10-50	30	3/1		√	√	Enk	KTP-SO
47	[6]	HNCÇP	16-150	28-364	2-32/-		√	√	Enk	KTP- bir DSA destekli SA
48	[58]	HNCÇP	8-60	12-28	1-10/-		√	√	Enk	Mat-Sezgisel
49	[59]	HÇP	61	30	7/1		√		Enb	MCS, NSGA-II

Problem Tipi:

HNCÇP: Hemşire Nöbet Cetveli Çizelgeleme Problemi, HÇP: Hemşire Çizelgeleme Problemi, DNCÇP: Doktor Nöbet Cetveli Çizelgeleme Problemi, DÇP: Doktor Çizelgeleme Problemi, HYÇP: Hemşire Yeniden Çizelgeleme Problemi

çalışması olmadığı derin literatür çalışmasında da görülmektedir. Doktorların tercihlerini ve izin günlerini dikkate alacak şekilde, literatürde sıklıkla kullanılan yumuşak ve sert kısıtlar kapsamında bir model oluşturulmuş ve bu probleme çözüm önerisi sunulmuştur. Yapılan çalışma bu alandaki boşluğa cevap vermektedir. Bu çalışma, yedi bölüm olarak sınıflandırılmıştır. Bölüm 2’de probleme dair

bilgiler, kullanılan sert ve yumuşak kısıtlar, amaç fonksiyonu ve ceza puanları açıklanmıştır. Bölüm 3, problemin çözüm metodu, algoritmanın adımları, kromozom yapısı, tercih ceza değerleri tablosuyla ilgili detaylar sağlanmıştır. Bölüm 4’te kullanılan deneysel tasarım yöntemi, test problemlerinin boyutları, önerilen algorithmada kullanılan parametre değerlerinin seçimiyle ilgili bilgiler verilmiştir.

Bölüm 5'te mevcut durumdaki Ana Bina problemine ait nöbet cetveli ve önerilen algoritma ile oluşturulan Ana Bina problemine ait nöbet cetvelleri analiz edilmiş ve sonuçları karşılaştırmalı biçimde açıklanmış, farklı ceza puanı dağılımları için oluşturulan duyarlılık analizi sonuçları incelenmiştir. Bölüm 6'da çalışmada kullanılan kısaltmalar ve simgeler verilmiştir. Son olarak, Bölüm 7'de sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecekteki çalışmalarda yapılabilecekler üzerinde durulmuştur.

2. Problemin Tanımı (Problem Description)

Bu çalışmada, Türkiye'de bir eğitim araştırma hastanesi'nin Dahiliye Departmanı ve Yan Dal Departmanlarındaki toplam 18 doktor için Nöbet Cetveli çizelgelemesinin oluşturulması hedeflenmiştir. Mevcut durumda doktorların nöbet cetveli çizelgeleme işleyişi hakkında İç Hastalıkları Uzmanları ve Yan Dal Uzmanlarından detaylı bilgi edinilmiştir. Edinilen bilgiye göre problemle ilgili en önemli iki ana ihtiyaç adil nöbet dağılımının sağlanması ve mümkün olduğu kadar nöbetlerin ve izin günlerinin tercihlerine uygun biçimde atanmasıdır. Adil nöbet dağılımını gerçekleştirmek amacıyla özellikle yıllık toplam nöbet sayılarının eşit dağıtılması, Pazartesi ve Cuma günleri nöbeti sayılarının belirli periyot grupları halinde 1 yıl boyunca eşitlenmesine karar verilmiştir. Kısıtların oluşturulmasında ardından, hastane yönetimi, devlet düzenlemeleri ve doktor tercihleri dikkate alınarak kısıtlar sert ve yumuşak kısıtlar olarak gruplanmıştır.

Mevcut problemde uygulama, hastaneye ait Ana bina ve Ek Bina olmak üzere iki ayrı binada gerçekleştirilmiştir. Ana Bina'da bir profesör, üç doktor öğretim üyesi, iki doçent doktor, üç uzman doktor ve Ek Bina'da iki doktor öğretim üyesi ve yedi uzman doktor çalışmaktadır. Bunların dışında problemle ilgili diğer bilgiler aşağıda verilmiştir:

- Her bir periyot 4 hafta (28 gün) ve her bir hafta 7 günden oluşmaktadır.
- Çizelgeleme, 13 periyottan oluşmaktadır.
- Nöbet tutan doktorlar, uzmanlıklarına göre 5 tiptir (Dahiliye, Nefroloji, Hematoloji, Gastroenteroloji, Endokrinoloji ve Metabolizma Hastalıkları).
- Ek Bina'da 9 kişi, Ana Bina'da 9 kişi nöbet tutmaktadır.
- Her iki binada da nöbetçi doktor, konsültasyondan veya mesaiden çıktıktan sonra doğrudan nöbete girmektedir. Bu sebeple, eğer bir doktorun nöbeti varsa, bu o gün için o doktorun 24 saat çalışacağı anlamına gelmektedir.
- Nöbetlerin dağılım biçimi profesör olan doktorlar ve profesör olmayan doktorlar için farklılık göstermektedir.

Bunun dışında çalışmadaki problem için iki varsayımda bulunulmuştur. Bu varsayımlar aşağıda verilmiştir.

1. Doktorların toplam izin hakkı çizelgelemeden sorumlu doktor tarafından takip edilmekte ve her bir doktor için çizelgenin başlangıcında izin hakkı sayısı için veri girişleri bu doğrultuda yapılmaktadır.
2. Yıllık izinlerin başlangıç ve bitiş tarihleri çizelgelemeyi yapan doktor tarafından çalışır durumda bulunması gereken en az doktor sayısı göz önünde bulundurularak yılın başında, yani Ocak ayında belirlenmektedir ve bu doğrultuda çizelgeleme yapılmaktadır.

Problemin tanımında bahsedilen sert kısıtlar ve yumuşak kısıtlar aşağıda sözel biçimde verilmiştir ve sonraki bölümde matematiksel model incelenerek açıklanmıştır.

2.1. Sert Kısıtlar (Hard Constraints)

Çözümlerin uygunluğunu ve kabul edilebilirliğini sağlayan sert kısıtlar çalışılan kurallardan, çalışma gereksinimlerinden ve işleyiş

gereksinimlerinden sorumlu hastanenin mevcut pratiklerine temellendirilmiştir [16]. Çalışılan probleme ait sert kısıtlar aşağıda verilmiştir.

- SK1. Bir izin günü ve bir nöbet günü çakışamaz.
 SK2. Hiçbir doktora ardışık olarak nöbet atanamaz.
 SK3. Profesörler, sadece hafta içi olmak üzere 1 periyot boyunca en az 2, en fazla 5 nöbet tutabilir.
 SK4. Her bir iç hastalıkları uzmanı profesörü her bir periyot için diğer iç hastalıkları uzmanlarının ortalama nöbet sayısının bir eksiğinden az nöbet tutabilir.
 SK5. Her bir yan dal uzmanı profesörü her bir periyot için diğer yan dal uzmanlarının ortalama nöbet sayısının bir eksiğinden az nöbet tutabilir.
 SK6. Her bir periyodun hafta sonu günleri için her bir profesör olmayan doktora en az toplam 6 gün nöbet atanmaz.
 SK7. Ek Bina'daki bir nöbete yalnızca 1 iç hastalıkları uzmanı atanmalıdır.
 SK8. Ana Bina'daki bir nöbete yalnızca 1 yan dal uzmanı atanmalıdır.
 SK9. Çizelgeleme yatayının her günü için Ek Bina'da en az 6 iç hastalıkları uzmanı çalışır durumda bulunmalıdır.
 SK10. Çizelgeleme yatayının her günü için Ana Bina'da en az 6 yan dal uzmanı çalışır durumda bulunmalıdır.

2.2. Yumuşak Kısıtlar (Soft Constraints)

Zorlu ve uzun çalışma şartlarına sahip ve toplum için önemi çok büyük olan sağlık çalışanlarının adil biçimde çalışabilmesi için çizelgelenen nöbet cetvellerinin kalitesi yüksek tutulmalıdır. Nöbet cetvelinin kalitesi yumuşak kısıtların karşılanma derecesine göre belirlenmektedir. Yüksek kalitede uygun bir nöbet cetveli oluşturmak için yumuşak kısıtlar mümkün olduğunca sağlanmalıdır [18, 70]. Çalışmada kullanılan yumuşak kısıtlar aşağıda verilmiştir.

- YK1. Profesör olmayan bir doktora 1 periyotta en fazla 6 nöbet atanabilir.
 YK2. Profesör olmayan bir doktora 1 haftada 2'den fazla nöbet atanamaz.
 YK3. Her bir iç hastalıkları uzmanının çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta tutacakları Pazartesi günü nöbeti sayısı eşit olmalıdır.
 YK4. Her bir iç hastalıkları uzmanının çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta tutacakları Cuma günü nöbeti sayısı eşit olmalıdır.
 YK5. Her bir yan dal uzmanının çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta tutacakları Pazartesi günü nöbeti sayısı eşit olmalıdır.
 YK6. Her bir yan dal uzmanının çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta tutacakları Cuma günü nöbeti sayısı eşit olmalıdır.
 YK7. Her bir iç hastalıkları uzmanı profesörün çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta tuttukları Pazartesi ve Cuma günü nöbet sayıları iç hastalıkları uzmanı doktorların aynı periyot grupları boyunca tuttıkları ortalama Pazartesi ve Cuma günü nöbet sayısına eşit olmalıdır.
 YK8. Her bir yan dal uzmanı profesörün çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta tuttıkları Pazartesi ve Cuma günü nöbet sayıları yan dal uzmanı doktorların aynı periyot grupları boyunca tuttıkları ortalama Pazartesi ve Cuma günü nöbet sayısına eşit olmalıdır.
 YK9. İç hastalıkları uzmanı doktorlar, iç hastalıkları uzmanı profesörlerin tuttuğu yıllık toplam nöbet sayısından kalan nöbet sayısını eşit biçimde paylaşır.
 YK10. Yan dal uzmanı doktorlar, yan dal uzmanı profesörlerin tuttuğu yıllık toplam nöbet sayısından kalan nöbet sayısını eşit biçimde paylaşır.

YK11. Her bir iç hastalıkları uzmanı profesörün yıllık toplam nöbet sayısı eşit olmalıdır.

YK12. Her bir yan dal uzmanı profesörün yıllık toplam nöbet sayısı eşit olmalıdır.

YK13. Doktorların nöbet ve izin günü tercihleri ihlal edilmemelidir. Doktorlar tarafından öncesinde tercih edilen nöbet ve izin günlerinin ihlal edilmesi durumunda önem derecelerine göre ağırlıklandırılmış ceza puanları uygulanır.

Yukarıdaki bilgiler göz önüne alındığında hem problemin yapısı hem kısıtların yapısı gereği bir ağırlıklı hedef programlama yaklaşımı ile problemin çözülmesi önerilmiştir. Literatür taraması bölümünde 2010-2023 yılları arasında yapılan çalışmalarda sık kullanılan sert kısıtlar ve yumuşak kısıtlar incelendiğinde, çalışılan probleme ait periyodik olarak profesör olmayan ve profesör olan doktorlar arasındaki nöbet sayısı ilişkisini sağlayan SK4, SK5 sert kısıtları, profesör olmayan doktorlar ve profesörlerin kendi içerisindeki Pazartesi ve Cuma günleri nöbet eşitliğini sağlayan YK3, YK4, YK5, YK6 yumuşak kısıtlarına rastlanmamıştır. Bu durum, problemin kendine özgü yapısına işaret etmektedir.

Çözüm kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla yumuşak kısıtların ihlalleri sebebiyle gerçekleşen toplam ceza puanını enküçükleyen tek amaçlı bir amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan amaç fonksiyonu aşağıda verilmiştir. Amaç fonksiyonunda yer alan i, p, w ve d indisleri sırasıyla doktor, periyot, hafta ve gün indislerini temsil etmektedir. Eş. 1'de görülen S_{ipwd} karar değişkeni ve SP_{ipwd} parametresi sırasıyla i doktoruna p periyot, w hafta ve d günde nöbet atanmasının karar değişkenini ve ilgili doktorun ilgili periyot, hafta ve gününe ait tercih ceza puanı parametresini göstermektedir.

$$Enk [\sum_i \sum_{p=1}^{13} \sum_{w=1}^4 \sum_{d=1}^7 (1 - S_{ipwd}) \times SP_{ipwd}] \quad (1)$$

$$+ \sum_i \sum_{p=1}^{13} \sum_{w=1}^4 \sum_{d=1}^7 (1 - O_{ipwd}) \times OP_{ipwd} \quad (2)$$

$$+ W_1 \times \sum_{i \in G_{12} \wedge G_{22}} \sum_{p=1}^{13} X_{ip}^+ \quad (3)$$

$$+ W_2 \times \sum_i \sum_{p=1}^{13} \sum_{w=1}^4 Y_{ipw}^+ \quad (4)$$

$$+ W_3 \times (\sum_i \sum_{p=1}^{13} Q_{ip1}^- + \sum_i \sum_{p=1}^{13} Q_{ip1}^+) \quad (5)$$

$$+ W_4 \times (\sum_i \sum_{p=1}^{13} Q_{ip5}^- + \sum_i \sum_{p=1}^{13} Q_{ip5}^+) \quad (6)$$

$$+ W_5 \times (\sum_i \sum_{p=1}^{13} QPD_{ip1}^- + \sum_i \sum_{p=1}^{13} QPD_{ip1}^+) \quad (7)$$

$$+ W_6 \times (\sum_i \sum_{p=1}^{13} QPD_{ip5}^- + \sum_i \sum_{p=1}^{13} QPD_{ip5}^+) \quad (8)$$

$$+ W_7 \times (\sum_i L_i^- + \sum_i L_i^+) \quad (9)$$

Benzer biçimde, Eş. 2'de görülen O_{ipwd} karar değişkeni ve OP_{ipwd} parametresi sırasıyla aynı karar değişkenini ve parametreyi izin günleri için temsil etmektedir. Eş. 2'de görülen OP_{ipwd} parametresi, doktorların nöbet günü ve izin günü tercihleriyle ilişkili YK13 yumuşak kısıtını sağlamayı amaçlamaktadır. Eş. 3 ve Eş. 4'te görülen X_{ip}^+ ve Y_{ipw}^+ pozitif sapma değişkenleri sırasıyla YK1 ve YK2 yumuşak kısıtları ile ilişkili biçimde profesör olmayan doktorlara her bir periyot ve her bir hafta için 6'dan ve 2'den fazla nöbet atanması durumunu önlemek için kullanılan pozitif sapma değişkenlerini temsil etmektedir. Eş. 3 ve Eş. 4 YK1 ve YK2 yumuşak kısıtlarını sağlamayı amaçlamaktadır. YK 3, YK 4, YK 5 ve YK 6 yumuşak kısıtları ile ilişkili, Eş. 5 ve Eş. 6'da yer alan $Q_{ip1}^-, Q_{ip1}^+, Q_{ip5}^-$ ve Q_{ip5}^+ negatif ve pozitif sapma değişkenleriyle, 1 yıl 13 periyot olarak kabul edildiğinde ve çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandırıldığında, her bir periyot grubunun toplam Pazartesi ve Cuma

günü nöbet sayılarının profesör olmayan doktorlar arasında eşitlenmesi sağlanmaktadır. YK 7 ve YK 8 yumuşak kısıtları ile ilişkili, Eş. 7 ve Eş. 8'de yer alan $QPD_{ip1}^-, QPD_{ip1}^+, QPD_{ip5}^-$ ve QPD_{ip5}^+ negatif ve pozitif sapma değişkenleri, çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandırıldığında her bir periyot grubu için profesörlerin Pazartesi ve Cuma günü nöbet sayısını aynı periyot grubu için profesör olmayan doktorların toplam ortalama Pazartesi ve Cuma günü nöbet sayısına eşitlenmesini sağlamaktadır. YK 9, YK 10, YK 11, YK 12 yumuşak kısıtları ile ilişkili, Eş. 9'da yer alan L_i^-, L_i^+ negatif ve pozitif sapma değişkenleri, kendi sınıfında (profesör veya değil) ilgili doktorun yıllık toplam nöbet sayısının diğer doktorlarla eşit biçimde dağılmasını sağlamaktadır. W_1, \dots, W_7 parametreleri yumuşak kısıtların gerçekleştirilmesi için kullanılan ceza puanı ağırlıklarını temsil etmektedir.

Tablo 2. Tercih Ceza Puanları ve Yumuşak Kısıt Ceza Puanları
(The penalty scores for preferences and soft constraints)

Değişken	Ceza Puanı
SP_{ipwd} (Enk)	10
SP_{ipwd} (Ort)	100
SP_{ipwd} (Enb)	1000
OP_{ipwd} (Enk)	10
OP_{ipwd} (Ort)	100
OP_{ipwd} (Enb)	1000
OP_{ipwd} (Yıllık İzin)	2000
W_1	100
W_2	20
W_3 & W_4	150
W_5 & W_6	300
W_7	1000

Problemin büyüklüğü ve sayfa sınırlaması sebebiyle, bu çalışmada sadece matematiksel modelin amaç fonksiyonu verilmiş, sert ve yumuşak kısıtlar sözel biçimde ifade edilmiştir. Bu çalışmaya ait matematiksel modelin eşitlikleri, Yalçın [94] çalışmasında detaylı olarak vermiştir. Eş. 1 – Eş. 9 amaç fonksiyonuyla doktorlara tercih ettikleri nöbet veya izin günlerinin atanmaması veya yumuşak kısıtların ihlal edilmesi durumunda amaç fonksiyonuna ceza puanları eklenerek toplam uygunluk değeri elde edilmektedir. Bu değer enküçüklenerek sırasıyla aşağıdaki amaçlar gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır. Eş. 1 ile doktorların nöbet günü tercihlerine uygun atamalar yapılması, Eş. 2 ile doktorların izin günü tercihlerine uygun atamalar yapılması, Eş. 3 ile profesör olmayan doktorlara 1 periyot için 6'dan fazla nöbet atanmaması, Eş. 4 ile profesör olmayan doktorlara 1 hafta için 2'den fazla nöbet atanmaması, çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 adet biçiminde periyot gruplarına bölündüğünde her bir grup için Eş. 5 ile doktorlara eşit sayıda Pazartesi günü nöbeti atanması, Eş. 6 ile profesör olmayan doktorlara eşit sayıda Cuma günü nöbeti atanması, Eş. 7 ile profesörlere profesör olmayan doktorlara atanan ortalama Pazartesi günü nöbet sayısı ile eşit sayıda Pazartesi günü nöbeti atanması, Eş. 8 ile profesörlere profesör olmayan doktorlara atanan ortalama Cuma günü nöbet sayısı ile eşit sayıda Cuma günü nöbeti atanması, Eş. 9 ile profesörlerin ve profesör olmayan doktorların kendi binaları ve grupları içerisinde yıllık toplam nöbet sayılarının eşitlenmesi amaçlanmaktadır.

Problemin karmaşık yapısı nedeniyle, gerçek-hayat probleminin çözümü için ağırlıklı hedef programlama-tabanlı genetik algoritma (HP-GA) önerilmiştir. Önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri hesaplanırken kullanılan tercih ceza puanları ve yumuşak kısıt ceza puanları Tablo 2'de verilmiştir. Bu ceza puanları, çalışmanın uygulandığı departmandaki doktorlarla beyin fırtınası metodu uygulanarak elde edilmiştir. Bu değerler, normalize edilerek önerilen algoritmada kullanılmıştır.

3. Metodoloji (Methodology)

Darwin evrim teorisinden ilham alınmış, eniyileme (optimizasyon) yöntemlerinden stokastik yöntemler içerisinde incelenen GA, doğal seçim ve doğal genetiğin mekanizmasına temellendirilmiş olasılıksal bir evrimsel arama algoritması biçiminde tanımlanmaktadır. Popülasyon adı verilen bir çözüm setiyle başlatılmaktadır. Her bir jenerasyon boyunca popülasyon büyüklüğü korunmaktadır. Her bir jenerasyonda, her bir kromozomun uygunluk değeri değerlendirilmekte ve sonra uygunluk değerlerine göre bir sonraki jenerasyon için kromozomlar olasılıksal biçimde seçilmektedir. Seçilen bazı kromozomlar rassal olarak eşleşmekte ve çaprazlama ve mutasyon rassal olarak gerçekleştirilerek genç bireyler üretilmektedir. Yüksek uygunluk değerine sahip kromozomlar yüksek olasılıkla seçildiğinden, yeni jenerasyona ait kromozomlar eski jenerasyona ait kromozomlardan daha iyi uygunluk değerine sahip olabilmektedir. Bu evrim süreci sonlandırma şartı sağlanana kadar tekrar etmektedir. GA'daki çözümler diziler veya kromozomlar olarak adlandırılmaktadır [71].

GA, en iyiye yakın çözüm, yüksek hız ve kolay gevşetme gibi karakteristikleri sebebiyle kombinasyonel eniyileme gibi alanlara başarılı bir şekilde uygulanmıştır [72]. GA operatörleri taklit eden paralel bir evrensel arama tekniğidir. Çünkü eş-zamanlı olarak arama uzayındaki pek çok noktayı değerlendirmekte, evrensel en iyiye yakınsama eğilimi göstermektedir. GA popülasyon çözümleriyle çalışarak etkili bir biçimde pek çok yerel minimumu aramakta, böylece evrensel minimuma ulaşma olasılığını artırmaktadır [73].

2010- 2023 yılları arasında yapılan sağlık alanında personel çizelgeleme çalışmaları arasında yer alan doktor nöbet cetveli çizelgeleme ve doktor çizelgeleme problemlerinde, Samah vd. [12], Majid vd. [13], Alharbi ve AlQahtani [14] çalışmalarında görüldüğü gibi sıklıkla GA tercih edilmiştir. Bahsedilenlerden anlaşılacağı gibi geleneksel yöntemlere kıyasla üstünlükleri, problem tipinin ve yapısının uygunluğu ve benzer çalışmalarda GA'nın tercih edilmesi sebebiyle bu problemin çözümü için ağırlıklı hedef programlama tabanlı GA önerilmiştir. Önerilen algoritma C# 2022 programlama dili kullanılarak Intel® Core (TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz ve 8.00GB Ram diz üstü bilgisayarda kodlanmıştır. Önerilen algoritmanın sözde (pseudo) kodu Tablo 3'te verilmiştir. Bunun dışında ek olarak, önerilen metodolojinin iş akış şeması, Şekil 1'de verilmiştir.

Çalışılan problemde, Ana Bina'daki doktorlar için bir kromozom gösterimi Tablo 4'te verilmiştir. Doktor tercihlerinin göz önünde bulundurulması için kullanılan Tablo 5'te tercih ceza puanları tablosu örneği mevcuttur. Tercih ceza puanı parametreleri doktorlar tarafından Ocak ayı başında nöbet ve izin talepleri toplanarak oluşturulmaktadır. Her bir doktordan bir doktor başına düşen nöbet sayısının bir buçuk katını aşmayacak kadar nöbet tercihi ve izin günü hakkı kadar izin günü tercihi alınmaktadır. Bunun sebebi, doktorların tüm nöbet günü tercihlerine atanamayacak olmasıdır. Yıllık izinlerin varsayımların bir parçası olması sebebiyle yıllık izinler her bir doktor için kesin olarak öncesinde karar verilerek karşılanmaktadır. Aksi durum önerilen algoritmada sert kısıt ihlali biçiminde uygunluk fonksiyonuna yansımakta ve ilgili kromozom süreç boyunca elenmektedir.

Yapılan çalışmada uygulanan seçim, çaprazlama, mutasyon, tamir ve yerel arama işlemlerinden sonra yeni nesil üretimi aşamasında elitizm ve yer değiştirme (replacement) yöntemi kullanılmıştır. Elitizm yöntemiyle yeni popülasyon oluşturularak en iyi çözümler korunması garanti edilmektedir. Dolayısıyla her aşamada çözümün uygunluk değerini iyileştirecek biçimde çözüm kalitesinin iyileşmesi de garanti edilmektedir. Yer değiştirme metodu kullanıldığında ise her

bir jenerasyonda bireyler seçilerek en kötü bireyi elemek için yaratılan her bir yeni birey popülasyondaki uygunluk değeri en kötü bireyle karşılaştırılmaktadır. Diğer bir deyişle en kötü bireyin popülasyonda olmaması garanti edilmektedir.

Algoritma durdurma kriteri sağlanana kadar çalışmaya devam etmektedir. Bu çalışmada, durdurma kriteri, enbüyük uygunluk değerlendirme sayısı (*EnbUDS*) olarak ele alınmıştır. Bu değer, Eş. 10'daki formülasyon yardımıyla hesaplanmıştır. Buna göre, periyot sayısı, profesör olan ve profesör olmayan toplam doktor sayısı ile çarpılmaktadır. Elde edilen bu değer, sabit bir kat sayısı (*sbt*) ile çarpılmaktadır.

$$EnbUDS = sbt \times tps \times (\text{profesör sayısı} + \text{profesör olmayan doktor sayısı}) \quad (10)$$

Eşitlikte kullanılan *tps* toplam periyot sayısını ve *sbt* ise sabit katsayıyı ifade etmektedir. Durdurma kriterinde kullanılan sabit katsayının belirlenmesi Şekil 2'de görüldüğü gibi küçük, orta ve büyük örnek setinden keyfi olarak seçilen sırasıyla *No#5*, *No#10* ve *No#15* (Tablo 7) için denemeler yapılarak belirlenmiştir. Test problemlerinin boyutlarıyla ilgili bilgi devam eden bölümünde, Tablo 7'de verilmiştir. Şekil 2'deki *No#5*, *No#10* ve *No#15* test problemleri için yakınsama grafikleri verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi *sbt* = 500 değeri kullanıldığında elde edilen sonuçların problemlerin çözümleri için yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

4. Deneysel Tasarım (Experimental Design)

Deneysel tasarım, bir sürece etki eden faktörler ve çıktı arasındaki ilişkiye karar veren sistematik bir metottur. Deneysel uygulamalardan gerekli sonuçları elde edebilmek için karar verilecek uygun tasarımın seçimi büyük önem taşımaktadır. Genelde, deneysel tasarım tam faktöriyel tasarım (TFT) ve kısmi faktöriyel tasarıma (KFT) ayrılabilir. KFT'nin diğer bir adı da Taguchi Deneysel Tasarımı'dır. TFT'de sonuçları analiz etmek için parametrelerin tüm kombinasyonları test edilmektedir. Ancak, KFT'de seviyelerin sadece seçilmiş bir alt seti analizde kullanılmaktadır [74].

TFT'yi uygulamanın avantajı, faktörlerin ve etkileşimlerinin her birinin etkilerinin bağımsız ve güvenilir çıkarımlarının yapılabilmesidir. TFT ile herhangi bir ölçülen özellik üzerinde karışık parametrelerin ana ve etkileşimli etkileri ayrıştırılabilmektedir. Başka bir ifadeyle, tek seferde bir faktör üzerinde inceleme yapılmaya gerek duyulmamasının yanı sıra olabilecek her faktör ve birden fazla alındığında her bir faktör grubunun etkileri incelenebilmektedir [75, 76]. Ek olarak, KFT'nin ana dezavantajı, elde edilen sonuçların sadece göreceli olması ve hangi parametrenin karakteristik performans değeri üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğunu kesin olarak belirtmemesidir. Ayrıca dikey diziler tüm değişken kombinasyonlarını test etmediği için, tüm değişkenler arasındaki ilişkiler için bu metod kullanılmamalıdır [77]. Bu nedenle, bu çalışmada TFT kullanılarak faktörlerin düzeyleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Önerilen çözümde kullanılacak en uygun parametre değerlerine karar verilebilmesi için literatürde yer alan çalışmalardan sağlık alanında nöbet cetveli çizelgeleme probleminin çözümü için kullanılan GA yaklaşımları incelenmiştir. Tablo 6'da incelenen çalışmalarda kullanılan popülasyon büyüklüğü, çaprazlama oranı, mutasyon oranı parametreleri için uygun parametre değerleri görülmektedir. Tablo 6'daki faktörler ve bu faktörlerin parametre değerleri dikkate alınarak, bu çalışmada tam faktöriyel deney tasarımı için kullanılacak faktörler ve bu faktörlerin düzeyleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Tablo 3. Önerilen algoritmanın sözde kodu (The pseudo code of the proposed algorithm)

1:	Başlangıç çözümlerini rassal olarak oluştur ($Pop_{başlangıç}$)
2:	Uygunluk değerlerini hesapla (Eş. 1-Eş. 9)
3:	$Pop_{mevcut} \leftarrow Pop_{başlangıç}$
4:	while durduma koşulu sağlanana kadar do
5:	Seçim $\leftarrow (Pop_{mevcut}, Turnuva_{büyüklük})$
6:	Çaprazlama $\leftarrow (Ebeveyn - 1, Ebeveyn - 2, 2X)$
7:	Mutasyon $\leftarrow (Çocuk - 1, Çocuk - 2, Değiş - tokuş)$
8:	Tamir Operatörü $\leftarrow (Çocuk - 1', Çocuk - 2')$
9:	Yerel Arama $\leftarrow (Çocuk - 1'', Çocuk - 2'')$
10:	$Çocuk - 1''$ ve $Çocuk - 2''$ nin uygunluk değerlerini hesapla (Eş. 1-Eş. 9)
11:	end while
12:	return Pop_{mevcut} 'taki en iyi birey

Tablo 4. Kromozom gösterimi (Chromosome representation)

Periyot	Hafta	Gün	NÖBET GÜNÜ			İZİN GÜNÜ		
			Prof 1	...	Dok 8	Prof 1	...	Dok 8
1	1	1	0	...	1	0	...	0
1	1	2	1	...	0	0	...	0
...
2	1	1	1	...	0	1	...	1
2	1	2	0	...	0	1	...	1
...
...
...
13	4	5	0	...	0	0	...	0
13	4	6	0	...	1	0	...	0
13	4	7	0	...	0	0	...	0

Tablo 5. Tercih ceza değerleri tablosu (The table of preference penalty values)

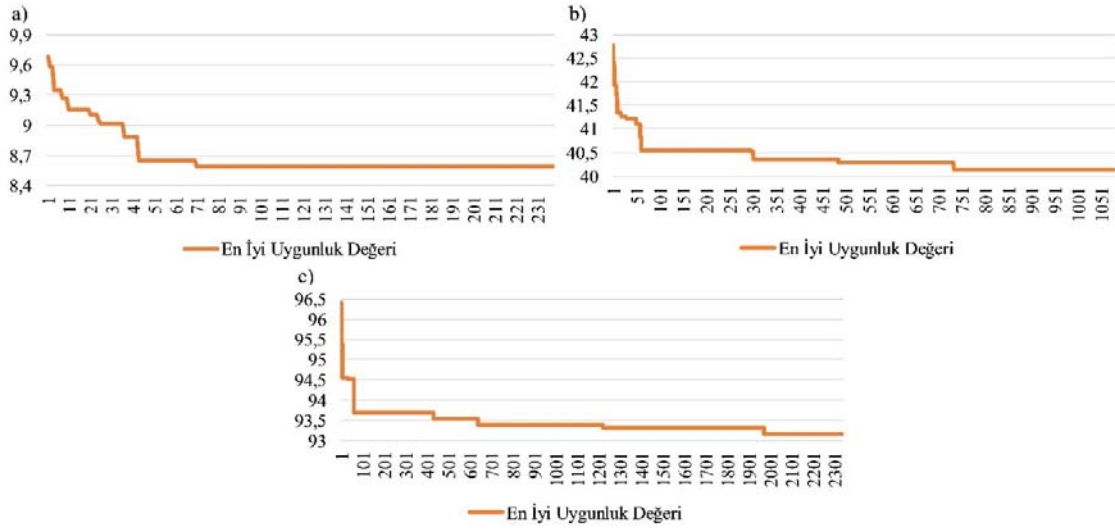
Periyot	Hafta	Gün	NÖBET GÜNÜ			İZİN GÜNÜ		
			Prof 1	...	Dok 8	Prof 1	...	Dok 8
1	1	1	0	...	0	0	...	0
1	1	2	0,0173	...	0	0	...	0
...
2	1	1	0	...	0	0	...	0
2	1	2	0	...	0,1727	0	...	0,0173
...
...
...
13	4	5	0	...	0,0173	0,0173	...	0
13	4	6	0	...	0	0	...	0,0173
13	4	7	0	...	0,0173	0	...	0

Tablo 6. Literatürde kullanılan GA parametre değerleri (GA parameter values used in the literature)

No	Referans	Problem Tipi	Popülasyon Büyüklüğü	Çaprazlama Olasılığı	Mutasyon Olasılığı
1	Puente vd. [4]	DNCCP	100	0,6	0,01
2	Majid vd. [13]	DNCCP	100	0,5	0,01
3	Hosny & Turiki [78]	HNCCP	50	0,2	0,8
4	Rae [79]	HNCCP	100	0,7	0,3
6	Lin vd. [80]	HNCCP	160	0,7	0,02
7	Andriansyah vd. [81]	HNCCP	80	1	0,01
8	Abadi vd. [82]	HNCCP	100	0,5	0,3
9	Rurifandho vd. [83]	DÇP	50	0,2	0,8

Önerilen algoritmanın farklı durumlarda çalışabilirliğini ve uygulanabilirliğini göstermek için, problemin kısıtlarını göz ardı etmeyecek şekilde test problemleri (senaryolar) üretilmiş ve Tablo 7'de bu test problemlerine ait boyutlar verilmiştir. Küçük boyutlu test problemleri, 2-4 periyot arasında ve toplam doktor sayısı 5 doktor olacak şekilde, orta boyutlu test problemleri, 5-9 periyot arasında ve toplam 10 doktor olacak şekilde, büyük boyutlu test problemleri, 10-13 periyot arasında ve toplam 15 doktor olacak şekilde planlanmıştır. SK9 ve SK10 kısıtlarında yer alan herhangi bir günde ilgili departmanda çalışır durumda bulunması gereken doktor sayısı küçük, orta ve büyük boyutlu test problemleri için sırasıyla 3, 6 ve 6 doktor olacak biçimde dikkate alınmıştır. Üretilen test problemlerinde

kullanılacak faktörler ve bu faktörlerin düzeyleri Tablo 8'de verilmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımı, Minitab 19.0 yazılımı ile yönetilmiştir. Deneyler Intel® Core (TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz ve 8.00GB Ram özelliklerine sahip bir dizüstü bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Tablo 8'de görüldüğü gibi, gerçekleştirilen deneyler, popülasyon büyüklüğü (PB), çaprazlama oranı (ÇO), mutasyon oranı (MO) ve yeni nesil üretimi (YÜ) olmak üzere 4 farklı faktör ve ilk üç faktörün düzeyi 3 ve sonuncu faktörün düzeyi 2 olmak üzere toplamda 54 farklı kombinasyondan oluşmaktadır. Önerilen algoritmada, bu faktör ve düzeyleri kullanılarak oluşturulan tam faktöriyel deney tasarımı için her bir test problemi, 31 kez tekrarlanmıştır. 15 test problemi ve 2 gerçek-hayat problemi olmak



Şekil 2. Seçilen test problemleri için yakınsama grafiği (The convergence graph for the selected test problems)

Tablo 7. Test problemlerinin boyutları (The scales of test problems)

Boyut	No	Periyot Sayısı	Profesör (Prof) Sayısı	Profesör Olmayan Doktor Sayısı
Küçük	1	2	0	5
	2	2	1	4
	3	3	1	4
	4	4	1	4
	5	4	0	5
Orta	6	5	0	10
	7	6	4	6
	8	7	3	7
	9	8	1	9
	10	9	2	8
Büyük	11	10	2	13
	12	11	4	11
	13	12	1	14
	14	10	0	15
	15	13	3	12

Tablo 8. Ağırlıklı hedef programlama tabanlı GA'da kullanılan parametreler ve düzeyleri (Parameters and their levels used in the GA based on weighted goal programming)

Parametreler	Düzeyler		
	Düzey 1	Düzey 2	Düzey 3
Popülasyon Büyüklüğü (PB)	40	70	100
Çaprazlama Oranı (ÇO)	0,8	0,9	1,0
Mutasyon Oranı (MO)	0,01	0,1	0,3
Yeni Nesil Üretimi (YÜ)	Yer değiştirme (0)	Elitizm (1)	

üzere toplamda 17 farklı test problemi olduğundan, çalışmada $54 \times 17 \times 31 = 28458$ deney yürütülmüştür. Ortalama uygunluk değerleri sonuçları dikkate alınarak örnek setinden sırasıyla küçük, orta ve büyük boyutlu üç örneğe ait keyfi olarak seçilen No#5, No#10 ve No#15 için oluşturulmuş ANOVA tabloları ve ana etki grafikleri sırasıyla Tablo 9 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Diğer örneklerin uygun parametreleri de benzer şekilde elde edilmiştir.

Karşılıklı olarak bağımsız ve eşit sapma varsayımlarına sahip iki gruba ait ortalamaların farklılıkları bir t-testi kullanılarak elde edilebilmektedir, ancak üç veya daha fazla grubun ortalamalarının farklılıklarını bir veya birden çok faktör açısından incelenmesi için Sapma Analizi (ANOVA) kullanılmaktadır [84, 85, 86]. ANOVA tablosu, faktöriyel deney sonuçlarını raporlamak için standart bir araçtır. Ayrıca, araştırmacıya, bir deneye ilişkin toplanan verinin analizi için rehberdir [87]. Lee [88] çalışmasında, GA operatörlerinin performans üzerindeki etkisini gözlemlemek için bir ANOVA tablosu kullanılmıştır. Faktöriyel ANOVA aralık veya oran ölçülü verilerle çalışan bir parametrik testtir. Faktöriyel ANOVA, kara kutu olan bir sistemi optimize ederken kullanılmaktadır. İki veya

daha fazla faktörden etkilenen bir faktöriyel tasarımı değerlendirmede kullanılmaktadır. Ayrıca, faktörlerin kombinasyonları arasında herhangi bir önemli etkileşim olup olmadığı da bu yöntemle değerlendirilebilmektedir [89]. Ana etkiler grafiği, sürecin girdi parametrelerinin çıktılar üzerindeki etkilerini sağlamakta kullanılmaktadır. Ayrıca, sürecin en iyi durumuna ait girdileri de sağlamaktadır [90].

Tablo 9'a da görüldüğü gibi, No#5 test problemi için p değerleri %95 güven aralığında 0,05'ten daha küçük olan değerler kritik faktörlerdir. Buna göre, ÇO kritik olmayan faktörken, PB, MO ve yeni nesil üretimi (reproduction) kritik faktörlerdir. Şekil 3a'daki ana etkiler grafiğinden kritik faktörler olan PB, 40 (Düzye 1); MO, 0,01 (Düzye 1) ve YÜ olarak da elitizm (Düzye 2) belirlenmiştir. Şekil 3b, Şekil 3c'deki ana etkiler grafiğinden, No#10 için PB, 100 (Düzye 3); MO, 0,01 (Düzye 1) ve YÜ, elitizm (Düzye 2) olarak belirlenirken, No#15 için PB, 100 (Düzye 3); MO, 0,01 (Düzye 1) ve YÜ, elitizm (Düzye 2) olarak belirlenmiştir. Kritik olmayan faktör olan ÇO her iki test problemi için 0,9 olarak ele alındığında ortalama uygunluk değerlerinin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 9. Seçilen test problemleri için ANOVA Tablosu (ANOVA table for the selected test problems)

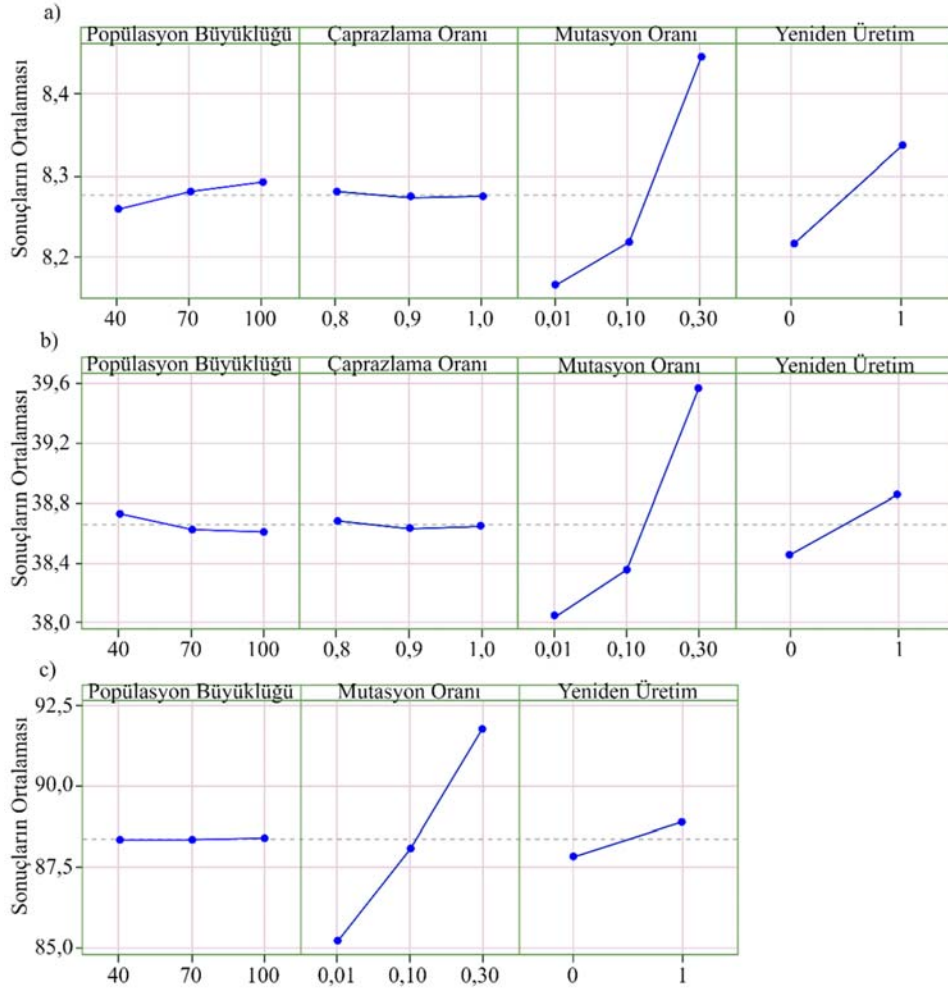
a) No#5 Problemi						
Kaynak	S.D.	Dzl. K.T.	Dzl. K.O.	F Değeri	P Değeri	
Model	29	1,21829	0,04201	224,95	0	
Doğrusal	7	1,00077	0,142967	765,54	0	
Popülasyon Büyüklüğü	2	0,00997	0,004987	26,7	0	
Çaprazlama Oranı	2	0,00052	0,000258	1,38	0,271	
Mutasyon Oranı	2	0,79746	0,398731	2135,06	0	
Yeniden Üretim Stratejisi	1	0,19282	0,192818	1032,47	0	
2-Yönlü Etkileşimler	14	0,2118	0,015128	81,01	0	
Popülasyon Büyüklüğü*Çaprazlama Oranı	4	0,00071	0,000176	0,94	0,456	
Popülasyon Büyüklüğü*Mutasyon Oranı	4	0,00093	0,000232	1,24	0,319	
Çaprazlama Oranı*Mutasyon Oranı	4	0,00027	0,000068	0,36	0,833	
Mutasyon Oranı*Yeniden Üretim Stratejisi	2	0,20989	0,104946	561,95	0	
3-Yönlü Etkileşimler	8	0,00572	0,000715	3,83	0,005	
Popülasyon Büyüklüğü*Çaprazlama Oranı*Mutasyon Oranı	8	0,00572	0,000715	3,83	0,005	
Hata	24	0,00448	0,000187			
Toplam	53	1,22277				
b) No#10 Problemi						
Kaynak	S.D.	Dzl. K.T.	Dzl. K.O.	F Değeri	P Değeri	
Model	9	26,7318	2,9702	604,06	0	
Doğrusal	7	25,9418	3,706	753,7	0	
Popülasyon Büyüklüğü	2	0,1683	0,0841	17,11	0	
Çaprazlama Oranı	2	0,026	0,013	2,64	0,083	
Mutasyon Oranı	2	23,5274	11,7637	2392,43	0	
Yeniden Üretim Stratejisi	1	2,2201	2,2201	451,51	0	
2-Yönlü Etkileşimler	2	0,79	0,395	80,33	0	
Mutasyon Oranı*Yeniden Üretim Stratejisi	2	0,79	0,395	80,33	0	
Hata	44	0,2164	0,0049			
Toplam	53	26,9481				
c) No#15 Problemi						
Kaynak	S.D.	Dzl. K.T.	Dzl. K.O.	F Değeri	P Değeri	
Model	13	409,342	31,488	5764,45	0	
Doğrusal	5	405,983	81,197	14864,6	0	
Popülasyon Büyüklüğü	2	0,049	0,024	4,45	0,018	
Mutasyon Oranı	2	391,664	195,832	35850,7	0	
Yeniden Üretim Stratejisi	1	14,271	14,271	2612,53	0	
2-Yönlü Etkileşimler	8	3,359	0,42	76,86	0	
Popülasyon Büyüklüğü*Mutasyon Oranı	4	0,16	0,04	7,34	0	
Popülasyon Büyüklüğü*Yeniden Üretim Stratejisi	2	0,123	0,061	11,25	0	
Mutasyon Oranı*Yeniden Üretim Stratejisi	2	3,076	1,538	281,54	0	
Hata	40	0,218	0,005			
Toplam	53	409,561				

Tüm test problemleri ve gerçek-hayat problemi için uygun parametre değerleri benzer şekilde hesaplanmış ve belirlenen uygun parametreler kullanılarak ele alınan problemler 31 kez çalıştırılmıştır.

5. Kıyaslamalı Analiz (Comparative Analysis)

Bu bölümde Ana Bina Problemi için mevcut durum ve önerilen çözüm analiz edilmiştir. Analiz sonuçları tablolar halinde açıklanmıştır. Önerilen algoritma çözümü için gerçekleştirilen duyarlılık analizi anlatılmıştır. Bu bölümdeki tablolarda görülen Prof 1: Profesör 1'i, Dok 1: Doktor 1'i, Dok 2: Doktor 2'yi ifade etmektedir. Diğer doktorlar da benzer şekilde ifade edilmiştir. Mevcut duruma ait 1 yıllık nöbet cetveli, nöbet cetveli çizelgeleme işini gerçekleştiren uzman doktordan alınmıştır. Mevcut durumda, çizelgeyi oluşturan uzman doktor çizelgeleme işini Excel tablolama programıyla manuel olarak gerçekleştirmektedir. Tablo 10'da mevcut durum için Ana Bina'daki doktorların hafta sonu nöbet sayıları verilmiştir. Tabloda

profesör olmayan doktorların hafta sonu nöbet sayılarının 1 periyot için 2'ye eşit veya daha küçük olmasıyla ilgili kısıt olan SK 6'nın doktor 4'ün 7. periyodu dışında sağlandığı gözlemlenmiştir. Görüldüğü gibi mevcut durumda elle yapılan çizelgeleme bir sert kısıtın ihlal edilmesine yol açmıştır. Tablo 11'de mevcut durumda Ana Bina'daki doktorlar için atanan periyodik ve yıllık nöbet sayıları verilmiştir. Tablo 11 incelendiğinde profesör olmayan doktorlara bir periyot için 6'dan fazla nöbet atanmamasını sağlayan YK 1'in sağlandığı görülmüştür. Profesörün periyodik nöbet sayılarıyla ilgili kısıt olan SK 3'ün sağlandığı gözlemlenmiştir. Her bir periyot için profesöre, profesör olmayan doktorlara atanan toplam nöbet sayısı ortalamasından daha az nöbet atanmasını amaçlayan SK 5 periyot 10, periyot 12 ve periyot 13'te sağlanmamıştır ve bu sert kısıt ihlal edilmiştir. Bu eşitlikler dışında profesör olmayan doktorların kendi aralarındaki yıllık toplam nöbet sayısı dağılımını sağlayan yumuşak kısıt olan YK 10'un önemli ölçüde ihlal edildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 3. Seçilen test problemleri için ana etki grafiği (Main effects plot for the selected test problems)

Tablo 10. Mevcut durum için hafta sonu nöbet sayısı (The number of shifts at weekends for the current situation)

	Dok 1	Dok 2	Dok 3	Dok 4	Dok 5	Dok 6	Dok 7	Dok 8
1. Periyot	1	2	2	1	1	1	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7. Periyot	1	1	0	3	0	0	2	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13. Periyot	1	0	1	1	1	1	1	2
Toplam	14	12	14	13	13	11	14	13

Tablo 12’de mevcut durumda Ana Bina’daki profesör olmayan doktorların haftalık nöbet sayıları verilmiştir. Tablo incelendiğinde profesör olmayan doktorlara haftalık 2’den fazla nöbet atanmamasını sağlayan YK 2’nin gerçekleştirilmeye çalışıldığı, ancak farklı doktorlara ait toplam 3 hafta için ihlal edildiği gözlemlenmiştir. Mevcut durumda Ana Bina için SK 2 sağlanmaya çalışılmış, doktorlara herhangi iki gün için ardışık nöbet atanmasından kaçınılmıştır. SK 3 doğrultusunda profesöre herhangi bir hafta sonu nöbeti atanması önlenmeye çalışılmıştır.

Mevcut duruma ait nöbet cetveli, EK 7’de verilmiştir. EK 7 incelendiğinde mevcut durumda nöbet cetveli çizelgelemesi yapan uzman doktor tarafından, Ana Bina’da SK 1’de belirtilen kısıt dikkate alınarak herhangi bir izin günü ve nöbet gününün çakışması önlenmeye, her bir gün için bir doktora nöbet atanmasına ilişkin SK 8 ve her bir gün için en az 6 doktorun çalışır durumda bulunmasına ilişkin SK 10, özellikle yıllık izinlerin olduğu periyotlarda belirli doktorlara nöbet atanmayarak sağlanmaya çalışılmıştır, ancak bu durum toplam yıllık nöbetlerin doktorlar arasında oldukça dengesiz biçimde dağılmasına yol açmıştır. Tablo 13’te doktorların toplam Pazartesi günü ve Cuma günü nöbet sayıları paylaşılmıştır. Mevcut durumda Ana Bina için YK 5 ve YK 6’nın profesör olmayan doktorlar

için sağlanamadığı ve büyük ölçüde ihlal edildiği tespit edilmiştir. Bunun dışında, profesör için YK 8’in aynı biçimde genel olarak sağlandığı, ancak özellikle son 4 periyot olmak üzere, periyot gruplarında önemli ihlallerin gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Mevcut durum incelendiğinde Ana Bina’da hem çeşitli sert kısıtların ihlal edildiği hem de adillik kısıtlarının karşılanmadığı gözlemlenmiştir. Özellikle yıllık toplam nöbet sayıları arasındaki adillik kısıtları önemli derecede ihlal edilmiştir. Bunun dışında, mevcut durumda doktor tercihlerinin dikkate alınmaması da önemli bir dezavantaj oluşturmuştur. Tablo 14’te Ana Bina’da önerilen algoritma ile elde edilen çözüm için doktorların hafta sonu nöbet sayıları verilmiştir.

Tabloda profesör olmayan doktorların hafta sonu nöbet sayılarının 1 periyot için 2’ye eşit veya daha küçük olmasıyla ilgili kısıt olan SK 6’nın hafta sonu nöbet dağılımı üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Görüldüğü gibi hafta sonu için meta-sezgisel yaklaşımla her bir doktora nöbet sayıları bir periyot için 2 nöbeti aşmayacak biçimde dağıtılmıştır. Tablo 15’te Ana Bina’daki doktorlar için atanan periyodik ve yıllık nöbet sayıları verilmiştir. Tablo 15 incelendiğinde profesör olmayan doktorlara bir periyot için 6’dan fazla nöbet atanmamasını sağlayan YK 1’in sağlandığı görülmüştür. Profesörün nöbet atamalarıyla ilgili kısıtlar olan SK 3 sağlanarak profesöre bir

Tablo 11. Mevcut durum için periyodik nöbet sayıları (The number of shifts per period for the current situation)

	Prof 1	Dok 1	Dok 2	Dok 3	Dok 4	Dok 5	Dok 6	Dok 7	Dok 8
1. Periyot	2	4	4	3	3	3	3	3	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10. Periyot	3	3	3	4	4	3	3	3	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12. Periyot	3	4	4	3	3	3	2	3	3
13. Periyot	3	3	3	4	4	3	3	2	3
Toplam	28	41	44	42	46	50	41	41	31

Tablo 12. Mevcut durum için haftalık nöbet sayıları (The number of shifts per week for the current situation)

	Dok 1	Dok 2	Dok 3	Dok 4	Dok 5	Dok 6	Dok 7	Dok 8
1. Hafta	1	1	1	1	1	1	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
28. Hafta	0	3	0	1	1	1	0	0
29. Hafta	3	0	0	1	0	1	0	1
30. Hafta	1	1	1	0	0	1	1	1
31. Hafta	1	0	0	1	3	1	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
52. Hafta	1	1	1	1	0	0	1	1

Tablo 13. Mevcut durum için pazartesi ve cuma günü nöbet sayıları (The number of monday and friday shifts for the current situation)

Periyot	Gün	Prof 1	Dok 1	Dok 2	Dok 3	Dok 4	Dok 5	Dok 6	Dok 7	Dok 8
1-3	Pazartesi	3	0	2	2	1	2	0	2	0
	Cuma	1	1	2	0	3	0	2	2	1
4-6	Pazartesi	1	1	3	2	1	2	0	2	0
	Cuma	1	1	2	1	1	1	2	2	1
7-9	Pazartesi	1	1	1	2	3	1	3	0	0
	Cuma	2	2	2	1	1	3	0	1	0
10-13	Pazartesi	5	0	3	2	1	2	0	3	0
	Cuma	1	2	3	0	3	0	3	2	2

Tablo 14. Önerilen çözüm için hafta sonu nöbet sayıları (The number of shifts at the weekends for the proposed solution)

	Dok 1	Dok 2	Dok 3	Dok 4	Dok 5	Dok 6	Dok 7	Dok 8
1. Periyot	1	1	1	1	0	2	1	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7. Periyot	0	1	0	2	1	1	1	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13. Periyot	1	1	0	0	1	2	1	2
Toplam	11	12	14	13	11	12	11	20

periyot için en az 2 ve en fazla 5 nöbet atanmıştır. Ayrıca, Tablo 15'te, önerilen çözüm ile SK 5 doğrultusunda her bir periyot için profesöre, profesör olmayan doktorlara atanan toplam nöbet sayısı ortalamasından daha az nöbet atanmıştır.

Bu eşitlikler dışında profesör olmayan doktorların kendi aralarındaki yıllık toplam nöbet sayısı dağılımı adaletini sağlayan YK 10'un da büyük ölçüde sağlandığı gözlemlenmiştir. Tablo 16'da Ana Bina'daki profesör olmayan doktorların önerilen algoritma ile elde edilen haftalık nöbet sayıları verilmiştir. Tablo incelendiğinde profesör olmayan doktorlara haftalık 2'den fazla nöbet atanmamasını sağlayan YK 2'nin sağlandığı gözlemlenmiştir. Önerilen çözümün nöbet cetveli çizelgesi EK 8¹'de verilmiştir. EK 8 incelendiğinde önerilen algoritma ile sağlanan çözüm için SK 1 sağlanarak herhangi bir izin günü ve nöbet gününün çakışmaması sağlanmıştır. SK 2 sağlanarak doktorlara herhangi iki gün için ardışık nöbet atanması önlenmiştir. SK 3 doğrultusunda profesöre herhangi bir hafta sonu nöbeti atanmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 17'de önerilen algoritma ile sağlanan çözüm için doktorların toplam Pazartesi günü ve Cuma günü nöbet sayıları paylaşılmıştır. Önerilen algoritma ile YK 5 ve YK 6'nın profesör olmayan doktorlar için ve profesör için YK 8'in mümkün olduğunca sağlanması amaçlanmıştır, ancak çeşitli periyot gruplarında ihlaller mevcuttur. Ana Bina'daki doktorlar için oluşturulan nöbet cetveli çizelgeleri, mevcut durumla karşılaştırıldığında özellikle yıllık nöbet sayıları meta-sezgisel yaklaşımla çok daha eşit bir dağılıma sahip olacak biçimde çizelgelenmiştir. Tablo 13 ve Tablo 17 karşılaştırıldığında Pazartesi ve Cuma günü nöbet sayıları dağılımında her iki yaklaşımda da ihlaller görülmüş, ancak meta-sezgisel yaklaşımla çok daha dengeli bir dağılım gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir. Mevcut duruma ait Tablo 13 ve önerilen çözüme ait Tablo 17 karşılaştırıldığında her iki durumda da YK3, YK4, YK5 ve YK6 yumuşak kısıtlarına ilişkin

ihlaller mevcuttur, ancak önerilen çözüm ile çok daha dengeli bir nöbet dağılımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen çözüm ile mevcut duruma kıyasla Tablo 11, Tablo 12, Tablo 15 ve Tablo 16 ile verilen haftalık nöbet sayıları ve periyodik nöbet sayıları ile ilgili kısıtlarda çok daha az sayıda ihlal gözlemlenmiştir. Haftalık nöbet sayıları için ve profesör ve profesör olmayan doktorlar arasındaki nöbet sayılarının dengesi açısından periyodik nöbet sayıları arasındaki ilişkide mevcut durumda ihlaller gözlemlenirken meta-sezgisel yaklaşım uygulandığında herhangi bir ihlal gözlemlenmemiştir. Son olarak, meta-sezgisel yaklaşımla doktorların tercihleri de hesaba katılmış ve sert kısıtların tamamı sağlanmıştır.

5.1. Duyarlılık Analizi (Sensitivity Analysis)

Her ne kadar dikkatli matematiksel kontroller uygulansa da yazılımlar olasılıksal biçimde hatalar veya sorunlar barındırabilmektedir. Duyarlılık analizi, belirsizlik analizinde önemli bir metodolojidir, bu sebeple hem kalibrasyon için hem onaylama için önemlidir [91]. Duyarlılık analizi belirli girdilerin değişmesinin problemin çözümüne nasıl etki ettiğini gözlemlemek için kullanılan bir metottur. Genellikle modelin parametre değerleri için çıkarımlarının güvenilirliğine karar vermekte kullanılmaktadır, aynı zamanda belirli şartlarda bir parametre değişimiyle ilişkili olarak çözüm üzerindeki değişimi ölçmemizi sağlamaktadır [92].

Bu çalışmada kullanılan yumuşak kısıtlar ve doktor tercihlerine ait ceza puanları hastane yönetimi ve çizelgeleme yapan uzman doktor ile yapılan görüşmelerle belirlenmiştir. Ancak, farklı ceza puanı düzenlerinin kullanılmasının problemin çözümü üzerinde nasıl bir etki yaratacağının gözlemlenmesi amacıyla duyarlılık analizi de gerçekleştirilmiştir ve uygulanan analiz kısaca açıklanmıştır. Tablo 18'de duyarlılık analizinde kullanılan doktor nöbet günü tercihi, izin günü tercihi ceza ağırlığı ve yumuşak kısıt ceza ağırlığı değer grupları

Tablo 15. Önerilen çözüm için periyodik nöbet sayıları (The number of shifts per period for the proposed solution)

	Prof 1	Dok 1	Dok 2	Dok 3	Dok 4	Dok 5	Dok 6	Dok 7	Dok 8
1. Periyot	2	1	6	4	4	3	3	3	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7. Periyot	2	3	2	1	4	5	5	4	2
8. Periyot	2	3	4	6	2	5	2	2	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13. Periyot	2	3	4	1	4	4	4	3	3
Toplam	26	43	43	42	42	42	42	42	42

Tablo 16. Önerilen çözüm için haftalık nöbet sayıları (The number of shifts per week for the proposed solution)

	Dok 1	Dok 2	Dok 3	Dok 4	Dok 5	Dok 6	Dok 7	Dok 8
1. Hafta	0	2	2	1	1	1	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29. Hafta	0	1	2	0	1	1	0	1
30. Hafta	1	1	1	1	1	1	1	0
31. Hafta	1	2	2	1	1	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
52. Hafta	0	1	1	2	0	1	1	0

Tablo 17. Önerilen çözüm için pazartesi ve cuma günü nöbet sayıları
(The number of monday and friday shifts for the proposed solution)

Periyot	Gün	Prof 1	Dok 1	Dok 2	Dok 3	Dok 4	Dok 5	Dok 6	Dok 7	Dok 8
1-3	Pazartesi	0	2	2	2	2	1	1	1	1
	Cuma	2	2	2	1	1	1	1	1	1
4-6	Pazartesi	3	2	1	1	1	1	1	1	1
	Cuma	0	2	2	2	2	1	1	1	1
7-9	Pazartesi	1	2	2	2	1	1	1	1	1
	Cuma	2	2	2	1	1	1	1	1	1
10-13	Pazartesi	0	2	2	2	2	2	2	2	2
	Cuma	2	2	2	2	2	2	2	1	1

verilmiştir. Tabloda görülen Duyarlılık-1 grubuna ait ceza ağırlıkları ele alınan çalışmada kullanılan ceza ağırlıklarını temsil etmektedir. Duyarlılık-2 grubu ceza ağırlıklarında Duyarlılık-1 grubu ceza ağırlıklarına göre yumuşak kısıt ceza ağırlıkları, doktor tercih ceza ağırlıklarından biraz daha baskın verilmiştir. Duyarlılık-3 grubu ceza ağırlıklarında Duyarlılık-2 grubu ceza ağırlıklarına göre yumuşak kısıt ceza ağırlıkları, doktor tercih ceza ağırlıklarından biraz daha baskın verilmiştir. Duyarlılık-4 grubuna ait ceza ağırlıklarında ise doktor tercih çeşitleri arasındaki ceza ağırlığı farkı büyük ölçüde azaltılmış, Pazartesi ve Cuma günü nöbet eşitliklerini sağlayan kısıtlara ait ceza ağırlıklarının büyüklüğü artırılmıştır. Değer gruplarındaki ceza ağırlıklarının Ana Bina problemine uygulanması sonucu gerçekleşen kısıt ihlali miktarları Tablo 19'da verilmiştir.

Tablo 19'da görüldüğü gibi, geniş bir çizelgeleme yatayı boyunca uygulanan profesör olmayan doktorlar için yıllık nöbet eşitliğini sağlayan YK 10, profesör olmayan doktorlara 1 periyotta 6 nöbetten fazla nöbet atanmamasını sağlayan YK 1 ve profesör olmayan doktorlar için haftalık 2 nöbetten fazla nöbet atanmamasını sağlayan YK 2'ye ait ihlal miktarlarında herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir. Ancak, genel anlamda yumuşak kısıtların ceza ağırlığının artırılmasıyla yumuşak kısıt ihlalleri nispeten azalmıştır. Bu durum en çok Pazartesi ve Cuma günü yumuşak kısıtlarına ait ceza puanı ağırlığı en yüksek seviyede seçilen ve aynı biçimde doktor tercihleriyle ilgili ceza ağırlığı düşürülen Duyarlılık-4'te gözlemlenmiştir.

Ana Bina probleminde 13 periyot ve toplam 9 doktor için toplam 507 tercih yapılmıştır. Tablo 20 incelendiğinde doktor nöbet günü ve izin günü tercihlerinin ceza ağırlıklarının azaltılmasıyla daha yüksek oranda doktor tercihi ihlal edilmiş ve daha düşük oranda yumuşak

kısıt ihlal edilmiştir. Tablo 20'de görüldüğü gibi Duyarlılık-1 ve Duyarlılık-4 karşılaştırıldığında yumuşak kısıtların toplam ihlal edilme yüzdesinde 9% oranında düşüş gerçekleşirken doktor tercihlerinin ihlal edilme yüzdesinde 2% oranında artış olduğu görülmektedir. Bu durum, nöbet cetvelinin çözüm kalitesini belirleyen bu iki faktör arasındaki ödünleşime işaret etmektedir. Ancak, doktor tercihlerinin ihlalinde önemli bir değişim olmaması sebebiyle Duyarlılık-4'ün tercih edilmesinin makul olduğu görülmektedir.

6. Simgeler (Symbols)

i	: Doktorlar seti
p	: Periyotlar seti
w	: Haftalar seti
d	: Günler seti
G_{bc}	: b . binada bulunan, c . sınıfa tabi olan doktorlar, i 'nin bir alt seti
SP_{ipwd}	: Eğer i doktoruna p . periyot, w . hafta ve d . günde nöbet atandıysa 1, aksi durumda 0
OP_{ipwd}	: Eğer i doktoruna p . periyot, w . hafta ve d . günde izin atandıysa 1, aksi durumda 0
SP_{ipwd}	: i doktorunun p . periyot, w . hafta ve d . gündeki nöbet günü tercih ceza puanı
OP_{ipwd}	: i doktorunun p . periyot, w . hafta ve d . gündeki izin günü tercih ceza puanı
X_{ip}^+	: i doktoruna p . periyotta 6 'dan fazla atanan nöbetler için sırasıyla pozitif sapma değişkeni
Y_{ipw}^+	: i doktoruna p . periyot, w . haftada 2 'den fazla atanan nöbetler için sırasıyla pozitif sapma değişkeni

Tablo 18. Doktor nöbet günü tercihi ve izin günü tercihi ceza ağırlıkları ve yumuşak kısıt ceza ağırlıkları
(The weight of the penalties for the soft constraints, and the weight of the penalties for doctor's shift preferences and day off preferences)

Parametre	Duyarlılık-1	Duyarlılık-2	Duyarlılık-3	Duyarlılık-4
SP_{ipwd} (Enk)	0,0017	0,0012	0,0007	0,0024
SP_{ipwd} (Ort)	0,0173	0,0115	0,0066	0,0048
SP_{ipwd} (Enb)	0,1727	0,1153	0,0661	0,0096
OP_{ipwd} (Enk)	0,0017	0,0012	0,0007	0,0024
OP_{ipwd} (Ort)	0,0173	0,0115	0,0066	0,0048
OP_{ipwd} (Enb)	0,1727	0,1153	0,0661	0,0096
OP_{ipwd} (Yıllık İzin)	0,3454	0,3460	0,3968	0,4785
W_1	0,0173	0,0231	0,0265	0,0239
W_2	0,0035	0,0058	0,0066	0,0096
W_3 & W_4	0,0259	0,0692	0,0794	0,1077
W_5 & W_6	0,0518	0,0692	0,0794	0,1077
W_7	0,1727	0,2307	0,2646	0,2392

Tablo 19. Ceza ağırlığı duyarlılıkları ve kısıt ihlalleri ilişkisi
(The relation between the weights of the penalties and the violation of the constraints)

Kısıtlar	Duyarlılık-1	Duyarlılık-2	Duyarlılık-3	Duyarlılık-4
YK 10	1	1	1	1
YK 1	0	0	0	0
YK 2	0	0	0	0
YK 5 ve YK 6	7	8	8	8
YK 8	9	4,63	5,63	3,13
Toplam Miktar	17,00	13,63	14,63	12,13

Tablo 20. Ceza ağırlığı duyarlılıklarına göre doktor tercihlerinin ihlal edilme yüzdesi
(The percentage of the violations of the doctors' preferences according to the weight of the penalties)

Ölçütler	Duyarlılık-1	Duyarlılık-2	Duyarlılık-3	Duyarlılık-4
Yumuşak Kısıtların Toplam İhlal Edilme Yüzdesi	30%	24%	25%	21%
Doktor Tercihlerinin İhlal Edilme Yüzdesi	44%	45%	45%	46%

Q_{ip1}^-	: Profesör olmayan i doktorunun zaman çizelgesi 3-3-3-4 adetlik periyotlar halinde gruplandığında için Pazartesi günü nöbeti negatif sapma değişkeni	ÇAAEBF	: Çok-Amaçlı Ağırlıklandırılmış En Büyükleme Fonksiyonu
Q_{ip1}^+	: Profesör olmayan i doktorunun zaman çizelgesi 3-3-3-4 adetlik periyotlar halinde gruplandığında için Pazartesi günü nöbeti pozitif sapma değişkeni	ÇAEKF	: Çok-Amaçlı En Küçükleme Fonksiyonu
Q_{ip5}^-	: Profesör olmayan i doktorunun zaman çizelgesi 3-3-3-4 adetlik periyotlar halinde gruplandığında için Cuma günü nöbeti negatif sapma değişkeni	ÇAF	: Çok-Amaçlı Fonksiyon
Q_{ip5}^+	: Profesör olmayan i doktorunun zaman çizelgesi 3-3-3-4 adetlik periyotlar halinde gruplandığında için Cuma günü nöbeti pozitif sapma değişkeni	ÇO	: Çaprazlama Oranı
QPD_{ip1}^-	: i profesörünün zaman çizelgesi 3-3-3-4 adetlik periyotlar halinde gruplandığında için Pazartesi günü nöbeti negatif sapma değişkeni	ÇZY	: Çıkartma Zincir Yöntemi
QPD_{ip1}^+	: i profesörünün zaman çizelgesi 3-3-3-4 adetlik periyotlar halinde gruplandığında için Pazartesi günü nöbeti pozitif sapma değişkeni	DÇP	: Doktor Çizelgeleme Problemi
QPD_{ip5}^-	: i profesörünün zaman çizelgesi 3-3-3-4 adetlik periyotlar halinde gruplandığında için Cuma günü nöbeti negatif sapma değişkeni	DEA	: Diferansiyel Evrim Algoritması
QPD_{ip5}^+	: i profesörünün zaman çizelgesi 3-3-3-4 adetlik periyotlar halinde gruplandığında için Cuma günü nöbeti pozitif sapma değişkeni	DFA	: Dal Fiyat Algoritması
L_i^-	: i doktorunun yıllık toplam nöbet sayısı negatif sapma değişkeni	DKA	: Değişken Komşuluk Araması
L_i^+	: i doktorunun yıllık toplam nöbet sayısı pozitif sapma değişkeni	DKİA	: Değişken Komşuluk İniş Algoritması
W_1	: Profesör olmayan doktorlara dört hafta için altı nöbetten fazla nöbet atanmasının ceza puanı	DMY	: Dal-Maliyet Yöntemi
W_2	: Profesör olmayan doktorlara haftalık iki nöbetten fazla nöbet atanmasının ceza puanı	DNCÇP	: Doktor Nöbet Cetveli Çizelgeleme Problemi
W_3	: Çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta profesör olmayan doktorlara farklı sayıda Pazartesi günü nöbeti atanmasının ceza puanı	Dok	: Doktor
W_4	: Çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta profesör olmayan doktorlara farklı sayıda Cuma günü nöbeti atanmasının ceza puanı	DP	: Doğrusal Programlama
W_5	: Çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta profesörlere diğer uzmanlara atan Pazartesi günü nöbet sayısının ortalamasından farklı sayıda Pazartesi günü nöbeti atanmasının ceza puanı	DSA	: Derin Sınır Ağı
W_6	: Çizelgeleme yatayı 3-3-3-4 periyot biçiminde gruplandığında her bir grupta profesörlere diğer uzmanlara atan Cuma günü nöbet sayısının ortalamasından farklı sayıda Cuma günü nöbeti atanmasının ceza puanı	Dzl. KO	: Düzeltilmiş Kareler Ortalaması
W_7	: Profesör olmayan doktorlara farklı sayıda yıllık toplam nöbet atanmasının ceza puanı	Dzl. KT	: Düzeltilmiş Kareler Toplamı
$EnbUDS$: Enbüyük uygunluk değerlendirme sayısı	DY	: Değişim Yüzdesi
sbt	: Sabit bir katsayı	DY(Dzl.)	: Değişim Yüzdesi (Düzeltilmiş)
tps	: Toplam periyot sayısı	DY(Öng.)	: Değişim Yüzdesi (Öngörülen)
		EA	: Evrimsel Algoritma
		Enb	: Enbüyükleme
		Enk	: Enküçükleme
		GA	: Genetik Algoritma
		GSS	: Gevşet ve Sabitle Sezgiseli
		HAA	: Harmoni Arama Algoritması
		HÇP	: Hemşire Çizelgeleme Problemi
		HNCÇP	: Hemşire Nöbet Cetveli Çizelgeleme Problemi
		HP-GA	: Hedef Programlama Tabanlı Genetik Algoritma
		HSA	: Hiper Sezgisel Algoritma
		HYAKA	: Hibrit Yapay Arı Kolonisi Algoritması
		HYÇP	: Hemşire Yeniden Çizelgeleme Problemi
		KAM	: Karar Ağacı Metodu
		KÇY	: Kesin Çözüm Yöntemi
		KFT	: Kısmi Faktöriyel Tasarım
		KKCENKM	: Kısıt Karşılama ve Ceza En Küçükleme Modeli
		KP	: Kısıt Programlama
		KTP	: Karma Tam sayılı Programlama
		MCS	: Monte Carlo Simülasyonu
		MEKS	: Modifiye Elitist Karınca Sistemi
		MM	: Markov Modeli
		MO	: Mutasyon Oranı
		NSGA-II	: Baskın Olmayan Sıralamalı Genetik Algoritma-II
		ÖHP	: Öncelikli Hedef Programlama
		PB	: Popülasyon Büyüklüğü
		Prof	: Profesör
		PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
		S	: Standart Hata
		SA	: Sezgisel Algoritma
		SD	: Serbestlik Derecesi
		SK	: Sert Kısıt
		SK#	: (Literatürdeki problemler için) Sert Kısıt
		SO	: Sütun Oluşturma
		SSA	: Siber Sürü Algoritması
		TA	: Tabu Araması
		TAACF	: Tek-Amaçlı Ağırlıklandırılmış Ceza Fonksiyonu
		TAEBF	: Tek-Amaçlı En Büyükleme Fonksiyonu
		TFT	: Tam Faktöriyel Tasarım
		THAA	: Tırmanma Harmoni Arama Algoritması
		TP	: Tam sayılı Programlama
		YA	: Yerel Arama
		YA	: Yarasa Algoritması
		YK	: Yumuşak Kısıt
		YK#	: (Literatürdeki problemler için) Yumuşak Kısıt
		YÜ	: Yeni Nesil Üretimi

6.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

AA	: Açgözlü Arama
ADKA	: Adaptif Değişken Komşuluk Araması
ATOA	: Ajan Temelli Ortak Arama
AYA	: Ardışık Yerel Arama
BOHO	: Bütünleşik Otoresif Hareketli Ortalama
BT	: Benzetimli Tavlama

7. Sonuçlar (Conclusions)

Personel nöbet cetveli çizelgeleme probleminin karmaşık yapısı ve problem büyüklüğü sebebiyle pratikte gerçek hayata uygun çizelgeler elde edilmesi her zaman mümkün olmamaktadır. Özellikle, çizelgeleme yapıldıktan sonraki süreç sırasında oluşan, çalışanların pozisyonundan ayrılması, yeni çalışanların iş başı yapması, kadro yapısındaki değişiklikler, kontrol edilemeyen olaylar sonucu takvimde meydana gelen değişiklikler gibi beklenmedik gelişmeler mevcut çizelgeyi kullanılamaz hale getirebilmektedir. Dolayısıyla, doktor nöbet cetveli çizelgeleme çalışması için çözümün adil olması, çalışanların tercihlerine cevap verebilmesi ve talepleri karşılama dışında esnek ve yeniden düzenlenebilir oluşu da büyük öneme sahiptir.

Bu çalışmada literatürde az bir yere sahip olan doktor nöbet cetveli çizelgeleme alanındaki boşluğa cevap vermenin yanı sıra, farklı boyutlardaki ve özelliklerdeki senaryolar için de çözümler sunulmuş bahsedilen esneklik ve yeniden düzenlenebilirlik ihtiyaçlarına da karşılık verilmiştir. Bir gerçek-hayat problemi, Türkiye’de bir eğitim ve araştırma hastanesinin Dahiliye Departmanı ve Yan Dal Departmanı’ndaki toplam 18 doktora uygulanmıştır. Doktor nöbet çizelgeleme probleminin Np-zor yapısı ve doktorların tercihlerinin dikkate alınması nedeniyle, problemin çözümü için ağırlıklı hedef programlama tabanlı genetik algoritma önerilmiştir [60]. Önerilen algoritmanın sonuçları mevcut durumda Excel ortamında elle yapılan nöbet cetveli çizelgelemesinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, yumuşak kısıtların mevcut duruma göre daha az ihlal edildiği gözlemlenmiş, daha adil nöbet dağılımları elde edildiği kanıtlanmıştır. Hatta, önerilen algoritma ile SK 5 ve SK 6 sert kısıtlarının sağlanması mevcut durumda ihlal edilen bu kısıtların iyileştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, mevcut durumda doktorlar arasındaki yıllık nöbet sayısı farkı oldukça yüksekken (bir doktorun tuttuğu en az yıllık nöbet sayısı 31 iken en fazla 50), önerilen algoritma ile bu sayılar dengelenmiştir (yıllık nöbet sayısı 42 veya 43). Organizasyonel adalet ve iş ortamı, çalışanların iş motivasyonu üzerinde hem bireysel olarak hem de toplumsal açıdan olumlu ve önemli bir etkiye sahiptir [93]. Önerilen algoritma ile elde edilen doktor tercihlerini de dikkate alan ve adil çizelgeleme ile daha huzurlu bir çalışma ortamı sunulması sağlanmıştır. Ek olarak, yumuşak kısıtlara verilen ceza puanları değiştirilerek sonuçlar üzerindeki etkisi duyarlılık analizi ile test edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, farklı yumuşak kısıtlar, nöbet çizelgeleme ile ilgili ergonomik kaygılar, doktorların farklı tercihleri dikkate alınarak önerilen algoritma genişletilebilir. Önerilen algoritma, PSO, iteratif yerel arama, benzetim tavlama gibi farklı (meta)sezgisel algoritmalarla da çözdürülüp sonuçlar kıyaslanabilir. Önerilen algoritmada kullanılan dışında farklı çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin kullanımı üzerine bir çalışma yapıp operatörlerin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenebilir. Önerilen algoritma için kullanıcı dostu bir arayüze sahip karar destek sistemi geliştirilebilir.

Kaynaklar (References)

- Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Owens, B., & Sier, D., An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering, *Ann. Oper. Res.*, 127 (1-4), 21-144, 2004.
- Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Sier, D., Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models, *Eur. J. Oper. Res.*, 153 (1), 3-27, 2004.
- Glover, F., & McMillan, C., The general employee scheduling problem: An integration of MS and AI, *Computers and Operations Research*, 13 (5), 563-773, 1986.
- Puente, J., Gomez, A., Fernandez, I., & Priore P., Medical doctor rostering problem in a hospital emergency department by means of genetic algorithms, *Comput. Ind. Eng.*, 56, 1232-1242, 2009.
- OECD, Health at a Glance 2017: OECD Indicators, Ed: Marlène Mohier, Kate Lancaster and Andrew Esson, OECD Publishing, Paris, 2017.
- Chen, Z., De Causmaecker, P., & Dou, Y., A combined mixed integer programming and deep neural network-assisted heuristics algorithm for the nurse rostering problem, *Appl. Soft Comput.*, 919-957, 2023.
- Chawasemerwa, T., Taifa, I. W., & Hartmann, D., Development of a doctor scheduling system: a constraint satisfaction and penalty minimisation scheduling model, *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 7, 396-422, 2018.
- M’Hallah, R., & Alkhabbaz, A., Scheduling of nurses: A case study of a Kuwaiti health care unit, *Oper. Res. Health Care*, 2, 1-19, 2013.
- Wirmitzer, J., Heckmann, I., Meyer, A., & Nickel, S., Patient-based nurse rostering in home care, *Oper. Res. Health Care*, 8, 91-102, 2016.
- Wright, P. D., & Mahar, S., Centralized nurse scheduling to simultaneously improve schedule cost and nurse satisfaction, *Omega*, 41, 1042-1052, 2013.
- Böövardsdottir, E. B., Smet, P., & Berghe, G. V., Behind-the-scenes weight tuning for applied nurse rostering, *Oper. Res. Health Care*, 26, 265-278, 2020.
- Samah, A. A., Yusoff, S. N. M., Zainudin, Z., & Abd Majid, H., A study on rostering on-call doctor using genetic algorithm with enhanced genetic operator, 2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation, Kota Kinabalu-Sabah Malaysia, 126-130, 8-10 February, 2012.
- Majid, H. A., Yusuf, L. M., Samah, A. A., Othman, M. S., & Ren, A. N. W. Application of genetic algorithm for doctor rostering at primary care clinics in Malaysia, 2017 6th ICT International Student Project Conference, Johor-Malaysia, 1-4, 2017, 23-24 May.
- Alharbi, A., & Alqahtani, K., An evolutionary intelligent algorithm approach for the doctor scheduling problem, *International Journal on Advances in Software*, 10, 180-190, 2017.
- Samah, A. A., Zainudin, Z., Majid, H. A., & Yusoff, S. N. M., A framework using an evolutionary algorithm for on-call doctor scheduling, *Journal of Computer Science & Computational Mathematics*, 2 (3), 9-16, 2012.
- Wu, T. H., Yeh, J. Y., & Lee, Y. M., A particle swarm optimization approach with refinement procedure for nurse rostering problem, *Comput. Oper. Res.*, 54, 52-63, 2015.
- Hadwan, M., Ayob, M., Sabar, N. R., & Qu, R., A harmony search algorithm for nurse rostering problems, *Inf. Sci.*, 233, 126-140, 2013.
- Awadallah, M. A., Khader, A. T., Al-Betar, M. A., & Bolaji, A. L., Global best harmony search with a new pitch adjustment designed for nurse rostering, *Computer and Information Sciences*, 25, 142-162, 2013.
- Tassopoulos, I. X., Solos, I. P., & Beligiannis, G. N., A two-phase adaptive variable neighborhood approach for nurse rostering, *Comput. Oper. Res.*, 60, 150-169, 2015.
- Zheng, Z., Liu, X., & Gong, X., A simple randomized variable neighbourhood search for nurse rostering, *Comput. Ind. Eng.*, 110, 165-174, 2017.
- Cürebil, A., Eren T., Competency-based security personnel scheduling during the covid-19 pandemic, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (3), 1483-1498, 2021.
- Akkuş İ., Yıldız E.A., Karaoğlan İ., Altıparmak, F., Mobile healthcare service planning in rural areas: A hybrid record to record travel algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (1), 593-606, 2024.
- Dengiz A.Ö., Atalay K., Altıparmak F., A goal programming approach for multi objective, multi-trips and time window routing problem in home health care service, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (4), 2167-2182, 2021.
- Otay İ., Intuitionistic fuzzy multi-expert & multi-criteria decision making methodology: An application in healthcare industry, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 1047-1062, 2022.
- Saad, G., Harb, H., Abouaissa, A., Idoumghar, L., & Charara, N., A sensing-based patient classification framework for efficient patient-nurse scheduling, *Sustainable Comput. Inf. Syst.*, 38, 100855, 2023.
- Yin, P. Y., Chao, C. C., & Chiang, Y. T., Multiobjective optimization for nurse scheduling, *Advances in Swarm Intelligence: Second International Conference, International Conference on Swarm Intelligence, Chongqing-China*, 66-73, 12-15 June, 2011.
- Maenhout, B., & Vanhoucke, M., An evolutionary approach for the nurse rostering problem, *Comput. Oper. Res.*, 38, 1400-1411, 2011.

28. He, F., & Qu, R., A constraint programming based column generation approach to nurse rostering problems, *Comput. Oper. Res.*, 39, 3331-3343, 2012.
29. Lü, Z., & Hao, J. K., Adaptive neighborhood search for nurse rostering, *Cent. Eur. Oper. Res. Central*, 218, 865-876, 2012.
30. Valouxis, C., Gogos, C., Goulas, G., Alefragis, P., & Housos, E., A systematic two phase approach for the nurse rostering problem, *Eur. J. Oper. Res.*, 219, 425-433, 2012.
31. Martin, S., Quelhadj, D., Smet, P., Berghe, G. V., & Özcan, E., Cooperative search for fair nurse rosters. *Expert Syst. Appl.*, 40, 6674-6683, 2013.
32. Maenhout, B., & Vanhoucke, M., An integrated nurse staffing and scheduling analysis for longer-term nursing staff allocation problems, *Omega*, 41, 485-499, 2013.
33. Maenhout, B., & Vanhoucke, M., Reconstructing nurse schedules: Computational insights in the problem size parameters, *Omega*, 41, 903-918, 2013.
34. Burke, E. K., & Curtois, T., New approaches to nurse rostering benchmark instances, *Eur. J. Oper. Res.*, 237, 71-81, 2014.
35. Wong, T. C., Xu, M., & Chin, K. S., A two-stage heuristic approach for nurse scheduling problem: A case study in an emergency department, *Comput. Oper. Res.*, 51, 99-110, 2014.
36. Baeklund, J., Nurse rostering at a Danish ward, *Ann Oper. Res.*, 222, 107-123, 2014.
37. Awadallah, M. A., Bolaji, A. L., & Al-Betar, M. A., A hybrid artificial bee colony for a nurse rostering problem, *Appl. Soft Comput.*, 35, 726-739, 2015.
38. Rahimian, E., Akartunali, K., & Levine, J., A hybrid integer programming and variable neighbourhood search algorithm to solve nurse rostering problems, *Eur. J. Oper. Res.*, 258, 411-423, 2016.
39. Asta, S., Özcan, E., & Curtois, T., A tensor based hyper-heuristic for nurse rostering, *Knowledge-Based Syst.*, 98, 185-199, 2016.
40. Lin, W. D., & Chia, L., Combined forecasting of patient arrivals and doctor rostering simulation modelling for hospital emergency department, 2017 IEEE International conference on industrial engineering and engineering management, Singapore, 2391-2395, December, 2017.
41. Lavygina, A., Welsh, K., & Crispin, A., Doctor rostering in compliance with the new UK junior doctor contract, The 11th Annual International Conference on Combinatorial Optimization and Applications, Shanghai-China, 394-408, 16-18 December, 2017.
42. Rahimian, E., Akartunali, K., & Levine, J., A hybrid integer and constraint programming approach to solve nurse rostering problems, *Computers and Operations Research*, 82, 83-94, 2017.
43. Liu, Z., Liu, Z., Zhu, Z., Shen, Y., & Dong, J., Simulated annealing for a multi-level nurse rostering problem in hemodialysis service, *Appl. Soft Comput.*, 64, 148-160, 2017.
44. Gomes, R. A. M., Toffolo, T. A. M., & Santos, H. G., Variable neighborhood search accelerated column generation for the nurse rostering problem, *Electron. Notes Discrete Math.*, 58, 31-38, 2017.
45. Landtsheer, R. D., Delannay, G., & Ponsard, C., Dealing with perceived fairness when planning doctor shifts in hospitals, Proceedings of the 7th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems, Madeira-Portugal, 320-326, 24-26 January, 2018.
46. Fügener, A., Pahr, A., & Brunner, J. O., Mid-term nurse rostering considering cross-training effects, *Int. J. Prod. Econ.*, 196, 176-187, 2018.
47. Aktunc, E. A., & Tekin, E., Nurse scheduling with shift preferences in a surgical suite using goal programming, *Global Joint Conference on Industrial Engineering and Its Application (GJCIE 2018) Areas, Nevsehir-Turkey*, 23-36, 21-22 July, 2018.
48. Jaradat, G. M., Al-Badareen, A., Ayob, M., Al-Smadi, M., Al-Marashdeh, I., Ash-Shuqran, M., & Al-Odat, E., Hybrid elitist-ant system for nurse-rostering problem, *J. King Saud Univ. Comput. Inf. Sci.*, 31, 378-384, 2019.
49. Wickert, T. I., Smet, P., & Berghe, G. V., The nurse rostering problem: Strategies for reconstructing disrupted schedules, *Computers and Operations Research*, 104, 319-337, 2019.
50. Hadwan, M., Ayob, M., Al-Hagery, M., & Al-Tamimi, B. N., Climbing harmony search algorithm for nurse rostering problems, *Recent Trends in Data Science and Soft Computing: 3rd International Conference of Reliable Information and Communication Technology, Kuala Lumpur-Malaysia*, 74-83, 23-24 July, 2019.
51. Turhan, A. M., & Bilgen, B., A hybrid fix-and-optimize and simulated annealing approaches for nurse rostering problem, *Comput. Ind. Eng.*, 145, 531-542, 2020.
52. Böðvarsdóttir, E. B., Smet, P., Berghe, G. V., & Stidsen, T. J. R., Achieving compromise solutions in nurse rostering by using automatically estimated acceptance thresholds, *Eur. J. Oper. Res.*, 292, 980-995, 2020.
53. Chen, P. S., & Zeng, Z. Y., Developing two heuristic algorithms with metaheuristic algorithms to improve solutions of optimization problems with soft and hard constraints: An application to nurse rostering problems, *Appl. Soft Comput.*, 93, 336-358, 2020.
54. Strandmark, P., Qu, Y., & Curtois, T., First-order linear programming in a column generation-based heuristic approach to the nurse rostering problem, *Computers and Operations Research*, 120, 945-959, 2020.
55. Kheiri, A., Gretsista, A., Keedwell, E., Lulli, G., Epitropakis, M. G., & Burke, E. K., A hyper-heuristic approach based upon a hidden Markov model for the multi-stage nurse rostering problem, *Computers and Operations Research*, 130, 221-234, 2021.
56. Hassani, M. R., & Behnamian, J., A scenario-based robust optimization with a pessimistic approach for nurse rostering problem, *J. Comb. Optim.*, 41, 143-169, 2021.
57. Guo, J., & Bard, J. F., A column generation-based algorithm for midterm nurse scheduling with specialized constraints, preference considerations, and overtime. *Comput. Oper. Res.*, 138, 597-623, 2022.
58. Turhan, A. M., & Bilgen, B., A mat-heuristic based solution approach for an extended nurse rostering problem with skills and units, *Socio-Economic Planning Sciences*, 82, 300-311, 2022.
59. Otero-Caicedo, R., Casas, C. E. M., Jaimes, C. B., Garzón, C. F. G., Vergel, E. A. Y., & Valdés, J. C. Z. A preventive-reactive approach for nurse scheduling considering absenteeism and nurses' preferences, *Oper. Res. Health Care*, 38, 100389, 2023.
60. Alharbi, A., & AlQuahtani, K., A Genetic algorithm solution for the doctor scheduling problem, The Tenth International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences, Venice-Italy, 91-98, 9-13 October, 2016.
61. Zhang, Z., Hao, Z., & Huang, H., Hybrid swarm-based optimization algorithm of ga & vns for nurse scheduling problem, *Information Computing and Applications: Second International Conference, Qinhuaungdao-China*, 375-382, 2011, 28-31 October.
62. Burke, E. K., Li, J., & Qu, R., A Pareto-based search methodology for multi-objective nurse scheduling, *Ann Oper. Res.*, 196, 91-109, 2012.
63. Fan, N., Mujahid, S., Zhang, J., Georgiev, P., Papajorgji, P., Steponavice, I., Neugard, B., & Pardalos, P. M., Nurse scheduling problem: an integer programming model with a practical application, *Systems Analysis Tools For Better Health Care Delivery*, Pardalos, P., Georgiev, P., Papajorgji, P., Neugaard, B. (Eds), Springer. New York, NY, 74, 65-98, 2013.
64. Rasip, M. N., Basari, A. S. H., Ibrahim, N. K., & Hussin, B., Enhancement of nurse scheduling steps using particle swarm optimization, *Advanced Computer and Communication Engineering Technology: Proceedings of the 1st International Conference on Communication and Computer Engineering, Kanyakumari-India*, 459-469, 2-3 November, 2015.
65. Legrain, A., Omer, J., & Rosat, S., A rotation-based branch-and-price approach for the nurse scheduling problem, *Math. Program. Comput.*, 12, 417-450, 2020.
66. Legrain, A., Omer, J., & Rosat, S., An online stochastic algorithm for a dynamic nurse scheduling problem, *Eur. J. Oper. Res.*, 285, 196-210, 2020.
67. Sarkar, P., Chaki, R., & Cortesi, A., A patient-centric nurse scheduling algorithm. *SN Comput. Sci.*, 3, 1-16, 2022.
68. Chen, Z., Dou, Y., & De Causmaecker, P., Neural network-assisted method for the nurse rostering problem, *Comput. Ind. Eng.*, 171, 430-444, 2022.
69. Michael, C., Jeffery, C., & David, C., Nurse preference rostering using agents and iterated local search, *Annals of Operational Research*, 226, 443-461, 2015.
70. Shukla, M., Li, X., & Sun, Y., Time-interval based coverage constraint for nurse scheduling problems, *2015 Industrial and Systems Engineering Research Conference, Nashville-Tennessee*, 1234-1242, 30 May – 2 June, 2015.
71. Kumar, M., Husian, M., Upreti, N., & Gupta, D., Genetic algorithm: review and application, *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, 2, 451-454, 2010.

72. Min, L., & Cheng, W., A genetic algorithm for minimizing the makespan in the case of scheduling identical paralel machines, *Artificial Intelligence in Engineering*, 13, 399-403, 1999.
73. Huang, M., Ma, Y., Wan, J. & Chen, X., A sensor-software based on a genetic algorithm-based neural fuzzy system for modeling and simulating a wastewater treatment process, *Appl. Soft Comput.*, 27, 1-10, 2015.
74. Kechagias, J.D., Aslani, K. E., Fountas, N. A., Vaxevanidis, N. M., & Manolagos, D. E., A comparative investigation of Taguchi and full factorial design for machinability prediction in turning of a titanium alloy, *Measurement*, 151, 1-11, 2020.
75. Basheer, P. A. M., Montgomery, F. R., & Long, A. E., Factorial experimental design for concrete durability research, *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, 104, 449 – 462, 1994.
76. Antony, J., "Some key things industrial engineers should know about experimental design", *Logist. Inf. Manage.*, 11, 386 – 392, 1995.
77. Eşme, U., Application of Taguchi method for the optimization of resistance spot welding process, *Arabian J. Sci. Eng.*, 34, 519-528, 2009.
78. Hosny, M., & Al Turiki, N., A genetic-based nurse rostering tool: A Riyadh hospital case, *International Conference on Genetic and Evolutionary Methods (GEM)*, Las Vegas-Nevada, 1-7, 22-25 July, 2013.
79. Rae, C. S. W. E., A study of evolutionary perturbative hyper-heuristics for the nurse rostering problem, *Doctoral Thesis, University of Kwazulu-Natal, Master of Science, Kwazulu-Natal*, 2017.
80. Lin, C. C., Kang, J. R., Chiang, D. J., & Chen, C. L., Nurse scheduling with joint normalized shift and day-off preference satisfaction using a genetic algorithm with immigrant scheme. *Int. J. of Distrib. Sens. Netw.*, 11, 1-10, 2015.
81. Andriansyah, Alfadilla, N., Sentia, P. D., & Asmadi, D., Optimization of nurse scheduling problem using genetic algorithm: a case study, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 536, *International Conference on Science and Innovated Engineering, Aceh-Indonesia*, 131-137, 28 May – 2 June, 2019.
82. Abadi, M. Q. H., Rahmati, S., Sharifi, A., & Ahmadi, M., HSSAGA: Designation and scheduling of nurses for taking care of COVID-19 patients using novel method of hybrid salp swarm algorithm and genetic algorithm, *Appl. Soft Comput.*, 108, 449-459, 2021.
83. Rurifandho, A., Renaldi, F., & Santikarama, I., Doctors dynamic scheduling for outpatient, inpatient, and surgery using genetic algorithm, *International Conference on Science and Technology, Batam-Indonesia*, 1-8, 3-4 February, 2022.
84. Kim, T. K., Understanding one-way ANOVA using conceptual figures, *Korean Journal of Anesthesiology*, 70 (1), 22-26, 2017.
85. Cramer, A. O. J., van Ravenzwaaij, D., Matzke, D., Steingroever, H., Wetzels, R., Grasman, R. P., Waldorp, L. J., & Wagenmakers, E. J., Hidden multiplicity in exploratory multiway ANOVA: Prevalence and remedies, *Psychonomic Bulletin & Review*, 23, 640-647, 2016.
86. Perazzi, A., Gomiero, C., Corain, L., Iacopetti, I., Grisan, E., Lombardo, M., Lombardo, G., Salvalaio, G., Contin, R., Patruno, M., Martinello, T., & Peruffo, A., An assay system to evaluate riboflavin/UV-A corneal phototherapy efficacy in a porcine corneal organ culture model, *Animals*, 10 (4), 730-746, 2020.
87. Millman, J., & Glass, J. V., Rules of thumb for writing the ANOVA table, *Journal of Educational Measurement*, 4 (2), 41-51, 1967.
88. Lee, J. Y., A genetic algorithm for a two-machine flowshop with a limited waiting time constraint and sequence-dependent setup times, *Math. Probl. Eng.*, 2020, 1-13, 2020.
89. Gerostathopoulos, I., Prehofer, C., & Bures, T., Adapting a system with noisy outputs with statistical guarantees, *Proceedings of the 13th International Conference on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems, Gothenburg-Sweden*, 58-68, 28-29 May, 2018.
90. Banerjee, S., Poria, S., Sutradhar, G., & Sahoo, P., Wear performance of Mg-WC metal matrix nanocomposites using taguchi methodology, *Mater. Today Proc.*, 19, 177-18, 2019.
91. Trucano, T. G., Swiler, L. P., Igusa, T., Oberkampf, W. L., & Pilch, M., Calibration, validation, and sensitivity analysis: What's what, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 91, 1331-1357, 2006.
92. Chitnis, N., Hyman, J. M., & Cushing, J. M., Determining important parameters in the spread of malaria through the sensitivity analysis of a mathematical model, *Bull. Math. Biol.*, 70, 1272-1296, 2008.
93. Sutanto, E. M., Sampson, J. S., & Mulyono, F., Organizational Justice work environment and motivation, *International Journal of Business and Society*, 19, 313-322, 2018.
94. Yalçın, A. Doktor nöbet çizelgeleme problemi için ağırlıklı hedef programlama tabanlı genetik algoritma, *Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya*, 2023.

