

**UZAK KULE KONTROL MERKEZİ YER SEÇİMİ VE TÜRKİYE
UYGULAMASI**

Hatice DOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kadriye YAMAN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2022

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Hatice DOĞAN'ın UZAK KULE KONTROL MERKEZİ YER SEÇİMİ VE TÜRKİYE UYGULAMASI başlıklı çalışması 05/08/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Kadriye YAMAN

Üye : Prof. Dr. İnci SARIÇİÇEK

Üye : Dr.Öğr. Üyesi Ertan ÇINAR

Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

05/08/2022

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Hatice DOğAN, UZAK KULE KONTROL MERKEZİ YER SEÇİMİ VE TÜRKİYE UYGULAMASI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Kadriye YAMAN

ÖZET

UZAK KULE KONTROL MERKEZİ YER SEÇİMİ VE TÜRKİYE UYGULAMASI

Hatice DOĞAN

Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kadriye YAMAN

Dünya üzerinde artan nüfusa bağlı olarak hava taşımacılığına olan talep artmakta ve hava trafiği de her geçen gün yoğunlaşmaktadır. Uçuş sayısı bakımından Eurocontrol (The European Organisation for the Safety of Air Navigation) verilerine göre 2017-2018 yılları arasında % 3.8’lik artış ile bugüne kadarki en yüksek değer olan 11.011.434 uçuşa ulaşılmıştır. Türkiye de dünya genelinde hava taşımacılığının hızlı büyüme gösterdiği ülkeler arasındadır. 58 sivil, 18 askeri havaalanı ile hava sahası sınırları içerisinde 2009 ile 2019 yılları arasında ticari uçuş sayısında %93’lük bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

Hava trafiğindeki yoğunluğa bağlı olarak hava trafik kontrol kulelerinin hizmet seviyesi her geçen gün artış göstermekte ve bu hizmetler de yeni bakım maliyetleri oluşturmaktadır. Bu maliyetlerin karşılanması yolcu ve uçuş sayısı fazla olan havaalanları açısından sorun oluşturmazken, uçuş ve yolcu sayısı az olan havaalanları açısından problem oluşturabilmektedir. Uçuş sayısı az olan havaalanlarının kapatılmasını engellemek ve kârlılık oranlarını artırmak amacıyla uzak kule merkezi kavramı ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada uçuş sayısı düşük olan havaalanlarının uzaktan kontrolünü sağlayacak kule merkezlerinin en iyi yer seçimini belirlemek amacıyla, Ana Dağıtım Üssü Yer Seçim Problemleri temel alınarak matematiksel bir model geliştirilmesi amaçlanmış ve model GAMS yazılımı ile kodlanarak CPLEX çözücüsü ile çözdürülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Ana Dağıtım Üssü Yer Seçim Problemi, Küme Kapsama Problemleri, Uzak Kule Merkezi

ABSTRACT

REMOTE TOWER CENTER LOCATION AND TURKEY IMPLEMENTATION

Hatice DOĞAN

Department of Aviation Electric and Electronic

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2022

Supervisor: Kadriye YAMAN

Due to the increasing population in the world, the demand for air transportation is increasing and air traffic is increasing day by day. When we look at the flight number data announced by Eurocontrol for Europe, between 2017 and 2018, 11,011,434 flights were reached, which is the highest value to date, with an increase of 3%. Turkey, is among the countries where air transportation is growing rapidly around the world. It has been observed that there has been a 93% increase in the number of commercial flights between 2009 and 2019 within the borders of the airspace with 59 civil and 18 military airports.

Depending on the intensity of air traffic, the service level of air traffic control towers is increasing day by day and these services create new maintenance costs. While meeting these costs does not pose a problem for airports with a high number of passengers and flights, it can create a problem for airports with a low number of flights and passengers. In recent years, considering the cost factor, the concept of remote tower center has emerged in order to prevent the closure of airports with low number of flights and to increase profitability rates. Remote tower center is defined as the application that provides the control and routing activities of at least two airports with a remote center.

In this study, it is aimed to develop a mathematical model in order to determine the best location selection of tower centers that will provide remote control of airports with low number of flights. In the proposed mathematical model, various parameters and constraints have been developed based on the Hub Location Problems. The developed model was coded with GAMS software and it was completed with CPLEX solver of GAMS software.

Keywords: Air Traffic Control Tower, Hub, Hub Covering Problems, Remote Tower Center.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamı oluşturmamda engin tecrübeleri ile bana yol gösteren ve bir eğitmenden ileri bir ilgi ile destek olan tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Kadriye YAMAN'a, bu süreçte çok kıymetli yardım ve önerilerini esirgemeyen hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Kübra Gülnaz BÜLBÜL, Dr. Öğr. Üyesi Ertan ÇINAR'a, tez çalışmam süresince tecrübeleriyle bana destek olan ve yol gösteren Dr. Öğr. Üyesi Ümit KESKİN hocama teşekkürlerimi sunmayı borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca görüş ve önerileriyle her zaman destek olan değerli arkadaşım Sayın Erkan KARPUZ'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca her anlamda desteklerini esirgemeyen değerli aileme, çok kıymetli arkadaşlarıma sonsuz teşekkürler.

Hatice DOĞAN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Hatice DOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BALIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. UZAKTAN KULE KONTROL MERKEZİ PROBLEMİ.....	6
2.1. Uzaktan Kule	7
2.1.1. Uzaktan kule kavramı tarihçesi	12
2.2. Literatür Araştırması	15
3. ANA DAĞITIM ÜSSÜ YER SEÇİM PROBLEMLERİ.....	16
3.1. Tesis Yeri Seçme Problemleri	16
3.2. Ana Dağıtım Üssü Yerinin Belirlenmesi	17
3.2.1. P-ADÜ medyan problemi	19
3.2.2. Sabit maliyetli ADÜ yer seçim problemi	22
3.2.3. P-ADÜ merkez problemi	23
3.2.4 ADÜ kapsama problemi	24

4. UZAKTAN KULE MERKEZİ YERİ BELİRLEME MATEMATİKSEL MODELİ.....	26
4.1. Araştırma Problemi	26
4.2. Araştırmanın Amacı	27
4.3. Araştırmanın Önemi.....	27
4.4. Araştırma Yöntemi	28
4.5. Uzak Kule Merkezi İçin Geliştirilen Matematiksel Model	29
4.6. Geliştirilen Modelde Kullanılan Parametreler.....	32
4.6.1. Havaalanları ile uzak kule merkezi aday yerleri arası mesafe	32
4.6.2. Uzak kule merkezi aday yerleri rakım değeri	32
4.6.3. Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın şehir merkezi arası mesafe	33
4.6.4. Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın yerleşke arası mesafe	33
5. MODELİN TÜRK HAVASINDA UYGULANMASI	35
5.1. Düşük Yoğunluklu Havaalanlarının Belirlenmesi	36
5.2. Parametre Hesaplamaları	40
5.2.1. Havaalanları ile uzak kule merkezi aday yerleri arası mesafe	40
5.2.2. Uzak kule merkezi aday yerleri rakım değeri	42
5.2.3. Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın şehir merkezi arası mesafe	43
5.2.4. Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın yerleşke arası mesafe	43
5.3. Matematiksel Modelin Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler.....	45
5.3.1. İkili havaalanı gruplandırması için analiz sonuçları	45
5.3.2. Üçlü havaalanı gruplandırması için analiz sonuçları	46
5.3.3. İkili ve üçlü havaalanı gruplandırmasının karşılaştırılması	47
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKÇA.....	55
EKLER	58
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. <i>Standart kule ve uzaktan kule karşılaştırması</i>	12
Tablo 5.1. <i>2003-2021 Yılları arası uçak trafiği değişimi</i>	35
Tablo 5.2. <i>2003-2021 Yılları arası yolcu trafiği değişimi</i>	36
Tablo 5.3. <i>Türkiye 2018 Aralık ayı sonu toplam uçuş sayıları</i>	37
Tablo 5.4. <i>2018 Aralık ayı kontrol edilecek havaalanları ortalama uçuş sayıları</i>	38
Tablo 5.5. <i>Aday merkez yerlerinin havalimanlarına uzaklık değerleri</i>	41
Tablo 5.6. <i>Aday merkez yerlerinin rakım değerleri</i>	42
Tablo 5.7. <i>Aday merkez yerlerinin en yakın şehir merkezlerine ve en yakın yerleşkeye olan uzaklıkları</i>	44
Tablo 5.8. <i>İkişerli havaalanı gruplandırmasında seçilen uzak kule merkez yerlerinin parametreleri</i>	48
Tablo 5.9. <i>Üçerli havaalanı gruplandırmasında seçilen uzak kule merkez yerlerinin parametreleri</i>	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Standart Hava Trafik Kontrol Kulesi [10]	6
Şekil 2.2. Uzaktan Kule merkezi ve kontrolü sağlanan havaalanları [13]	7
Şekil 2.3. Yerel havaalanı ve uzak kule merkezi komponentleri [13]	9
Şekil 2.4. Bir havaalanının uzaktan bir kule ile kontrol edilmesi [13]	9
Şekil 2.5. Üç havaalanının sırasıyla bir uzaktan kule merkeziyle kontrol edilmesi [13]	10
Şekil 2.6. Üç havaalanının bir uzaktan kule merkezi ile eş zamanlı kontrol edilmesi [13]	10
Şekil 2.7. Uzaktan Kontrolü Sağlanan Örnköldsvick Hava Trafik Kontrol Kulesi [17]	13
Şekil 2.8. Budapest, Papa ve Debrecen havalimanlarının eş zamanlı uzaktan kontrolünü sağlayan uzak kontrol kule merkezi [17]	14
Şekil 2.9. Uzak kule merkezinin tarihçesi.....	14
Şekil 3.1. ADÜ Genel Sınıflandırma Kriterleri	18
Şekil 3.2. Tek atamalı örnek ağ yapısı [23]	21
Şekil 3.3. Çok atamalı örnek ağ yapısı [23].....	21
Şekil 5.1. Uzaktan kontrol edilecek havaalanlarının ikişerli gruplandırılmış hali.....	39
Şekil 5.2. Uzaktan kontrol edilecek havaalanlarının üçerli gruplandırılmış hali.....	40
Şekil 5.3. İkili kümelendirme senaryosunda kontrol edilecek havaalanları ve kontrol edecek merkezler	46
Şekil 5.4. GAMS sonuçlarına göre kontrol edilecek havalimanları ve kontrol edecek merkez	47
Şekil 5.5. Seçilen 1. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü	49
Şekil 5.6. Seçilen 6. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü	49
Şekil 5.7. Seçilen 11. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü	50

Şekil 5.8. Seçilen 15. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü	50
Şekil 5.9. Seçilen 17. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü	51
Şekil 5.10. Seçilen 22. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü	51
Şekil 5.11. Seçilen 30. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü	52



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ADÜ	: Ana Dağıtım Üssü
ANSP	: Hava Seyrüsefer Hizmet Sağlayıcı (Air Navigation Service Provider)
ATCO	: Hava Trafik Kontrolörü (Air Traffic Control Officer)
ATM	: Hava Trafik Yönetimi (Air Traffic Management)
CWP	: Kontrolör Çalışma Pozisyonu (Controller Working Position)
DFS	: Alman Hava Trafik Kontrol Hizmeti (German Air Traffic Control Service)
DHMI	: Devlet Hava Meydanları İşletmesi
DLR	: Alman Hava-Uzay Merkezi Deutsches (Zentrum für Luft –und Raumfahrt-German Aerospace Center)
EUROCONTROL	: The European Organisation for the Safety of Air Navigation
FAA	: Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration)
GAMS	: Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (General Algebraic Modeling System)
GRASP	: Rastgele Uyarlanabilir Arama Prosedürü (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures)
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (International Civil Aviation Organization)
LAN	: Yerel Alan Ağı (Local Area Network)
LFV	: İsveç Sivil Havacılık Otoritesi (Luftfartsverket)
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
OTW	: Pencere Dışı Görünüm (Out -of- the Window View)
RTC	: Uzak Kule Merkezi (Remote Tower Center)
RTM	: Uzak Kule Modülü (Remote Tower Module)
SAAB	: İsveç Uçak A.Ş (Svenska Aeroplan Aktie Bolaget)
SARPs	: Standart ve Tavsiye Edilen Uygulamalar (SARPs- Standards And Recommended Practices)
SESAR	: Tek Avrupa Gökyüzü ATM Araştırması (Single European Sky

ATM Research)

VHF : Çok Yüksek Frekans (Very High Frequency)

WAN : Geniş Alan Ağı (Wide Area Network)



1. GİRİŞ

Küreselleşen dünyada artan seyahat sayısının yanı sıra hava aracı ile seyahatin daha fazla tercih edildiği bir noktaya gelinmiştir. Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO-International Civil Aviation Organization)’nın 2021 yılı verilerine göre uluslararası yolcu trafiğinin 2.3 milyar olarak gerçekleştiği görülmektedir. Covid-19 nedeniyle hava taşımacılığı faaliyetleri her ne kadar olumsuz etkilenmiş olsa da hızlı bir toparlanma sürecine girilmiştir. Avrupa Hava Seyrüsefer Emniyeti Teşkilatı (Eurocontrol- The European Organisation for the Safety of Air Navigation)’nın yayınladığı rapora göre, 2022 yılında Avrupa’da havacılık sektöründeki sefer sayısının 2019 yılındaki sefer sayısına göre % 70-90 artacağı öngörülmüştür. Havacılık sektörünün toparlanma süreci ile ilgili öngörüler 2024 yılını işaret ederken kötümser senaryolarda 2027’yi bulabileceği yönündedir. Hava ile seyahatin yaygın hale gelmesi ve yolcu sayısındaki artış hava trafiğinin de önemli derecede yoğunlaştığını göstermektedir. Uçakların iniş ve kalkış aşamasındaki hava trafiğinin kontrolü hava trafik kulelerinde bulunan kule kontrolörleri ve ekipmanları ile sağlanmaktadır.

Türkiye, hava taşımacılığı faaliyetlerinin çok hızlı büyüme gösterdiği ülkeler arasında yer almaktadır. Türkiye sınırları içerisinde faaliyette olan 58 sivil ve 18 askeri havaalanı bulunmaktadır. Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMİ) istatistiki verilerine göre 2009-2019 yılları arasında ticari uçuş sayısında yaşanan artış % 93 olarak açıklanmıştır. Dünya genelinde pandemi sonrasında 2019 yılına oranla toparlanma süreçleri % 60-70 seviyelerinde iken Türkiye’de bu artış oranı % 80-90 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Eurocontrol’ün verilerine göre 2021 yılında toplam trafik istatistiklerinde Avrupa’da 5’inci sırada yer aldığı açıklanmıştır [1, 2].

Ülkelerin ve bulundukları bölgelerin gerek ekonomik gerekse sosyal gelişiminde önemli rol oynayan havaalanları/havalimanları her geçen gün hızla gelişen hava taşımacılığı sektörünün önemli unsurlarından biridir. Havaalanı, “*bütünü ya da bir bölümü içinde hava araçlarının iniş, kalkış ve yer hareketlerini gerçekleştirebilmeleri için karada veya suda oluşturulmuş (bina, tesis ve teçhizatla donatılmış) ve tanımlanmış saha*” olarak ifade edilmektedir. Havalimanı ise “*Uluslararası hava trafiği, geliş ve gidişlerine hizmet vermek amacıyla tesis edilmiş olup, gümrük, göçmenlik, halk sağlığı, hayvan ve bitki karantina işlemleri ve benzeri işlemlerin bünyesinde vakit kaybedilmeksizin yürütüldüğü havaalanı*” olarak ifade edilir [3]. Dünya genelinde farklı

kuruluşların yapmış olduğu birçok havaalanı sınıflandırması bulunmaktadır. En yaygın havaalanı sınıflandırmaları ICAO ve Ulusal Havacılık Teşkilatı (FAA-Federal Aviation Administration) tarafından yapılan sınıflandırmalardır. ICAO, havaalanlarını sınıflandırırken iki karakterden oluşan bir referans kodlama sistemi kullanmıştır. Bu kod içerisinde uçak performans özellikleri ve ebatları bulunmaktadır. Birinci rakam kodu havaalanında pist uzunluğunu göstererek 1-4 arasında bir değer ile ifade edilir. İkinci harf kodu ise uçağın kanat açıklığı ve ana iniş takımı dış tekerlek açıklığını göstererek A ile F arasında bir harf ile belirtilir. Buna göre;

- Kod numarası 1, 2 ve kod harfi A, B olarak belirlenen uçak referans baz uzunluğu 1200 m'den küçük olan hava alanlarının kanat açıklığı 15-24 m aralığında,
- Kod numarası 3 olan, kod harfi C olarak tarif edilen, uçak referans baz uzunluğu 1200 ile 1800 m arasında olan hava alanlarının kanat açıklığı 24-36 m aralığında,
- Kod numarası 4 olan ve kod harfi D, E, F olarak tarif edilen, uçak referans baz uzunluğu 1800 m'den büyük olan hava alanlarının kanat açıklığı ise 36-80 m aralığında değişmektedir [4].

FAA havaalanı sınıflandırmasında ise havaalanlarının yolcu trafiği temel alınmaktadır. Yıllık 1.000.000'dan fazla yolcuya hizmet veren havaalanları temel havaalanları; yılda 50.000 ile 1.000.000 arasında yolcu kapasitesine sahip havaalanları ticari hizmet veren havaalanları; yılda 2.500'den az yolcu kapasitesine sahip havaalanları genel havacılık havaalanları; temel havaalanlarında yaşanan tıkanıklıkları hafifletmek için kullanılan havaalanları ise trafiği rahatlatıcı havaalanları olarak sınıflandırılmıştır.[4]

ICAO tarafından havaalanlarına ilişkin başka bir sınıflandırmada ise havaalanı trafik yoğunluğu dikkate alınmıştır. Trafikğin en yoğun olduğu ortalama saatteki hareket sayısı, günlük en yoğun saatteki hareketlerin sayısının yıllık aritmetik ortalamasıdır. Burada bir kalkış veya iniş bir hareketi oluşturmaktadır. Yapılan bu hesaplama sonucunda trafik yoğunluğuna göre havaalanları hafif, orta ve şiddetli trafik yoğunluğu olan havaalanları şeklinde üç gruba ayrılmaktadır. Buna göre trafiğin en yoğun olduğu ortalama saatte hareket sayısının pist başına 15'den fazla olmadığı veya toplamda 20 hareketten az trafiği olan hava alanları hafif yoğunluklu havaalanlarıdır. Trafikğin en

yoğun olduğu ortalama saatte hareket sayısının pist başına 16 ile 25 arasında olduğu veya toplam 20 ile 35 hareketi olan havaalanları orta yoğunluklu havaalanlarıdır. Trafiğin en yoğun olduğu ortalama saatte hareket sayısının pist başına 26 veya daha fazla olduğu veya toplam 35 hareketten fazla olan hava alanları ise şiddetli trafik yoğunluğu olan havaalanları olarak sınıflandırılmaktadır [5].

Hava trafiğinde yoğunluğun artması özellikle iniş, kalkış ve yerdeki trafiğin düzenlenmesi ve yönlendirilmesi açısından hava trafik kontrol kulelerinin hizmet seviyelerinin de artışında büyük rol oynamaktadır. Verilen hizmetlere bağlı olarak bakım, donanım vb. gibi birtakım yeni maliyetler oluşmaktadır. Hava trafik yönetiminin emniyetli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için gerek hava trafik kontrol kulelerine yapılan yatırımlar gerekse diğer hizmetler bir takım sabit maliyetler oluşturmakla birlikte havaalanlarında bu maliyetlerin karşılanabilmesi daha çok uçuş ve yolcu sayısına bağlıdır.

Yolcu ve uçuş sayısı fazla olan havaalanları (ortalama günlük uçuş sayısı ≥ 20) bu maliyetleri kolaylıkla karşılayabilmektedir. Ancak uçuş ve yolcu sayısı az olan havaalanlarında (ortalama günlük uçuş sayısı ≤ 20) tam donanımlı bir hava trafik kontrol kulesinde donanım ve bakım maliyetlerinin karşılanabilmesi oldukça zordur. Havaalanı yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Dolayısıyla uçuş sayısı az olan havaalanlarının hem kapatılmasını engellemek hem de daha verimli kullanılmalarını sağlayarak kârlılık oranlarını artırmak amacıyla son yıllarda uzaktan kule merkezi kavramı ortaya çıkmıştır. Uzaktan kule merkezi (remote tower), “*en az iki havaalanının kontrolünü ve hava trafiğinin yönlendirmesini uzaktan sağlayan merkezler*” olarak tanımlanmaktadır. İlk uzaktan kule prototipi, gerekli teknik ve operasyonel çalışmaları test etmek amacıyla Alman Hava Uzay Merkezi Uçuş Rehberliği Enstitüsü (DLR-Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt-German Aerospace Center) tarafından 2005 yılında kurulmuştur. 2015 yılında da İsveç’teki ilk uzak kule kurulumu faaliyete geçerek, Örnköldsvick havaalanının kontrolünü sağlamıştır. İsveç’teki uzak kule uygulamasının ardından Almanya’nın birçok havaalanı için proje çalışmaları başlatılmıştır [6].

Bu çalışmada uçuş sayısı düşük olan havaalanları için hava trafik kontrol maliyetlerini azaltmak üzere uzaktan kontrol kule merkezlerinin yer seçiminde kullanılabilecek matematiksel bir model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda ICAO’nun trafik yoğunluğuna göre havaalanı sınıflandırması referans alınarak ortalama

günlük uçuş sayısı 20 ve altında olan havaalanları düşük yoğunluklu olarak kabul edilmiştir. Matematiksel problemin oluşturulmasında yöneylem araştırmaları içerisinde önemli bir yere sahip olan Ana Dağıtım Üssü Yer Seçim Probleminden yararlanılmıştır. Ana Dağıtım Üssü (ADÜ) çoktan çoğa dağıtım sistemlerinde toplama, sınıflandırma ve aktarma noktası olarak hizmet veren özel tesislerdir. ADÜ yer seçim problemlerinde akışlar direkt kaynak-varış noktaları arasında değil maliyetin ön plana çıkarılması açısından ana dağıtım üsleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Bir topla-dağıt ağ yapısında merkezî bir konum niteliği taşıyan bölge, toplama ve dağıtma noktası olarak hizmet verir. Bu sayede daha az bağlantı hattı ile düşük maliyette nispeten daha fazla noktaya erişim sağlamış olur. ADÜ problemleri genellikle yolcu taşımacılığı, kargo, acil hizmet ve telekomünikasyon alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. p-ADÜ medyan problemi, p-ADÜ merkez problemi, sabit maliyetli ADÜ yer seçim problemi ve küme kapsama problemi olmak üzere dört tip ADÜ problemi bulunmaktadır. Bunlardan küme kapsama problemleri ise tüm talep noktalarını belirli bir hizmet seviyesinde kapsayacak en az sayıda hizmet verecek tesisin belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu sayede kontrol edilecek istasyon sayısını maksimum kılacak minimum sayıda en uygun merkez seçimi gerçekleşmiş olacaktır [7]. Geliştirilen modelin uygulaması, Türkiye havaalanları için yapılmıştır. Çalışmada pandemi sürecinde hava taşımacılığında yaşanan olumsuz etkilenme göz önünde bulundurularak DHMİ'nin 2018 yılı havaalanları istatistiki verilerine göre günlük uçuş sayısı düşük olan havalimanları ele alınmıştır. Oluşturulan matematiksel model GAMS yazılımı ile kodlanarak CPLEX çözücüsü ile çözdürülmüştür.

Çalışmanın ikinci bölümde standart bir hava trafik kontrol kulesi ile uzaktan kontrol kulesi kavramı hakkında genel bilgiler verilmiştir. Uzaktan kontrol kulesi kavramının nasıl ortaya çıktığı, hangi projeler ile desteklendiği, nerelerde uygulandığı konusunda literatür taraması ortaya konulmuş ve uzaktan kule merkezinin sağladığı avantajlara değinilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ADÜ problemleri hakkında genel bilgiler verilerek geçmişten günümüze ADÜ'lerle ilgili yapılan çalışmalar ve iyileştirmelerden bahsedilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde birden fazla havaalanının kontrolünü sağlamak üzere yerleştirilecek olan uzaktan kule merkezlerinin yerlerinin belirlenmesi için ADÜ küme kapsama problemlerinden yararlanılarak geliştirilen matematiksel model

sunulmuştur. Modelin çözümünden elde edilen sonuçlar çalışmanın beşinci bölümünde verilmiştir.

Çalışmanın son bölümünde ise yapılan analizler çerçevesinde elde edilen sonuçlara değinilerek gelecekteki araştırmalar için öneriler sunulmuştur.



2. UZAKTAN KULE KONTROL MERKEZİ PROBLEMİ

Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO- International Civil Aviation Organization) tanımlamasına göre, Hava Trafik Kontrol (ATC-Air Traffic Control) hizmetinin ana görevi uçuşun herhangi bir safhasında, manevra alanında uçakların birbirleri ile veya diğer engeller ile çarpışmalarını önlemek ve hava trafiğinin emniyetli, düzenli akışını sağlamaktır [8]. Hava trafiğinin emniyetli ve düzenli akış kontrolünün yanı sıra yer kontrolünden ve yönetiminden, havaalanı gidiş-geliş trafiği ve uçuş verilerinin kaydından hava trafik kontrolörleri sorumludur. Hava trafik kontrol kuleleri ise iniş ve kalkış aşamasında kullanılmak üzere hava trafik hizmetinin bir parçasıdır. Standart bir hava trafik kontrol kulesinin hem uçakların emniyetli bir şekilde kontrol edilmesini hem de kontrolörlerin havaalanı ve çevresini görsel olarak incelemesine izin verecek şekilde tasarlanmış olması gerekmektedir. Bir hava trafik kontrol kulesinde, kontrolörlerin pilotlar ile iletişim kurabilmesini sağlayabilecek gerekli ekipmanlar yer almaktadır.

Hava trafik kontrolörleri, hava trafik hizmetini sağlamak için birçok araç ve sistem kullanır. Standart bir kule için en önemli ve ayırt edici araç pencere dışı görünümüdür (OTW-Out-of-Window). Pencere dışı görünüm ile ancak insan gözünün limitinde bir görüş sağlanmaktadır. Standart hava trafik kontrol kulelerinin yanı sıra görünüm için dürbün, hava olayları takibi için meteorolojik sensörler, seyrüsefer yardımcıları gibi tüm ekipmanlar da havaalanı sınırları içerisinde bulunmaktadır. Bir havaalanının trafik kontrolünün sağlanması için içerdiği ekipmanlarla birlikte örnek tasarımda standart bir kulenin genel görünümü Şekil 2.1’de gösterilmiştir [9].



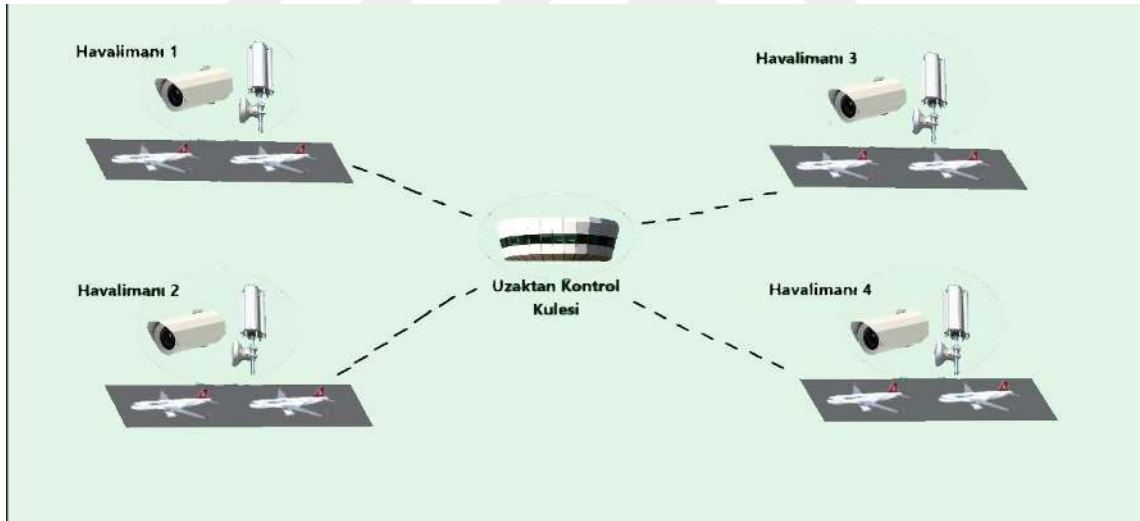
Şekil 2.1. Standart Hava Trafik Kontrol Kulesi [10]

2.1. Uzaktan Kule

Uçuş sayısı az olan küçük havaalanlarının kapanmasının önüne geçilmesi ve havaalanından elde edilen kârın artması amacıyla en az iki havaalanının kontrolünü ve trafiğinin yönlendirmesini uzaktan sağlayan merkezlere “uzak kule merkezi” denir [11].

Uzaktan kule merkezi (RTC-Remote Tower Center); Kontrolör Çalışma Pozisyonlarını (CWP-Controller Working Position) ve Uzak Kule Modüllerini (RTM-Remote Tower Modüle) içermektedir. RTM içerisinde görsel ekranların bulunduğu bir odadır. Bir RTM içerisinde bir veya daha fazla CWP olabilir. Bir uzak kule modülü dışında ancak kule merkezi içerisinde CWP’ler görmek de mümkündür [12].

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi bir uzak kule merkezinde standart kulelerde kullanılan pencere dışı görünümün yerini geniş bir kapsama alanı için yüksek çözünürlüklü/kızılötesi kameralar almaktadır. Bu tip bir uygulamada birden fazla havaalanının trafiğinin kontrolü ve yönlendirilmesi ortada bulunan bir kule merkezi tarafından yapılmaktadır [13].



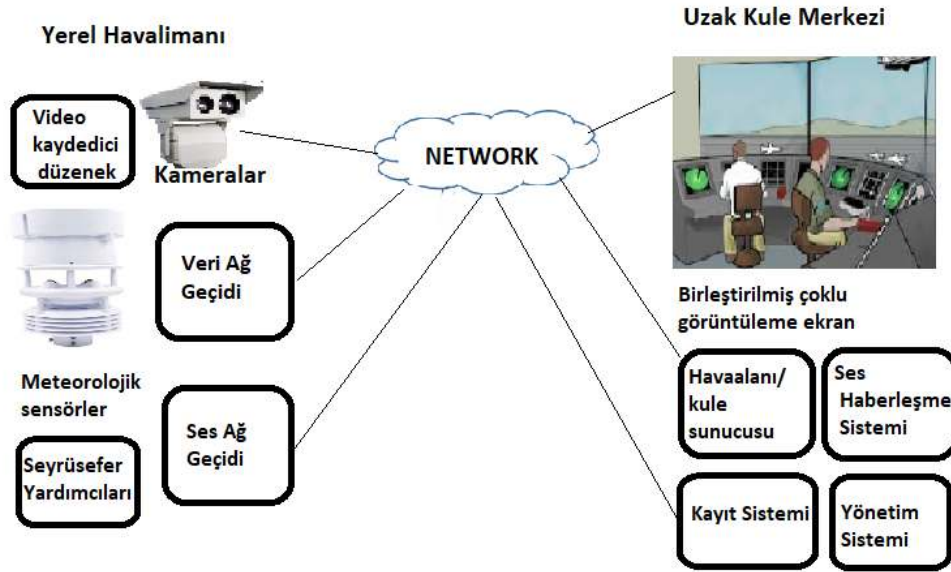
Şekil 2.2. Uzaktan Kule merkezi ve kontrolü sağlanan havaalanları [13]

Uzaktan kule merkezi ile bir havaalanı kontrol edilebileceği gibi birden fazla uçuş sayısı az olan küçük havaalanının kontrol edilmesi de mümkündür. Bu sayede verimlilik daha fazla artırılabilir. Bunun yanı sıra kontrol hizmet ve bakım maliyetleri de azaltılabilir. Trafik durumunun oldukça karmaşık olması durumunda, tek bir havaalanı bir, iki veya daha fazla kontrolör tarafından idare edilebilirken, trafiğin daha az yoğun olması durumunda tek bir kontrolör bir, iki veya daha fazla havaalanından sorumlu olabilir. Teknik olarak bir RTM’in sonsuz sayıda havaalanı için eşzamanlı

görsellik sağlayabileceği ifade edilmekle birlikte; SAAB (Svenska Aeroplan Aktie Bolaget – İsveç Uçak A.Ş)’ın yapmış olduğu çalışmalar ve testler sonucunda en fazla üç havaalanının uzaktan kontrolünü sağlayabildiği tespit edilmiştir [14].

Uzaktan kule merkezi tasarımlarında havaalanlarına kurulan kameralar ve ekipmanlar vasıtasıyla elde edilen tüm bilgiler geniş alan ağı (WAN-Wide Area Network) kullanılarak kule merkezine iletilmektedir. Geniş alan ağı, tek bir konuma bağlı olmayan bugüne kadar mevcut en büyük ve en kapsamlı ağ çeşidi olarak bilinmektedir. Geniş alan ağ sistemi herhangi bir fiziksel konuma ihtiyaç duymayarak küresel olarak hizmet verebilmektedir. Üretkenliği artırmak, küresel iş birliğini desteklemek ve maliyetleri en aza indirmek için geniş alanlar için en çok tercih edilen ağ sistemidir. Geniş alan ağının bant genişliği yerel alan ağına (LAN-Local Area Network) göre daha kısıtlıdır. Bu nedenle herhangi bir tıkanıklık ve veri kaybı olmaması için haberleşme sağlanacak bölgeler ve veriler kısıtlanmaktadır. WAN sisteminin diğer dezavantajlarından birisi de haberleşmenin sağlanacağı konumlar arası mesafe arttıkça veri gecikmesi problemi olmasıdır. Bu faktörlere bağlı olarak ağ üzerinden taşınacak verilerin karışmaması ve zamanında ulaşabilmesi için uzak kule merkezi tarafından kontrol edilebilecek havaalanı sayısı kısıtlı olmaktadır. Ayrıca uzak kule merkezinin konumu, kontrolü sağlanacak tüm havaalanlarına mümkün oldukça yakın mesafede olmalıdır. Veri kavramına dikkat çekmek gerekirse her bir havaalanında gerçekleşen günlük, aylık veya yıllık uçuş sayısı ana karakter olmaktadır. Uçuş sayısı fazla olan havaalanının veri yoğunluğu daha fazla olacağından kule merkezinin uzaktan kontrolünü sağlayacak havaalanlarından uçuş sayısı fazla olan havaalanına daha yakın olması gerektiği söylenebilir [15].

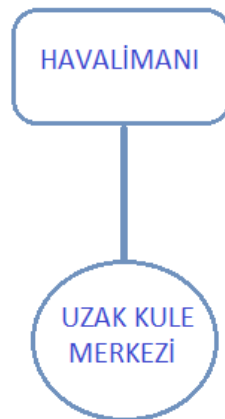
Uzak bir sanal kule kurulumunda OTW’nin yerini kameralar almıştır ve bu sayede havaalanının görünümü elektronik olarak sunulmaktadır. Bu da uzaktan sanal bir kule için yerel havaalanındaki ekipmanları, uzak kule merkezinde çalışma pozisyonlarını, arada iletim ağını gerekli kılmıştır. Bu ekipmanların yanı sıra hava olaylarını bildiren meteorolojik sensörler, seyrüsefer yardımcıları, VHF radyo sistemleri de yerel havaalanında bulunması gereken ekipmanlar arasında yer almaktadır [13]. Uzaktan kontrolün sağlanabilmesi için yerel havaalanında ve uzaktan kule merkezinde bulunması gereken ekipmanlar Şekil 2.3’te genel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Yerel havaalanı ve uzak kule merkezi komponentleri [13]

Tek Avrupa Gökyüzü ATM Araştırması-SESAR (Single European Sky ATM Research) kapsamında uzaktan kontrol merkezi için üç farklı operasyon tipini tanımlamıştır: Bunlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

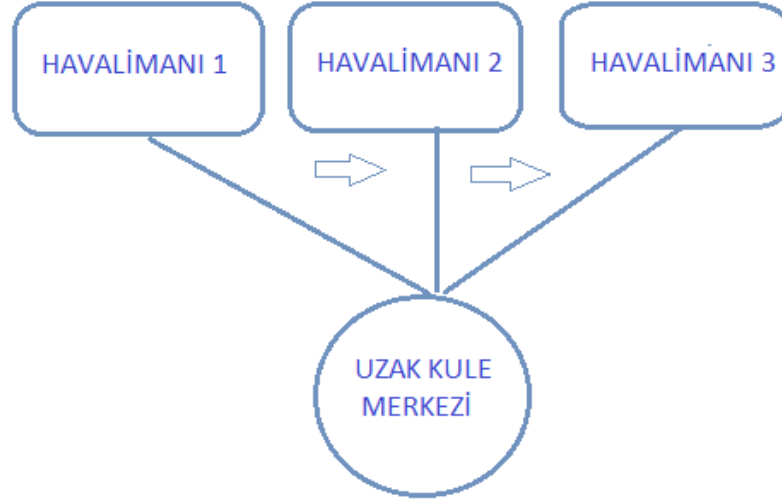
- *Single Remote Tower*: Uzaktan sadece bir havaalanı/havalimanının kontrol edilmesini sağlar ve içerisinde uygun sayıda CWP bulundurur. Şekil 2.4.'de bir uzaktan kule merkezinin uzaktan sadece bir havaalanının kontrolünü sağladığı görülmektedir.



Şekil 2.4. Bir havaalanının uzaktan bir kule ile kontrol edilmesi [13]

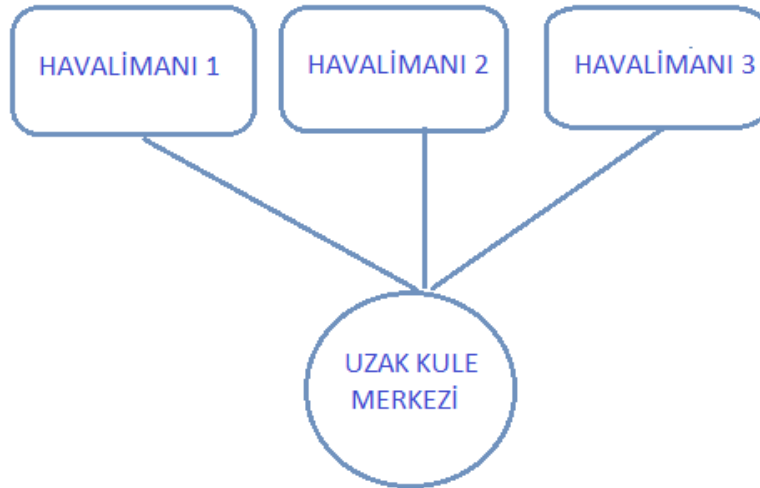
- *Multiple (Çoklu /sıralı konfigürasyon)*: Bu konfigürasyon tek bir merkezden birden fazla havaalanı/havalimanı kontrolünü gerçekleştirir. İki ya da daha fazla havaalanının

RTM'leri ve CWP'leri bağlantılı olmakla birlikte aynı anda sadece bir havaalanının kontrolü mümkündür. Şekil 2.5'te bir uzaktan kule merkezinin sırasıyla üç havaalanını kontrol edebildiği görülmektedir.



Şekil 2.5. Üç havaalanının sırasıyla bir uzaktan kule merkeziyle kontrol edilmesi [13]

- *Simultaneous (Eş zamanlı konfigürasyon)*: Bu konfigürasyonda bir RTM ve bir CWP ile birden fazla havaalanının/havalimanının kontrolü gerçekleştirilir. Dolayısıyla aynı anda iki ya da daha fazla havaalanını kontrol edilebilir. Şekil 2.6'da bir uzaktan kule merkezinin üç havaalanını eş zamanlı kontrol edebildiği görülmektedir [14].



Şekil 2.6. Üç havaalanının bir uzaktan kule merkezi ile eş zamanlı kontrol edilmesi [13]

Uzaktan kule merkezleri ile standart kuleler karşılaştırıldığında uzaktan kule merkezlerinin en önemli avantajlarının maliyet verimliliği olduğu söylenebilir. Bununla

birlikte şehir merkezinden uzakta oldukları için daha güvenli olmaları, pencere dışı görünümün yerine üst düzey teknolojik kameraların kullanılmasının görüş koşullarını daha iyi hale getirmesi gibi avantajları da bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar ve uygulamalar sonucunda uzak kule merkezleri ile maliyet, emniyetli uçuş ve güvenlik açısından elde edilebilecek faydalar maddeler halinde kısaca açıklanmıştır:

- *Maliyet:* Havalimanlarının başlıca gelir kaynakları yolcu ve uçuş sayılarına bağlı olarak değişmektedir. Bu gelir kaynakları genel olarak hava trafiği ile ilişkilidir. Uçuş ve yolcu olmaması gelir olmaması anlamına gelirken, uçuş ve yolcu sayısının artması da maliyet açısından iyi bir durumu ifade etmektedir. Bununla birlikte uçuş trafiklerinin kontrolünü sağlayan hava trafik kulelerinin belirli periyotlarda bakım süreçleri ve maliyetleri bulunmaktadır. Bir havaalanında hava trafik hizmetlerinin sağlanabilmesi için trafik akışından bağımsız olarak sabit hava trafik yönetim maliyetleri, hava trafik yönetim personeli maliyetleri, kule inşası için gerekli yatırım maliyetleri, yenileme ve tesis yönetimi, bakım maliyetleri, özel eğitimler için gerekli maliyetler olarak bilinmektedir [13]. Bu maliyet kalemlerinin uçuş sayısı az olan havaalanlarında karşılanması oldukça zordur. Bu nedenle birden fazla az sayıda uçuşu olan havaalanının tek bir uzak kule merkezinden kontrol edilmesi gerek donanımsal açıdan gerekse bakım maliyetlerini en aza indirmektedir.

- *Emniyetli uçuş ve hareket açısından:* Uzak kule merkezi tasarımlarında standart kulelerde kullanılan OTW (pencere dışı görünüm) yerine ileri teknoloji ve kızılötesi özelliği bulunan kameralar kullanılmaktadır. Bu sayede kontrolörlerin görüş alanı artırılabilir. Uzak kule merkezi tasarımlarının gelişmiş işlevleri arasında kızılötesine dayalı gece görüşleri, kötü hava şartlarında veya karanlıkta görünmeyen nesnelerin algılanması, havaalanında izlenilmesi gereken bölgenin ekranda istenen derecede büyütülebilmesi, otomatik dürbün izleme işlevi, sanal havaalanı görüntüsü gibi özellikler yer almaktadır [13].

- *Güvenlik açısından:* Herhangi bir terör saldırısında havaalanlarının açık hedef ve bombalamaya maruz kalacak bölgeleri hava trafik kontrol kuleleridir. Uzaktan kule merkezi tasarımlarında güvenlik faktörü göz önünde bulundurularak personelin güvenli ve emniyetli olacağı bir bölgeye yerleştirilmesi öngörülmektedir. Kızılötesi tabanlı gece görüşü ve video tabanlı nesne algılamalı teknolojilerin de kullanılarak altyapı koruma ve izleme özellikleri artırılmaktadır [13].

Standart bir kule ile uzaktan kule tasarımlarının özellikleri Tablo 2.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2.1. *Standart kule ve uzaktan kule karşılaştırması*

STANDART KULE KONTROLÜ	UZAKTAN KULE KONTROLÜ
Hava trafik kontrol kulelerine kontrolör ataması yapılırken mevcut eğitim prosedürleri yeterli olmaktadır.	Uzak kule merkezi kontrolör atamalarında ise özel simülasyon eğitimleri gerekmektedir.
Her havaalanının kendine ait düzenli bakım ihtiyacı vardır.	Uzaktan kontrol edilen havaalanlarının ortak sistem ve bileşen kullanması ile bakım ve donanım maliyetleri minimuma indirilmektedir.
Tek bir kule bir havaalanının kontrolünü sağlar.	Bir uzak kule merkezi ile birden fazla havaalanının kontrolü sağlanmakla birlikte, aynı zamanda acil durum operasyonları da takip edilebilmektedir.
Gözlem pencere dışında insan gözüyle gerçekleşir.	360 derecelik geniş görüş alanı ile gözlem sağlar.
Tek bir hedefe odaklanıp dürbünle büyütme ve inceleme gerçekleşir.	Otomatik çoklu hedef takibi mümkündür.
İnsan gözünün limitinde bir görüş sağlanır.	Kızılötesi aracılığıyla geliştirilmiş gözlem mümkündür.

2.1.1. Uzaktan kule kavramı tarihçesi

Uzak kule merkezi fikri ilk olarak 2002 yılında DLR Alman Hava Uzay Merkezi tarafından ortaya çıkarılmıştır. Dünyanın ilk uzaktan kule prototipi, 2005 yılında uygulamanın teknik ve operasyonel fizibilitesini test etmek için Braunschweig Wolfsburg Havaalanı'ndaki DLR Uçuş Rehberliği Enstitüsü tarafından kurulmuştur. Bu yeniliğe İsveç Sivil Havacılık Otoritesi (LFV-Luftfartsverket) ve Alman Hava Trafik Kontrol Hizmetleri (DFS-German Air Traffic Control Service) gibi çok sayıda hava trafik kontrol kuruluşu ilgi göstermiştir. İlk uzak kule merkezi 2015 yılında İsveç'te faaliyete geçmiş ve Örnköldsvick havaalanının kontrolü Sundsvall şehrinin 268 km uzağında bulunan bir uzak kule merkezi tarafından sağlanmıştır (Şekil 2.7) [16].



Şekil 2.7. Uzaktan Kontrolü Sağlanan Örnsköldsvick Hava Trafik Kontrol Kulesi [17]

Uzak kule merkezi ile ilgili başlatılan bir diğer çalışma DLR tarafından 2016 yılında başlatılan PJ05 projesidir. Bu proje ile çoklu uzaktan kule uygulamaları kapsamında daha karmaşık ve iki ya da üç havaalanının eşzamanlı kontrolünün sağlanabilmesi için bir takım çözümler geliştirmek ve verimliliği artırmak amaçlanmıştır [18]. DFS ayrıca Saarbrücken, Erfurt ve Dresden havaalanlarının Leipzig'deki bir uzak kule merkezinden kontrolünü sağlamak üzere çalışmalar başlatmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen olumlu sonuçlar sayesinde Aralık 2018'de Saarbrücken Havaalanı uzaktan kontrol edilmek üzere faaliyete geçmiştir. Erfurt ve Dresden Havaalanları'nın uzaktan kontrolünün ise ilerleyen yıllarda olacağı öngörülmektedir [17].

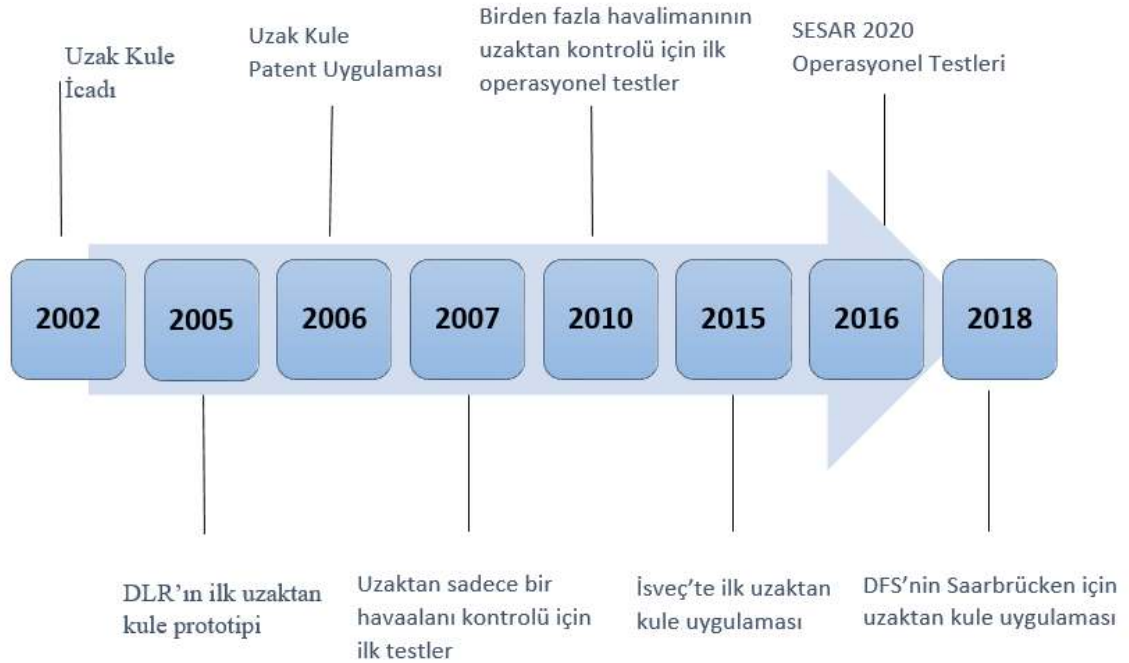
2017 yılında Amerika'nın Federal Havacılık İdaresi (FAA-Federal Aviation Administration)'de Kuzey Colorado'da uzak kule sistemi kurmak üzere Searidge Technologies ile bir anlaşma imzalamıştır. Bu proje Covid-19 nedeniyle ileri bir tarihe ertelenmiştir.

2017 yılında Frequentis AG, Hungaro Control, DLR ve Selex ES GmbH (Leonardo LTP) kuruluşları tarafından birden fazla havaalanı kontrolü için Braunschweig'de uzak kule doğrulama etkinliği başarıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.8'te Braunschweig'deki DLR Hava Trafik Doğrulama Merkezi'nde bir kontrolörün eşzamanlı olarak üç havaalanını (Budapest, Papa and Debrecen) kontrol edebildiği

gösterilmektedir [17]. Uzak kule merkezi ile ilgili olarak tarihsel gelişim süreci Şekil 2.9’da kronolojik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. *Budapest,Papa ve Debrecen havalimanlarının eş zamanlı uzaktan kontrolünü sağlayan uzak kontrol kule merkezi [17]*



Şekil 2.9. *Uzak kule merkezinin tarihçesi*

2.2. Literatür Araştırması

DLR, DFS, FAA gibi kuruluşların uzak kule merkezi uygulaması ile ilgili yapmış oldukları bir takım çalışma ve simülasyonlar olmasına rağmen yapılan detaylı literatür araştırmasında uzak kule merkezleri için en uygun yer seçimi konusunda matematiksel model oluşturulmasına yönelik akademik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Shmelova ve ark. 2020 yılında yapmış oldukları '*Methodology for the selection of an optimal selection of Remote Tower Center*' başlıklı çalışmalarında Ukrayna'daki küçük havalimanları için uzaktan kule merkezinin maliyet avantajı sunacağını vurgulayarak hangi havalimanları için uzak kule kontrolü uygulanabileceği konusunda bir çalışma yapmışlardır.

Araştırmacılar bu çalışmada uzaktan kule merkezi uygulamasındaki ağ performansı üzerindeki en önemli etkinin ağ ve veri iletim gecikmeleri olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bu gecikmeleri göz önünde bulundurarak birbirine yakın uçuş sayısı az olan havalimanlarını gruplandırmışlardır. Kontrol edilecek havaalanı grupları içerisinde minimum iki, maksimum üç havaalanı bulunmaktadır. Birbirine yakın havaalanı seçimi yapıldıktan sonra her bir grup için bir uzak kule merkezi ataması yapılmıştır. Uzak kule merkezi için en optimum yerin seçiminde mesafe kavramı temel oluşturmuş ve havaalanları ile kule merkezi arası mesafenin minimum olması amaçlanmıştır. Kule merkezinin yer seçimi yapılırken öncelikle bir gruptaki havaalanlarının koordinatları belirlenmiştir. Kule merkezinin kontrolünü sağlayacağı havaalanı sayısı ve havaalanlarının koordinatları da dikkate alınarak uzak kule merkezinin x ve y koordinatı için optimum noktalar belirlenmiştir.

Uzak kule merkezi için en uygun yer seçimleri yapılırken bir bölgedeki kule merkezi deniz üzerine denk gelmiştir. Bu noktaya merkez inşa edilmesi mümkün olmadığından araştırmacılar alternatifler çözüm sunmuşlardır. Bu kapsamda alternatif yer seçiminde havalimanlarının uçuş trafik yoğunluğu, kaynaklara ulaşılabilirlik imkânı, teknik yeterlilikler dikkate alınarak kule merkezi yerinde kaydırmalar yapılmıştır. Uzak kule merkezi için optimum yer seçiminde Classic Decision Criteria: Wald, Laplace, Hurwitz, Savage bilgisayar programlarını kullanmışlardır [6].

3. ANA DAĞITIM ÜSSÜ YER SEÇİM PROBLEMLERİ

3.1. Tesis Yeri Seçme Problemleri

Pazardaki rekabetin artması sonucunda lojistik, birçok rekabetçi firmanın son yirmi beş yıldır odaklandığı önemli bir konu olmuştur. Bir ürünün müşteriye eriştirilmesi sürecinde içerisinde hareket ettiği ağa ürün dağıtım ağı denir. Rekabetçi firmalar üzerinde pazardaki talebin artması ile birlikte ürün dağıtım ağı, özellikle maliyet ve ulaşım zamanı açısından oldukça önemli hale gelmiştir. Söz konusu maliyeti ve ulaşımı etkileyen temel etmenler, tesis yerinin konumu ve talep noktalarına uzaklığıdır [19].

Tesis yerleştirme, ulaşım için gerekli maliyetleri minimuma indirecek şekilde belirli sayıda tesisin yerleştirilmesi ve talep noktalarının en yakın tesise atanması veya en yakın merkez tesisten hizmet alacak şekilde uyarlanması olarak ifade edilebilir. Bu tip problemlerde en önemli amaç maliyeti azaltmak ve başlangıç ile varış noktaları arasında hizmet için mesafeyi kısaltmaktır. Bu avantajları göz önünde bulundurulduğunda gerçek hayatta tesis yer seçim problemlerinin sıkça rastlanılan optimizasyon problemleri olduğu söylenebilir [20].

Tesis yeri belirleme problemleri farklı açılardan birçok şekilde sınıflandırılabilir. Current ve ark. tarafından yapılan sınıflandırmaya göre sekiz ana başlık altında toplanabilmektedir. Bunlar;

- *Küme Kapsama Problemleri(Hub Covering Problem)*: Belirli bir kapsama seviyesinde olan ve maliyeti minimize etmeyi amaçlayan bir problem tipidir.
- *Maksimum Kapsama Problemleri(Maximum Covering Problem)*: Belirli sayıda hizmet veren tesis sayısı kısıtı ile maximum sayıda talep noktasını kapsamayı amaçlar.
- *P-Merkez Problemleri(P-Center Problem)*: Herhangi bir talep noktası ile o noktaya en yakın tesis arasındaki mesafeyi minimize etmeyi sağlayan problem tipidir.
- *P-Dağılım Problemleri*: Tesisler arasındaki mesafelerin değişmesine bağlı olarak ikiye ayrılır. Birinci tip problem yeni tesisler arasındaki mesafelerle ilgilenirken, ikincisi ise herhangi iki tesis arasındaki mesafeyi minimize etmeyi amaçlamaktadır.

- *P-Medyan Problemleri(P-Median Problem)*: Yer seçim kararlarında en yaygın kullanılan problem tiplerinden biridir. Bu problemlerin özünü mesafe veya mesafe ile ilişkili olan ölçütler oluşturmaktadır. n adet düğüm ile p adet tesisin yerini, talep noktası ile tesis arasındaki mesafeyi minimuma indirecek şekilde bulmayı amaçlayan yer seçim problemidir.
- *Sabit Maliyetli Tesis Yer Seçim Problemleri (The hub location problem with fixed costs)*: Tesislerin optimal yerine ve açılacak tesis sayısına karar verirken, tesis kurulum ve ulaşım maliyetlerini minimize etmeyi amaçlayan problem tipidir. Ayrıca talep noktalarının hangi tesisten hizmet alacağına da karar verilebilir.
- *Maksimum Toplam Problemi*: Tesislerin yerlerini belirlemeye çalışırken tesis ve talep noktaları arasındaki toplam talep ağırlıklı mesafeyi maksimize etmeyi hedefleyen problem tipidir.
- *Ana dağıtım üssü yer seçim problemleri*: İnsanların, eşyaların veya bilginin gerekli başlangıç-bitiş noktaları arasındaki hareketlerini inceleyen ve yerleşim teorisinin yeni ve gelişen araştırma alanlarından biridir [19].

3.2. Ana Dağıtım Üssü Yerinin Belirlenmesi

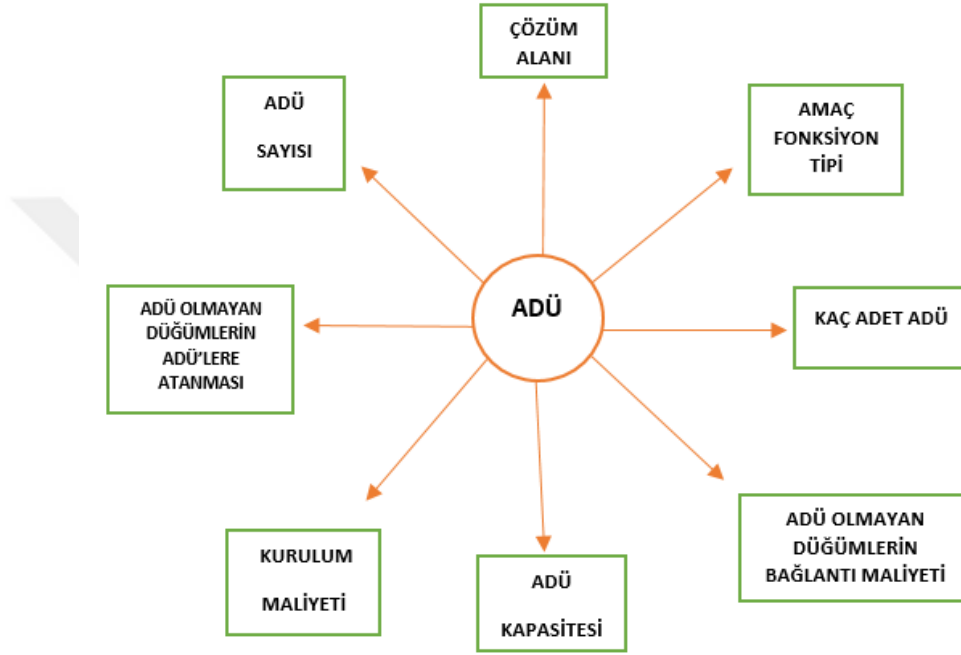
Ana Dağıtım Üssü (ADÜ-Hub Location Problem) çoktan çoğa dağıtım sistemlerinde toplama, sınıflandırma ve aktarma noktası olarak hizmet veren özel tesislerdir. ADÜ yer seçim problemlerinde akışlar direkt kaynak-varış noktaları arasında değil; maliyetin ön plana çıkarılması açısından ana dağıtım üsleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Bir topla-dağıt ağ yapısında merkezî bir konum niteliği taşıyan bölge, toplama ve dağıtım noktası olarak hizmet verir. Bu sayede daha az ulaşım yolu ile düşük maliyette nispeten daha fazla noktaya hizmet sağlamış olur. ADÜ problemleri yolcu taşımacılığı, kargo, acil hizmet ve telekomünikasyon alanlarında kullanılır.

ADÜ yerinin seçimi ADÜ'leri kaynak-varış noktaları ya da başka bir deyişle başlangıç-bitiş noktaları arasına yerleştirilmesini ve ADÜ'lere merkez dışındaki aktarımı sağlayan talep noktalarının atanmasını kapsar. Kısacası ADÜ yer seçim problemi iki alt problemden oluşur. Bunlardan birincisi ADÜ yer seçimi iken; diğeri ise düğüm noktalarının belirlenen en uygun ADÜ'lere atanmasıdır [19].

Ana Dağıtım Üssü yerinin seçimi ilk olarak O'Kelly'nin çalışmalarıyla başlatılmıştır. ADÜ yer seçim problemleri kullanılarak oluşturulan ilk matematiksel

model havayolu taşımacılığı ağı ile ilgilidir. O’Kelly bu modeli de tesis yer problemlerindeki sınıflandırmaya bir tip problem daha ekleyerek ‘minimum toplam problemi’ olarak ifade etmiştir [20].

ADÜ yer seçim problemleri üzerinde yapılan çalışmalar ve iyileştirmeler sonucunda ADÜ yerlerinin farklı kriterlerde çeşitli sınıflandırmalara ayrıldığı görülmektedir. Genel sınıflandırma kriterleri Şekil 3.1. üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.1. ADÜ Genel Sınıflandırma Kriterleri

Ana Dağıtım Üssü yerinin belirlenmesinde kullanılan kriterler çözüm alanına göre kesikli ve sürekli olarak ayrılırken, amaç fonksiyonuna göre Min-max (Kaynak ve varış noktaları arasındaki maksimum taşıma maliyeti minimize edilmeye çalışılır) ve Min-toplam (Ana dağıtım üsslerinin kurulum maliyeti ve ana dağıtım üssü olmayan noktaların ana dağıtım üsslerine atanma maliyeti toplamı minimize edilmeye çalışılır) olarak ikiye ayrılmaktadır. Kaç adet ADÜ kullanılması kriteri ise Eksojen yani kaç adet ADÜ gerektiğinin önceden bilinmesi ve Endojen yani ADÜ sayısına matematiksel model sonucunda karar verilmesi olarak iki gruba bölünmüştür. ADÜ sayısı ise tek ADÜ ve birden fazla ADÜ olarak sınıflandırılırken, ADÜ kapasitesi kapasiteli ve kapasitesiz olarak sınıflandırılmıştır. ADÜ kurulum maliyeti de maliyetsiz, sabit maliyetli ve değişken maliyetli olmak üzere üç gruba ayrılmıştır.

ADÜ olmayan düğümlerin ADÜ'lere atanması tek atamalı ve çok atamalı olarak sınıflandırılmıştır. ADÜ olmayan düğümlerden ADÜ'lere bağlantı maliyeti ise tıpkı kurulum maliyeti gibi maliyetsiz, sabit maliyetli ve değişken maliyetli olmak üzere üç gruba ayrılmıştır [7].

Campbell'a göre ADÜ yerinin belirlenmesi dört farklı grupta incelenmektedir. Bunlardan birincisi p-ADÜ medyan problemi, ikincisi sabit maliyetli ADÜ yer seçim problemi, üçüncüsü p-ADÜ merkez problemi ve sonuncusu da ADÜ kapsama problemidir. Kısaca değinmek gerekirse p-ADÜ medyan probleminde ' p ' ADÜ sayısını göstermektedir. Dağıtım hatları arasındaki toplam mesafeyi azaltarak kâr oranını artırmayı hedefleyen bir problem tipidir. Sabit maliyetli ADÜ yer seçim probleminde ise seçilecek ADÜ sayısı bir karar değişkenidir ve problemin çözümü sonucunda belirlenir. P-ADÜ merkez problemi p merkez problemine benzemekte olup; talep noktası ile tesis arasındaki toplam mesafeyi minimize etmeye çalışmaktadır. ADÜ kapsama problemi ise ADÜ açma maliyetini minimuma indirmeyi amaçlar. Var olan düğüm noktalarını kapsayacak şekilde kapsayan yerleştirme problemidir [21].

3.2.1. P-ADÜ medyan problemi

P-ADÜ medyan problemi tıpkı p-medyan problemi gibi yer seçim problemlerinde çok bilinen ve çözümü için üzerinde çokça çalışma gerçekleştirilmiş bir atama modelidir. p-ADÜ medyan probleminde ' p ' ADÜ sayısını ifade ederken; ' n ' ise talep noktalarını göstermektedir. Bu problemin amacı kaynak-varış çifti arasında akışların sürekliliği sağlanarak gerekli ADÜ sayısının belirlenmesi ve maliyetin minimize edilmesidir. Ana Dağıtım Üssü yerlerinden seçilen merkezlerin varış noktası olarak hedeflenerek tayin edilmesine atama denir. P-ADÜ medyan problemlerinde atamalar tek atamalı (single allocation) ve çok atamalı (multiple allocation) olmak üzere iki şekilde yapılır. Tek atamalı yapılarda var olan düğüm noktaları tek bir ADÜ tarafından hizmet alabiliyorken; çok atamalı yapılarda ise düğüm noktaları birden fazla ADÜ'den hizmet alabilmektedir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de sırasıyla tek atamalı ve çok atamalı ağ yapıları örnek olarak gösterilmiştir [22].

Revelle ve Swain (1970)'in oluşturdukları p-ADÜ medyan probleminin matematiksel modeli aşağıda tanımlanmıştır [19].

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i d_{ij} z_{ij} \quad (3.1)$$

$$\sum_{j=1}^n z_{ij} = 1 \quad \forall i \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.2)$$

$$z_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^n y_j = p \quad (3.4)$$

$$z_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.5)$$

Karar değişkenleri

z_{ij} , Eğer i müşterisi j tesisine atanmışsa 1; diğer durumda 0.

y_j , Eğer j noktasında bir tesis açılmışsa 1; diğer durumda 0.

Burada;

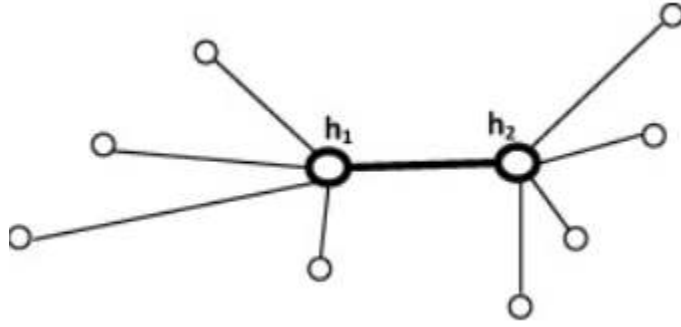
n = toplam talep noktası sayısı

a_i = i noktasındaki talep

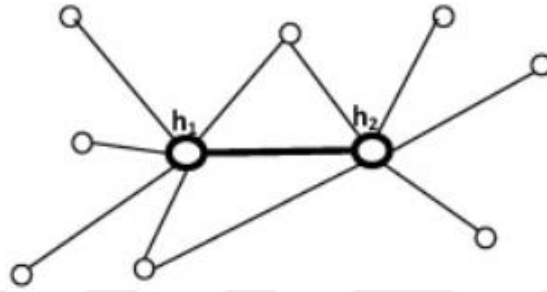
d_{ij} = i noktası ile j noktası arasındaki en kısa mesafe

p = yerleştirilecek olan hizmet verecek tesis sayısı olarak ifade edilmiştir.

Matematiksel modelde (3.1) numaralı denklem amaç fonksiyonu olup, talep noktaları ve hizmet sağlayan tesisler arasındaki maliyeti minimize etmeyi amaçlamaktadır. (3.2) numaralı kısıt ise her talep noktasının yalnız bir tesise atanması gerektiğini göstermektedir. Kısıt (3.3) ise merkez seçilmeyen bir tesise talep noktası ataması yapılmaması gerektiğini ifade etmektedir. (3.4) numaralı kısıt ise açılacak olan tesis sayısını p adet ile sınırlandırmaktadır.



Şekil 3.2. Tek atamalı örnek ağ yapısı [23]



Şekil 3.3. Çok atamalı örnek ağ yapısı [23]

- *Tek atamalı p -ADÜ medyan problemi:* Bu problem için ilk matematiksel model 1987 yılında O’Kelly tarafından oluşturulmuştur ve model doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Bir matematiksel modelde, amaç fonksiyonu ile kısıtları oluşturan denklemlerin bir kısmı ya da tümü doğrusal olmayan ifadelerden oluşuyor ise modele doğrusal olmayan model denir. Doğrusal tamsayılı model ilk defa Campbell tarafından 1994 yılında tanımlanmıştır. Modelin doğrusallaştırılması ile daha iyi çözümler elde edilebildiği vurgulanmıştır [20].

Daha büyük dereceden oluşan büyük boyutlu ve karmaşık problemlerin çözümü için Ernst ve Krishnamoorthy 1996’da daha az değişken ve kısıt ile yeni bir doğrusal tamsayılı model oluşturmuşlardır [22].

- *Çok atamalı p -ADÜ medyan problemi:* Tek atamalıdan farklı olarak talep noktaları birden fazla ADÜ’ye atanarak ADÜ’ler ve kaynak noktaları arasındaki dağıtım akışları birden fazla ADÜ kullanılarak sağlanmış olur. Çok atamalı p -ADÜ medyan probleminde ilk doğrusal tam sayılı model Campbell tarafından ortaya atılmıştır [22].

3.2.2. Sabit maliyetli ADÜ yer seçim problemi

Sabit maliyetli ADÜ problemlerinde ADÜ sayısı karar değişkeni olarak bilinmektedir. Sabit maliyetli ADÜ problemlerinde asıl amaç ADÜ sayısını belirlemek olduğu için ADÜ karar değişkeni olarak tanımlanmaktadır. Bu tip problemlerde ADÜ sayısını belirlerken ADÜ kurulum maliyeti de dikkate alınmaktadır. Sabit maliyetli ADÜ yerleşim problemleri ‘kapasite sınırı olmayan’ ve ‘kapasite sınırı olan’ ADÜ yerleşim problemleri olmak üzere ikiye ayrılır [22].

- *Kapasite sınırı olmayan ADÜ yer seçim problemi:* O’Kelly sabit maliyetli ADÜ yerleşim problemlerinde ADÜ sayısını karar değişkeni olarak düşünerek, sabit maliyetli tek atamalı ADÜ yer seçim problemini oluşturmuştur. Bu problemi karesel tam sayılı program ile modellemiştir. Ardından Campbell tek/çok atamalı ve kapasite sınırlı/kapasite sınırsız problemler için doğrusal programlama modelleri geliştirmiştir [24].

- *Kapasite sınırı olan ADÜ yer seçim problemi:* ADÜ merkezleri ile kaynak noktaları arasında bulunan bağlantılarda kapasitesinin sınırlı olduğundan yola çıkarak kapasite sınırı olan sabit maliyetli ADÜ yer seçim problemleri Aykın tarafından öne sürülmüştür. Problemden ADÜ olmayan iki nokta arasındaki bağlantıya izin verilmiş ve problemin çözümüne yönelik lagrange gevşetmesi yöntemiyle elde edildiği bir dal sınır geliştirilmiştir. Bu yöntemde, başlangıç problemini karmaşıklaştıran ve dolayısıyla çözümü zorlaştıran bazı kısıtlar gevşetilerek, belirli bir katsayısı ile çarpılmış şekilde amaç fonksiyonuna taşınmaktadır [25].

O’Kelly’nin sabit maliyetli ADÜ yer seçim problemi için geliştirdiği matematiksel model şu şekilde ifade edilmiştir [22].

$$\text{Enk } \sum_{i,j} w_{ij} [\sum_k c_{ik} . x_{ik} + \sum_k \sum_m \alpha . c_{km} . x_{ik} . x_{jm} + \sum_m c_{jm} . x_{jm}] \quad (3.6)$$

$$\sum_k x_{ik} \quad (3.7)$$

$$\sum_i x_{ik} = p \quad (3.8)$$

$$x_{ik} \leq x_{kk} \quad \forall i, k \in N \quad (3.9)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in N \quad (3.10)$$

Karar Değişkenleri

x_{ik} i talep noktası k ADÜ'ye atanmışsa 1, diğer durumlarda 0

x_{kk} k talep noktası ADÜ olduğu durumlarda 1, diğer durumlarda 0

Burada;

N talepler kümesini,

i başlangıç noktasını,

j varış noktasını,

k potansiyel ADÜ noktasını,

p atanacak ADÜ sayısını,

w_{ij} i'den j'ye akış miktarını,

c_{ij} birim taşıma maliyetini,

$\alpha \in (0,1)$ olmak üzere maliyet azaltma katsayısını göstermektedir.

Modelde bulunan (3.6) numaralı denklem amaç fonksiyonudur ve toplam taşıma maliyetinin en küçüklenmesini ifade eder. (3.7) ve (3.10) numaralı kısıtlar, her düğümün sadece bir ADÜ'ye atanması gerektiğini göstermektedir. (3.8) numaralı kısıt, ADÜ sayısını sınırlandırmaktadır. (3.9) numaralı kısıtta ise atamaların sadece ana dağıtım üslerine yapılması gerektiği gösterilmektedir.

3.2.3. P-ADÜ merkez problemi

P-ADÜ merkez probleminin ilk matematiksel modeli Campbell tarafından oluşturulmuştur. Campbell bu çalışmada p-ADÜ merkez problemi için aşağıda maddeler halinde verilen üç farklı tip tanımlaması yapmıştır:

- Herhangi bir başlangıç-varış çifti arasında maksimum maliyetin minimize edilmesi,
- Kaynaktan- ADÜ, ADÜ-ADÜ'ye, ADÜ- talep noktası arasında maksimum maliyetin minimize edilmesi,
- ADÜ ile başlangıç-varış çifti arasındaki akıştaki maliyetinin minimize edilmesi [7].

3.2.4 ADÜ kapsama problemi

Küme Kapsama Problemleri 0-1 tamsayılı programlama modelinin özel bir türüdür. Küme kapsama yer seçim problemi modelinde talep noktaları ve aday merkezler arasındaki uzaklıklar da ele alınacak şekilde, tüm talep noktalarının hizmetini karşılayacak minimum sayıda merkez oluşturmak amaçlanmaktadır. Bu amaçla birlikte merkez açma maliyeti de minimize edilerek bir diğer hedefe de ulaşılmış olacaktır.

Küme kapsama problemleri Campbell tarafından ortaya çıkarılmıştır. Kara ve Tansel [26], Campbell'in modelini geliştirerek, problemin çözüm süresini azaltacak şekilde tek atamalı küme kapsama problemi modeli oluşturmuştur. Wagner ise tek atamalı kapsama problemi modeline yeni bir model oluşturmakla birlikte aynı zamanda çok atamalı kapsama problemine yönelik de yeni bir formülasyon geliştirmiştir.

Campbell'in [27] küme kapsama problemi modeli şu şekildedir.

$$\min z = \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.11)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq 1 \quad i= 1,...,m \quad (3.12)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad j= 1,...,n \quad (3.13)$$

Bu modelde n merkez olarak seçilebilecek aday noktaların sayısını; m ise kapsanması gereken talep yerlerinin sayısını göstermektedir. a_{ij} , i . talep noktası j .

merkezden hizmet alıyorsa 1; diğer durumlarda 0 anlamına gelen değişkendir. X_j , j . aday yerinin, merkez olarak açılmışsa 1; diğer durumda 0 olduğunu göstermektedir.

Matematiksel modelde verilen (3.11) numaralı denklem amaç fonksiyondur ve seçilen merkezlerin minimum sayıda olmasını sağlayarak toplam maliyeti en küçükler. (3.12) numaralı denklem ise i . talep noktasının j . aday yerden hizmet alması durumunda X_j değişkenin 1 olacağını yani j . aday yerinin merkez olarak açılacağını göstermektedir [27, 28].



4. UZAKTAN KULE MERKEZİ YERİ BELİRLEME MATEMATİKSEL MODELİ

4.1. Araştırma Problemi

Dünya genelinde artan nüfusa bağlı olarak var olan tüm ulaşım çeşitlerinin de büyüdüğü görülmektedir. İnsanlar için ulaşımında zaman ve mesafe kriteri oldukça önemlidir. Bu doğrultuda diğer taşıma modları ile karşılaştırıldığında mesafeleri oldukça kısaltması ve dünyanın herhangi bir yerine daha kısa sürede ulaşımı sağlaması avantajı ile hava taşımacılığının her geçen gün hızla büyümesi kaçınılmazdır.

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO)’nden alınan verilere göre uluslararası yolcu trafiği 2021 yılında 2.3 milyar rakamlarına ulaşmıştır. Pandemi öncesinde gerçekleşen 2019 yılı verileri ile 2020 yılı karşılaştırıldığında yolcu trafiğinde % 60 oranında düşüş olduğu gözlenmiştir. Bu oran 2021’de % 49 olarak belirlenmiştir. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA)’nın 2021 yılı Aralık raporu incelendiğinde, 2021 yılı sonuna kadar Omicron varyantına rağmen havacılık sektöründeki iyileşmenin devam ettiği vurgulanmıştır. Dünya genelinde aşının bulunmasıyla birlikte 2019-2020 yılları arasında uçuş trafiğinde yaşanan % 34.2 artışın yerini 2021 yılında % 41.6 artış değerleri olarak sektörün toparlandığı gözlemlenmiştir. Eurocontrol tarafından yayımlanan rapora göre, COVID-19’un havacılık sektörüne yansıtmış olduğu olumsuz etkilerin tamamen giderilmesinin ardından 2022 yılında 2019 yılına kıyasla yolcu trafiğinde % 70-90’luk bir artış olacağı öngörülmüştür. Havacılık sektöründeki toparlanmanın 2019 seviyelerine ulaşabilmesi için üç senaryo oluşturulmuştur. İyimser açıdan havacılık sektöründeki iyileşmenin 2022 yılı ortalarında başlayacağı; temel öngörüye göre 2024 yılında ve kötümser açıdan değerlendirildiğinde de 2027 yılında gerçekleşeceği düşünülmektedir [1].

Hava trafiğindeki yoğunluk artışına bağlı olarak hava trafik kontrol kulelerinin hizmet seviyelerinde de her geçen gün artış yaşanmaktadır. Artan hizmet seviyelerine bağlı olarak yeni bir takım donanımsal ve bakıma özgü maliyetler oluşmaktadır. Hava trafik yönetimi açısından pek çok maliyet faktörü olmakla birlikte verilen hizmetler dikkate alındığında hava trafik kontrol kuleleri gerek donanımsal açıdan gerekse bakım ve diğer hizmet maliyetleri açısından önemli bir sabit maliyet faktörüdür. Havaalanlarında bu maliyetlerin karşılayabilmesi daha önce de bahsedildiği üzere daha çok uçuş ve yolcu sayısına bağlıdır. Yolcu ve uçuş sayısı oldukça fazla olan büyük havaalanları için sabit maliyet giderleri kolaylıkla karşılanabilirken, düşük yoğunluklu

havaalanları için bu durum biraz daha zor olmaktadır. Bu tür uçuş sayısı az olan havaalanlarının kapatılması yerine ya da verimliliğinin ve kar oranlarının artırılması amacıyla son yıllarda en uygun çözüm yöntemi olarak uzak kule merkezi uygulamaları gündeme gelmiştir. Bu uygulama sayesinde hava trafik kontrol kulesi ve diğer hizmet maliyetlerinin minimum seviyeye indirgenmesi hedeflenmektedir. Buna ek olarak yeni açılacak havaalanları için yeniden kule inşa etmeye gerek kalmayacaktır. Uzak kule uygulaması sayesinde havalimanları yatırım maliyetlerinin minimize edilmesinin yanı sıra, kızılötesi özelliği bulunan ileri teknoloji kameralar kullanılması her türlü hava koşulunda görüş kalitesinin artması açısından da avantaj sağlamaktadır. Aynı zamanda kule merkezinin kalabalık ortamdan uzakta bir noktaya inşa edilmesi ile birlikte uçuş güvenliğinin artacağı söylenebilir.

FAA, EUROCONTROL, NASA, DLR gibi kuruluş ve araştırma enstitüleri, hızla büyüyen hava taşımacılığının bir parçası olan havaalanı yatırım maliyetlerini en aza indirmek amacıyla uzak kule uygulanmasının gerekliliğini öne sürmüştür. Günümüzde Avrupa ve Birleşik Milletler uzak kule merkezi uygulaması ile ilgili birçok çalışma ve uygulama gerçekleştirmektedir. Bu çalışmalar ve uygulamalar doğrultusunda uzak kule merkezinin havacılık sektörünün geleceğinde önemli bir noktada olacağı kaçınılmazdır.

4.2. Araştırmanın Amacı

Son yıllarda havacılık sektöründe önemli bir kavram haline gelen uzak kule merkezi uygulamalarının iyileştirilmesi adına yakın bir gelecekte araştırmaların artacağı düşünülmektedir. Bu çalışmada uzak kule merkezleri için optimum yerlerin belirlenmesi amacıyla matematiksel bir model oluşturulması hedeflenmiştir. Bu kapsamda mümkün olan en fazla havaalanının uzaktan kontrolünü sağlayabilecek, hizmet düzeyini eniyeleyecek minimum sayıda ve en uygun konumdaki merkezin ADÜ problemlerinden faydalanılarak matematiksel modelleme ile seçilmesi amaçlanmıştır.

4.3. Araştırmanın Önemi

Yapılan detaylı literatür araştırmasında uzak kule merkezi konusunda FAA, EUROCONTROL, NASA gibi kuruluşların ve bazı araştırma enstitülerinin yapmış olduğu birtakım çalışmalar olmasına rağmen, uzak kule merkezlerinin konumlandırılmasında matematiksel modelleme oluşturmaya yönelik akademik bir

çalışmaya rastlanmamıştır. Ağırlıklı olarak Avrupa’da uygulamalarına rastlanan uzak kule merkezi yapılanmasının yakın bir gelecekte dünya genelinde birçok havaalanında uygulamaya geçeceği ve bu konuda yapılacak araştırmaların artacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda hızla gelişen havacılık sektöründe hem uçuş sayısı düşük olan mevcut havaalanlarının kapanma ihtimaline karşı, hem de havaalanı yatırım maliyetlerini en aza indirmek amacıyla uzak kule merkezi yer seçim problemi önemli bir konu başlığı olarak gündeme gelmektedir. Uzak kule merkezi için yer seçimi problemine matematiksel modelleme yaklaşımı ile yeni bir boyut kazandırılması gelecekte yapılacak çalışmalara sağlayacağı katkılar açısından önem arz etmektedir.

4.4. Araştırma Yöntemi

Kara ve Tansel (2000), ADÜ problem türlerinden biri olan Küme Kapsama Problemleri üzerinde birçok çalışma yapmışlar ve bu problem tipi üzerinde matematiksel model geliştirmişlerdir [26]. Bu çalışmada Kara ve Tansel tarafından geliştirilen küme kapsama problem modeli dikkate alınarak uzak kule merkezi yer seçimi problemine uyarlanmıştır. Trafik yoğunluğu düşük olan havalimanlarını belirlemek amacıyla pandeminin hava trafik verilerine etkisi göz önünde bulundurularak DHMİ tarafından yayınlanan 2018 yılı trafik verileri incelenmiştir. ICAO’nun trafik yoğunluğuna göre havaalanı sınıflandırması referans alınarak ortalama günlük uçuş sayısı 20 ve altında olan havaalanları düşük yoğunluklu olarak kabul edilmiştir.

Düşük trafik yoğunluğuna sahip ve birbirine yakın olan havalimanları belirlendikten sonra bu havalimanları, Shmelova ve ark. (2020)’nin Ukrayna için yapmış oldukları havaalanı gruplandırması referans alınarak birbirine yakın mesafede olacak şekilde ikişerli ve üçerli olarak gruplandırılmıştır. Gruplandırılan havalimanları arasında ulaşım, kaynak yeterliliği, mesafe gibi faktörler dikkate alınarak aday noktaların belirlenebilmesi için Google Earth uygulamasından yararlanılmıştır. Google Earth bilindiği üzere kapsamlı bir dünya haritası oluşturmak için tüm Dünya’nın uydularından çekilmiş görüntüleri kullanan bir coğrafi haritalama ve etiketleme programıdır. Bu program ile belirli bölgelerin koordinat ve rakım değerlerini belirleme, iki nokta arasındaki mesafeyi ölçme, yeni yerler keşfetme, incelenen alandaki ulaşım vs. koşullarını görebilme gibi birçok işlev gerçekleştirilebilmektedir. Aday yerlerin havaalanlarına, şehir merkezine ve en yakın yerleşkeye olan uzaklıkları, aday yerlerin rakım değerleri gibi parametreler dikkate alınarak kısıtlar geliştirilmiş ve matematiksel

model oluşturulmuştur. Matematiksel model oluşturulurken ele alınan parametre ve kısıtların yer seçimini nasıl etkileyeceği ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır. Oluşturulan matematiksel model GAMS yazılım Programı kullanılarak kodlanmış ve CPLEX çözücüsü ile çözümlenmiştir.

4.5. Uzak Kule Merkezi İçin Geliştirilen Matematiksel Model

Bu çalışmada uçuş sayısı az olarak belirlenen havalimanlarının kontrolünü sağlayacak minimum sayıda merkez bulunması ve havaalanı ile uzak kule merkezi arasındaki mesafenin minimumda tutulması amacıyla bir matematiksel model oluşturulmuştur. Geliştirilen matematiksel model ile birden fazla havaalanının hava trafik kontrolünün bir kontrol merkezinden sağlanarak maliyet probleminin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bir uzak kule merkezinin kontrol edebileceği havaalanı sayısı arttıkça fayda-maliyet açısından kazanç artacaktır. Ancak gerek hava trafik karmaşıklığının artacak olması, gerekse teknik olarak yaşanabilecek veri iletim gecikmesi vb. gibi aksaklıklar dikkate alındığında emniyeti maksimum seviyede tutabilmek için kontrol edilecek havaalanı sayısı gereğinden çok olmamalıdır. Bu nedenle uzak kule merkezleri için mevcut uygulamalardaki örneklerden yola çıkılarak maksimum sayıda kontrol edilecek havaalanı sayısı üç; minimum iki olacak şekilde aday yerleri belirlenmiştir. Havalimanlarının uzaktan kontrol edilmesini sağlayacak parametreler rakım değeri, mesafe, hizmet alabilirlik olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ile uzak kule merkezlerinin yer seçimi yapılırken optimum yerlerin seçilmesi ve hangi havalimanlarının hangi merkez tarafından kontrolünün sağlanması gerektiği amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Kara ve Tansel'in [26] geliştirmiş olduğu matematiksel model referans alınarak oluşturulan uzak kule merkezi yer seçimi matematiksel modelinde (4.2), (4.3), (4.4), (4.5) ve (4.6) mesafe kısıtları geliştirilerek Kara ve Tansel'in modeline uyarlanmıştır.

İndisler:

Havaalanları: $i = 1, 2, \dots, n$ adet

Aday merkez yerleri: $j = 1, 2, \dots, p$ adet

Parametreler

a_j : j . aday merkez yerinin rakım değeri

b_j : j . aday merkez yerinin en yakın yerleşkeye uzaklığı

c_j : j . aday merkez yerinin en yakın şehir merkezine uzaklığı

$d_{j,i}$: i havaalanı ile j noktasında aday merkez yeri arasındaki en kısa uzaklık

K_j : Her i havaalanı ile hizmet alacağı j aday merkez yeri arasındaki maksimum uzaklık değeri

T : Aday merkez yerlerinin en yakın yerleşkeye olan minimum uzaklık değeri

S : Aday merkez yerlerinin en yakın şehir merkezine maksimum uzaklık değeri

R : Aday merkez yerlerinin maksimum rakım değeri

Karar değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ havaalanı } j. \text{ aday merkez yerinden hizmet alıyorsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1, & j \text{ noktasında bir merkez açılmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases}$$

Amaç fonksiyonu

$$Enk z = \sum_j y_j \quad (4.1)$$

Kısıtlar

$$x_{ij} \cdot d_{ij} \leq K_j \quad \forall i, \forall j \quad (4.2)$$

$$\sum_{j: b_j \leq T} y_j \leq 0 \quad (4.3)$$

$$\sum_{j: c_j \geq S} y_j \leq 0 \quad (4.4)$$

$$\sum_j y_j \geq 1 \quad (4.5)$$

$$\sum_{j:a_j \leq R} y_j \leq 0 \quad (4.6)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad (4.7)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, \forall j \quad (4.8)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad (4.9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (4.10)$$

(4.1) Numaralı denklem modelin amaç fonksiyonudur ve havaalanlarının kontrolünü sağlayacak minimum sayıda merkez açılmasını hedeflemektedir.

Kısıt (4.2), i havaalanının j aday merkez yerinden hizmet alabilmesi için aralarındaki mesafenin belirlenen K değerinden büyük olmaması gerektiğini ifade etmektedir.

Kısıt (4.3), belirlenen aday merkez yerlerinin en yakın yerleşkeye uzaklıklarının T değerinin altında kalması halinde bu aday yerlerine atama yapılmayacağını ve merkez açılmayacağını göstermektedir.

Kısıt (4.4), belirlenen aday merkez yerlerinin en yakın şehir merkezine uzaklıklarının S değerinin üstüne çıkması halinde bu aday yerlerinde merkez açılmayacağını ifade etmektedir.

Kısıt (4.5), en az bir merkez açılması gerektiğini göstermektedir.

Kısıt (4.6), aday merkez yerlerinin rakım değerinin istenilen değerlerde olması için oluşturulmuştur. Aday merkez yerlerinin rakım değerinin belirlenen R değerinin altında olması halinde bu aday yerine merkez ataması yapılmayacağını ifade etmektedir.

Kısıt (4.7), her havaalanının kontrolünü sağlayacak yalnızca bir aday merkezin seçilmesi gerektiğini amaçlamaktadır. Yani bir havaalanı yalnızca bir aday merkezden hizmet almalıdır.

Kısıt (4.8), yalnızca açılan aday merkez yerlerine havaalanı ataması yapılması gerektiğini garanti etmektedir.

Kısıt (4.9) ve (4.10), karar değişkenlerinin 0 ya da 1 olmasını sağlayan kısıttır.

4.6. Geliştirilen Modelde Kullanılan Parametreler

4.6.1. Havaalanları ile uzak kule merkezi aday yerleri arası mesafe

Bu çalışmada ortalama günlük uçuş sayısı az (≤ 20) ve uzak kule merkezi tarafından kontrol edilecek olan havaalanları ile belirlenen aday yerleri arasındaki mesafe değerleri daha önce belirtildiği üzere Google Earth kullanılarak hesaplanmıştır.

Havaalanları ile uzak kule merkezi aday yerleri arasındaki mesafe parametresi matematiksel modelde belirli bir değer ile kısıtlanmıştır. Kısıt değerinin bulunmasında ise ikişerli ya da üçerli olarak gruplandırılan havaalanlarının; grup içinde belirlenen aday merkez yerlerine olan uzaklık değerlerinin ortalaması dikkate alınarak hesaplama yapılmıştır. Uzak kule merkezi aday yerleri ile havaalanları arasındaki mesafe parametresinin hesaplanması ile ilgili detaylı bilgiler çalışmanın uygulama bölümünde verilmiştir.

4.6.2. Uzak kule merkezi aday yerleri rakım değeri

Uzak kule merkezi matematiksel modelinde ele alınan bir diğer parametre de aday yerlerin rakım değeridir. Merkez olarak atanacak aday yerinin rakım değerinin, bölgede belirlenen diğer yerlerin rakım değerinin ortalaması veya üzerinde bir değer olması gerekmektedir. Ortalama rakım değeri, ikişerli ya da üçerli olarak ele alınan havaalanları gruplandırılmasının içerisinde belirlenen aday yerlerin rakım değerleri toplamının; küme içerisindeki toplam aday merkez yeri sayısına bölünmesi ile hesaplanmıştır.

Rakım değerinin hesaplanmasında kullanılan formülasyon (4.11) eşıtlığı ile gösterilmiştir.

$$R = \frac{M}{S} \quad (4.11)$$

Burada;

R = Ortalama rakım değeri

M = Gruplandırılmış küme içerisindeki aday merkez yerlerinin toplam rakım değeri

S = Gruplandırılmış küme içerisindeki toplam aday yeri sayısını ifade etmektedir.

4.6.3. Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın şehir merkezi arası mesafe

Matematiksel model oluşturulurken ele alınan parametrelerden bir diğeri de uzak kule merkezi aday yerlerinin en yakın şehir merkezine olan uzaklık değeridir. Belirlenen aday merkez yerlerine en yakın olan şehir merkezinin mesafe değeri hesaplanmıştır ve elde edilen veriler ise uygulama bölümünde verilmiştir. Tüm aday merkez yerlerinin en yakın şehir merkezine uzaklık değerleri toplamı ele alındıktan sonra belirlenen toplam aday merkez yeri sayısına bölünerek ortalama uzaklık değeri bulunmuştur. Bulunan değere yaklaşık bir değer matematiksel modelde kısıt olarak kullanılmıştır.

Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın şehir merkezi arası mesafenin hesaplanmasında kullanılan formülasyon (4.12) eşitliği ile gösterilmiştir.

$$E = \frac{T}{P} \quad (4.12)$$

Burada

E = En yakın şehir merkezine ortalama uzaklık değeri

T = aday merkez yerlerinin en yakın şehir merkezine uzaklık değerleri toplamı

p =belirlenen aday merkez yeri sayısı

4.6.4. Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın yerleşke arası mesafe

Matematiksel model oluşturulurken ele alınan parametrelerden bir tanesi de uzak kule merkezi aday yerlerinin en yakın yerleşkeye olan uzaklık değeridir. Belirlenen aday merkez yerlerinin en yakın yerleşkeye mesafe değeri hesaplanarak; tüm aday merkez yerlerinin en yakın yerleşkeye uzaklık değerleri toplamı ele alındıktan sonra belirlenen toplam aday merkez yeri sayısına bölünerek ortalama uzaklık değeri bulunmuştur.

Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın yerleşke arası mesafenin hesaplanmasında kullanılan formülasyon (4.13) eşitliği ile gösterilmiştir.

$$H = \frac{D}{P} \quad (4.13)$$

Burada

H = En yakın yerleşkeye ortalama uzaklık değeri

D = aday merkez yerlerinin en yakın yerleşkeye uzaklık değeri toplamı

p = Belirlenen aday merkez yeri sayısı



5. MODELİN TÜRK HAVASINDA UYGULANMASI

982.286 kilometre karelik hava sahasına sahip olan Türkiye hava sahasında uçuşların emniyetli ve düzenli bir şekilde gerçekleşmesi amacıyla verilen hava trafik kontrol hizmetleri üç ana başlık altında toplamıştır. Bu kapsamda kontrol sahaları içerisinde kontrollü uçuşlara saha kontrol hizmeti, bir veya birden fazla hava meydanına iniş ve kalkış yapan kontrollü uçuşlara yaklaşma kontrol hizmeti, meydan manevra sahası ve meydan civarında uçuşta olan tüm hava araçları için de meydan kontrol hizmeti verilmektedir. Türkiye hava sahasında bu hizmetleri vermek üzere 1 adet Saha Kontrol Merkezi (ACC), 47 Yaklaşma Kontrol Ünitesi (APP) ve 51 Meydan Kontrol Kulesi (TWR) bulunmaktadır. Türkiye hava sahası sınırları içerisinde faaliyet gösteren 58'i sivil ve 18 tanesi askeri olmak üzere toplam 76 havaalanı vardır.

Türkiye’de ICAO tarafından hava seyrüseferinde geliştirilen standart ve tavsiye edilen uygulamalar (SARPs- Standards And Recommended Practices) doğrultusunda Ek (Annex) dokümanlarda yer alan uluslararası kuralların faaliyete geçirilmesi, uçuş emniyetinin sağlanması, hava trafiğinin düzenlenmesi ve hava trafik yönetimi hizmetlerinin yerine getirilmesi DHMİ’nin sorumluluğunda gerçekleştirilmektedir. 2021 yılsonu itibarıyla, Türkiye için toplam uçak trafiği 1.5 milyon civarındadır. İç hat uçak trafiğinde 2020 yılı ile karşılaştırıldığında % 29.4, dış hatlarda % 65.5, transit uçuşlarda ise % 26.9’luk bir artış yaşanmıştır. 2003 yılından itibaren gerçekleşen uçak trafiği Tablo 5.1’de verilmiştir. 2021 yılsonu itibarıyla, toplam yolcu sayısı da 128.6 milyon olarak gerçekleşmiştir. İç hat yolcu sayısı 2020 yılı ile karşılaştırıldığında % 38.1; dış hat yolcu sayısı ise % 87.2 oranında artış göstermiştir. Bu çerçevede 2003-2021 yılları arasında gerçekleşen uçak trafiği ve yolcu trafiği ile değişim oranları sırasıyla Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.1. 2003-2021 Yılları arası uçak trafiği değişimi

Uçak Trafiği	2003	2020	2021	2020-2021 Değişim%
İç Hat	156.582	572.994	741.331	29,4%
Dış Hat	218.405	280.756	464.624	65,5%
Transit	154.218	201.418	255.622	26,9%
Toplam	529.205	1.055.168	1.461.577	38,5%

Tablo 5.2. 2003-2021 Yılları arası yolcu trafiği değişimi

Yolcu Trafiği	2003	2020	2021	2020-2021 Değişim%
İç Hat	9.147	49.740.303	68.711.173	38,1%
Dış Hat	25.296	31.875.837	59.676.396	87,2%
Transit	0	87.545	178.137	103,5%
Toplam	34.443	81.703.685	128.565.706	57,4%

DHMI'nin 2021 faaliyet raporu incelendiğinde hava taşımacılığında pandeminin etkisinin hızla azaldığı ve trafik verilerinin 2019 öncesi yüksek uçuş seviyelerine kadar ulaşacağı öngörülmektedir. Tüm dünyada olduğu gibi hava trafiğindeki artış hava trafik hizmet maliyetlerinin de artmasına etki edecektir.

5.1. Düşük Yoğunluklu Havaalanlarının Belirlenmesi

Türkiye sınırları içerisinde bulunan 56 havaalanının 2018 yılında Aralık ayı sonunda gerçekleşen toplam uçuş sayıları Tablo 5.3' te verilmiştir. DHMI tarafından yayınlanan trafik istatistikleri yıllara göre incelenerek uçuş sayısı düşük (ortalama günlük uçuş sayısı ≤ 20) havaalanları tespit edilmiştir. 2019, 2020 ve 2021 yıllarında gerçekleşen trafik istatistiklerinde Covid-19 pandemisinin etkisi dikkate alınarak düşük yoğunluklu havaalanlarının belirlenmesinde 2018 yılı trafik verileri kullanılmıştır. Bu kapsamda 2018 yılının aralık ayı sonunda havaalanlarının toplam uçuş sayısı ele alınarak aylık ve günlük ortalama uçuş sayısı hesaplanmıştır. Ele alınan ve uzaktan kontrol edilecek olan havaalanlarının sadece uçuş sayılarının düşük olması yeterli olmayıp, aynı zamanda uçuş sayısı düşük olan havaalanlarının yakın çevresinde de aynı problemle karşı karşıya olan havaalanları bulunması gerekmektedir. DHMI istatistikleri incelendiğinde örneğin Balıkesir Havaalanı'nda uçuş sayısının düşük olduğu gözlemlenmektedir. Fakat bu havaalanının çevresinde başka bir uçuş sayısı düşük olan havaalanı bulunmadığı için Balıkesir havaalanı dikkate alınmamıştır.

Uzak kule uygulamasından maksimum fayda elde edilebilmesi için en az iki havaalanının uzaktan kontrolünü sağlaması gerekmektedir. Bu kriter göz önüne alındığında uzaktan kontrol edilmesi öngörülen, birbirine yakın mesafede bulunan ve ortalama günlük uçuş sayısı düşük olan havaalanları ise Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Türkiye 2018 Aralık ayı sonu toplam uçuş sayıları

HAVAALANLARI	2018 YIL SONU TOPLAM UÇUŞ SAYISI	HAVAALANLARI	2018 YILSONU TOPLAM UÇUŞ SAYISI
İstanbul Atatürk	464.646	Eskişehir Hasan Polatkan	5.098
İstanbul Yeni Havalimanı	775	Hatay	9.914
İstanbul Sabiha Gökçen	232.275	Iğdır Şehit Bülent Aydın	2.136
Ankara Esenboğa	119.771	Isparta Süleyman Demirel	23.131
İzmir Adnan Menderes	91.447	Kahramanmaraş	2.704
Antalya	191.560	Kars Harakani	4.059
Gazipaşa Alanya	8.507	Kastamonu	975
Muğla Dalaman	35.471	Kayseri	14.633
Muğla Milas-Bodrum	33.145	Kocaeli Cengiz Topel	2.100
Adana	41.167	Konya	8.652
Trabzon	27.533	Malatya	6.645
Erzurum	9.498	Mardin	4.722
Gaziantep	19.727	Muş Sultan Alparslan	3.042
Adıyaman	2.044	Kapadokya	8.144
Ağrı Ahmed-i Hani	2.408	Ordu-Giresun	7.784
Amasya Merzifon	1.419	Samsun Çarşamba	13.930
Aydın Çıldır	20.427	Siirt	46
Balıkesir Koca Seyit	20.219	Sinop	2.082
Balıkesir Merkez	107	Sivas Nuri Demirağ	4.220
Batman	4.671	Şanlıurfa Gap	6.028
Bingöl	1.648	Şırnak Şerafettin Elçi	3.018
Bursa Yenişehir	5.207	Tekirdağ Çorlu Atatürk	22.906
Çanakkale	5.316	Tokat	279
Çanakkale Gökçeada	76	Uşak	1.665
Denizli Çardak	5.842	Van Ferit Melen	14.396
Diyarbakır	13.275	Zafer	963
Elazığ	6.971	Zonguldak Çaycuma	430
Erzincan	3.657		

Tablo 5.4. 2018 Aralık ayı kontrol edilecek havaalanları ortalama uçuş sayıları

HAVAALANLARI	2018 Aralık Ayı Toplam Uçuş Sayısı	2018 Aylık Ortalama Uçuş Sayısı	2018 Günlük Ortalama Uçuş Sayısı
KASTAMONU	695	57	2
SİNOP	2082	173	6
AMASYA MERZİFON	1419	118	4
TOKAT	279	23	1
SİVAS NURİ DEMİRAĞ	4220	351	12
ORDU-GİRESUN	7784	645	20
MALATYA ERHAÇ	6645	553	18
ADİYAMAN	2044	170	6
KAHRAMANMARAŞ	2704	225	8
ERZİNCAN	3657	304	10
BİNGÖL	1648	137	5
MUŞ SULTAN ALPARSLAN	3042	253	9
KARS HAKAKANI	4059	338	11
AĞRI AHMED-İ HANİ	2408	200	7
IĞDIR ŞEHİT BÜLENT AYDIN	2136	178	6
SİİRT	46	3	1
ŞIRNAK ŞERAFETTİN ELÇİ	3018	251	8
HAKKARİ YÜKSEKOVA SELAHADDİN EYYUBİ	1658	138	5

Düşük yoğunluklu havaalanları tespit edildikten sonra bu havaalanları aralarındaki mesafelere bağlı olarak ikişerli ve üçerli şekilde gruplandırılmıştır. Bu doğrultuda oluşturulan havaalanı grupları aşağıda şu şekildedir.

İkişerli Gruplandırma

- Kastamonu Havaalanı- Sinop Havaalanı
- Tokat Havaalanı- Sivas Nuri Demirağ Havaalanı
- Adıyaman Havaalanı -Kahramanmaraş Havaalanı
- Bingöl Havaalanı- Muş Sultan Alparslan Havaalanı
- Kars Harakani-Ağrı Ahmed-i Hani Havaalanı
- Siirt Havaalanı- Şırnak Şerafettin Elçi Havaalanı

Üçerli Gruplandırma

- Kastamonu Havaalanı- Sinop Havaalanı- Amasya Merzifon Havaalanı,
- Tokat Havaalanı- Sivas Nuri Demirağ Havaalanı- Ordu Giresun Havaalanı,
- Malatya Erhaç Havaalanı- Adıyaman Havaalanı -Kahramanmaraş Havaalanı
- Erzincan Havaalanı- Bingöl Havaalanı- Muş Sultan Alparslan Havaalanı,
- Kars Harakani-Ağrı Ahmed-i Hani Havaalanı- Iğdır Şehit Bülten Aydın Havaalanı,
- Siirt Havaalanı- Şırnak Şerafettin Elçi Havaalanı- Hakkari Yüksekova Selahaddin Eyyubi Havaalanı, şeklinde gruplar oluşturulmuştur.

İkişerli ve üçerli olarak gruplandırılan havaalanları sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görsel olarak verilmiştir.



Şekil 5.1. Uzaktan kontrol edilecek havaalanlarının ikişerli gruplandırılmış hali



Şekil 5.2. Uzaktan kontrol edilecek havaalanlarının üçerli gruplandırılmış hali

5.2. Parametre Hesaplamaları

5.2.1. Havaalanları ile uzak kule merkezi aday yerleri arası mesafe

Uzak kule merkezleri için aday yerler belirlenirken hizmet verilecek havaalanlarının uçuş sayıları ve havaalanı ile aday yeri arasındaki mesafenin ters orantılı olacağı dikkate alınmıştır. Gerek veri kaybı ve gecikmesinin önüne geçebilmek, gerekse Geniş Alan Ağı (WAN) kullanımından maksimum verim elde edebilmek için uzak kule aday merkezinin uçuş sayısı fazla olan havalimanlarına daha yakın olması gerekmektedir.

Havaalanları ile uzak kule merkezi aday yerleri arasındaki mesafe parametresi matematiksel modelde 77 km değeri ile kısıtlanmıştır. Kısıt değerinin bulunmasında kullanılan yöntem çalışmanın 4. Bölümde verilmiştir. Belirlenen aday yerleri ile kontrol edilmesi istenilen havaalanları arasındaki mesafe değerleri Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

Tablo 5.5. Aday merkez yerlerinin havalimanlarına uzaklık değerleri

Havaalanları Aday yerleri	Kastamonu	Sinop	Amasya	Tokat	Sivas	Ordu- Giresun	Malatya	Adıyaman	K. Maraş	Erzincan	Bingöl	Muş	Kars	Ağrı	Iğdır	Siirt	Şırnak	Hakkari
1	70	59	74	164	231	242	414	496	457	408	530	621	665	690	744	684	741	885
2	62	62	82	172	243	266	426	560	456	431	553	640	687	707	772	703	755	62
3	98	49	92	184	251	271	438	516	475	438	565	645	696	716	774	710	766	910
4	110	85	54	146	217	248	400	479	438	405	532	620	675	691	752	679	722	883
5	105	72	69	161	231	256	416	496	456	420	546	631	683	700	761	692	747	890
6	292	248	136	51	59	77	233	317	312	227	350	435	518	519	586	493	549	700
7	340	280	189	114	105	58	232	313	337	180	306	390	456	463	529	453	513	650
8	303	257	150	64	60	105	225	304	308	215	335	424	507	506	575	482	538	689
9	268	246	121	30	42	162	226	309	285	258	371	462	560	555	625	513	565	714
10	290	265	141	46	27	148	210	293	273	236	350	441	540	533	604	493	543	704
11	495	494	364	274	203	311	36	69	75	225	250	334	523	477	559	345	377	560
12	479	473	342	256	188	290	20	86	122	209	249	329	512	466	552	344	380	567
13	475	473	340	253	184	297	30	86	113	215	250	338	521	476	557	355	390	570
14	490	498	265	283	216	350	84	94	58	271	297	380	572	523	604	358	394	570
15	521	523	392	307	284	355	78	62	75	263	276	357	557	504	583	358	380	572
16	633	571	483	392	336	303	238	254	368	116	36	93	354	205	284	165	233	360
17	665	604	512	423	365	334	257	260	387	77	36	62	252	190	271	131	200	361
18	547	484	393	305	253	214	475	233	333	28	102	180	300	273	349	246	312	445
19	568	500	415	330	279	226	479	260	364	54	95	161	270	246	320	238	305	428
20	609	538	457	372	325	263	493	280	396	96	83	126	233	203	280	211	279	389
21	785	695	641	566	526	425	466	488	612	307	266	214	23	78	83	283	344	329
22	805	416	638	580	541	447	332	486	612	317	265	200	50	53	57	262	318	293
23	815	724	670	591	553	453	416	500	629	330	281	216	43	70	51	280	336	296
24	791	700	643	568	527	430	445	473	602	305	251	194	44	55	72	262	320	305
25	835	783	682	590	513	375	426	466	328	197	134	332	229	232	294	48	40	178
26	883	832	629	635	570	563	401	370	500	382	246	186	370	268	317	102	51	148
27	901	850	748	658	597	578	398	403	537	392	264	187	337	235	382	117	89	106
28	877	820	724	632	568	552	400	391	523	367	236	158	319	214	268	96	85	121
29	848	793	698	605	544	522	426	365	501	338	208	132	301	206	258	70	75	150
30	850	801	699	607	534	530	398	347	482	346	216	150	342	242	300	69	36	76

5.2.2. Uzak kule merkezi aday yerleri rakım değeri

Havaalanlarında terör saldırıları gibi tehlikeli durumların yaşanma olasılığının en yüksek olduğu bölüm hava trafik kontrol kuleleridir. Uzak kule merkezi kurulması durumunda hedef alınan noktaların kule merkezleri olabileceği öngörülmektedir. Bu tür problemlerinin önüne geçilmesi amacıyla uzak kule merkezlerinin kurulacağı yerin yüksekliğinin, bölgenin ortalama rakım değerinin üstünde olması oldukça önemlidir. Bu nedenle aday yerleri belirlenirken rakım değeri parametresi de göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca haberleşme noktasında internet ağının kesilmesi durumunda kullanılabilecek alternatif radyo haberleşmelerinde sinyal yansıması ve kaybının olmaması adına rakım değerinin yüksek olması avantaj sağlayacaktır. Uygulamada kullanılacak olan rakım değeri denklem (4.11) kullanılarak maksimum 800 metre olacak şekilde kabul edilmiştir. Belirlenen aday uzak kule merkezlerinin rakım değerleri Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6. Aday merkez yerlerinin rakım değerleri

ADAY MERKEZ YERLERİ	RAKIM DEĞERLERİ (METRE)	ADAY MERKEZ YERLERİ	RAKIM DEĞERLERİ (METRE)
Aday yeri 1	800	Aday yeri 16	1.910
Aday yeri 2	551	Aday yeri 17	1.403
Aday yeri 3	300	Aday yeri 18	1.037
Aday yeri 4	720	Aday yeri 19	1.031
Aday yeri 5	220	Aday yeri 20	984
Aday yeri 6	883	Aday yeri 21	1.074
Aday yeri 7	1.141	Aday yeri 22	1.394
Aday yeri 8	481	Aday yeri 23	1.001
Aday yeri 9	550	Aday yeri 24	1.223
Aday yeri 10	440	Aday yeri 25	735
Aday yeri 11	1.457	Aday yeri 26	606
Aday yeri 12	1.510	Aday yeri 27	1.590
Aday yeri 13	1.866	Aday yeri 28	2.000
Aday yeri 14	1.216	Aday yeri 29	2.227
Aday yeri 15	1.069	Aday yeri 30	1.232

5.2.3. Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın şehir merkezi arası mesafe

Uzak kule merkezlerinde olabilecek teknik problemlerin merkezde çözülmemesi durumunda bakım merkezinden yardım alınması gerekmektedir. Havalimanlarının bakım merkezleri genel olarak şehrin merkezinde bulunmaktadır. Bu sebeple kurulacak olan kule merkezlerinin şehir merkezine mesafesi önemli bir kriter olmaktadır. Ayrıca uzak kule merkezinde çalışacak olan hava trafik kontrolörlerinin ve diğer çalışan personellerin de yerleşim yeri bakımından şehir merkezini tercih etmesi durumunda şehir merkezine olan mesafe önem kazanmaktadır. Uygulamada kullanılacak en yakın şehir merkezine olan uzaklık değeri, (4.12) eşitliği ile hesaplanarak maksimum 60 km olarak belirlenmiştir.

5.2.4. Uzak kule merkezi aday yerleri ile en yakın yerleşke arası mesafe

Kule merkezinde çalışacak olan hava trafik kontrolörlerinin ve diğer personelin yerleşim yeri olarak şehir merkezini seçmemesi halinde en yakın yerleşke ikinci bir alternatif olmaktadır. Ayrıca yakın bir yerleşke olması ulaşım, gerekli kaynaklara kolay ulaşabilme veya herhangi bir ihtiyacın kolayca karşılanması konusunda da avantaj sağlamaktadır. Uygulamada kullanılacak en yakın yerleşkeye olan uzaklık değeri (4.13) eşitliği ile hesaplanarak minimum 1.4 km olarak belirlenmiştir. Aday merkez yerlerinin en yakın şehir merkezlerine ve en yakın yerleşkeye olan mesafeleri Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7. Aday merkez yerlerinin en yakın şehir merkezlerine ve en yakın yerleşkeye olan uzaklıkları

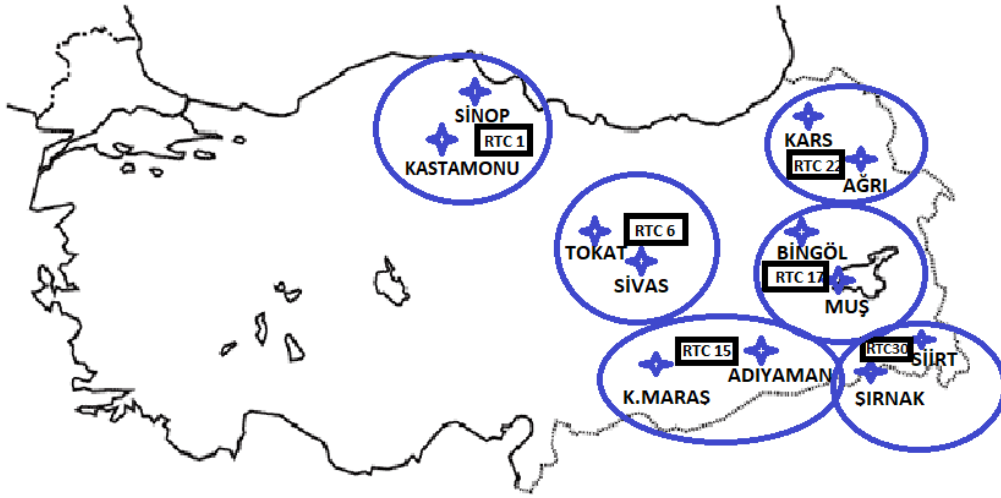
ADAY MERKEZ YERLERİ	EN YAKIN YERLEŞKEYE UZAKLIK(km)	EN YAKIN ŞEHİR MERKEZİNE UZAKLIK(km)
Aday yeri 1	1,74	57
Aday yeri 2	1,28	62
Aday yeri 3	1,16	68
Aday yeri 4	1,88	70
Aday yeri 5	1	62
Aday yeri 6	2,07	37
Aday yeri 7	2,9	50
Aday yeri 8	1,5	61
Aday yeri 9	1,1	62
Aday yeri 10	2,34	35
Aday yeri 11	3,32	39
Aday yeri 12	1,1	35
Aday yeri 13	1,2	42
Aday yeri 14	4,51	55
Aday yeri 15	3,36	43
Aday yeri 16	2	38
Aday yeri 17	3	42
Aday yeri 18	1,4	33
Aday yeri 19	4,70	58
Aday yeri 20	3,15	81
Aday yeri 21	4,22	27
Aday yeri 22	3,82	45
Aday yeri 23	1,2	47
Aday yeri 24	1	69
Aday yeri 25	1,94	63
Aday yeri 26	1,84	40
Aday yeri 27	2,45	70
Aday yeri 28	6,68	65
Aday yeri 29	3,84	58
Aday yeri 30	1,4	30

5.3. Matematiksel Modelin Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler

Uzak kule merkezinin yerinin belirlenmesine yönelik matematiksel model oluşturulurken mesafe ve rakım parametreleri ele alınmıştır. Ele alınan bu parametreler yapılan hesaplamalar sonucunda bir havaalanı ile uzak kule aday merkezi arasındaki mesafe maksimum 77 km, uzak kule merkezi aday yerinin rakım değeri minimum 800 m, uzak kule aday merkez yerinin en yakın yerleşkeye olan mesafesi minimum 1.4 km ve aday merkez yerinin en yakın şehir merkezine olan maksimum uzaklığı 60 km olarak kabul edilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu kontrol edilecek havaalanları için minimum sayıda merkez oluşturmak olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda daha önce 5.1’de verilen ikişerli ve üçerli havaalanı gruplandırması kullanılarak geliştirilen matematiksel modelin Ek-1’de verilen GAMS kodunun çözümlenmesinde GAMS IDE 36 yazılımı ile CPLEX çözücüsü kullanılmıştır. Tüm programlar Windows 10, Intel i7 8750H, 2.2 GHz işlemci hızı, 8 GB RAM ile çalıştırılmıştır.

5.3.1. İkili havaalanı gruplandırması için analiz sonuçları

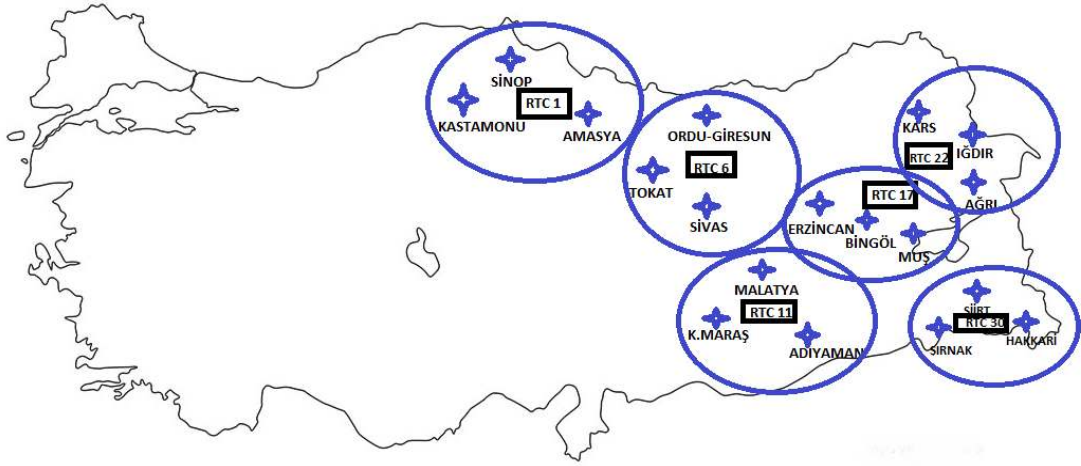
Geliştirilen matematiksel modelde ikili havaalanı gruplandırılmasında 12 havaalanı ele alınmış olup; uzaktan kontrolünü sağlayacak 30 aday yeri belirlenmiştir. Matematiksel model GAMS ile kodlanarak optimum sonuçlara ulaşılmıştır. Modelin çözümünden elde edilen sonuçlara göre 30 aday merkez yerinden 6 tanesi uzak kule merkezi olarak atanmıştır. Uzak kule merkezi atamalarına bakıldığında 1. Aday yerinin Kastamonu, Sivas Havaalanları için, 6. Aday yerinin Tokat, Sivas Havaalanları için, 15. Aday yerinin Adıyaman, Kahramanmaraş Havaalanları için, 17. Aday yerinin Bingöl ve Muş Havaalanları için, 22. Aday yerinin Kars ve Ağrı Havaalanları için, 30. Aday yerinin de Siirt, Şırnak Havaalanları için merkez olarak atandığı görülmektedir. Bu sayede 12 havaalanının kontrolünün 6 uzak kule merkezi tarafından sağlanabileceği tespit edilmiştir. Hangi havaalanlarının ortak bir merkez tarafından kontrol edileceği Şekil 5.3’te harita üzerinde görsel olarak verilmiştir.



Şekil 5.3. İkili kümelendirme senaryosunda kontrol edilecek havaalanları ve kontrol edecek merkezler

5.3.2. Üçlü havaalanı gruplandırması için analiz sonuçları

Ek-1’de verilen GAMS kodu üçerli havaalanı gruplarına uyarlanmış ve 12 havaalanı yerine 18 havaalanı ele alınacak şekilde yalnızca indis sayısı artırılarak matematiksel model yeniden çözülmüştür. Modelin çözümünden elde edilen sonuçlara göre 30 aday merkez yerinden 6 tanesi uzak kule merkezi olarak atanmıştır. Uzak kule merkezi atamalarına bakıldığında 1. Aday yerinin Kastamonu, Sivas, Amasya Havaalanları için, 6. Aday yerinin Tokat, Sivas ve Ordu-Giresun Havaalanları için, 11. Aday yerinin Malatya, Adıyaman, Kahramanmaraş Havaalanları için, 17. Aday yerinin Erzincan, Bingöl ve Muş Havaalanları için, 22. Aday yerinin Kars, Iğdır ve Ağrı Havaalanları için, 30. Aday yerinin de Siirt, Şırnak ve Hakkari Havaalanları için merkez olarak atandığı görülmektedir. Bu sayede 18 havaalanının kontrolünün 6 uzak kule merkezi tarafından sağlanabileceği tespit edilmiştir. Hangi havaalanlarının ortak bir merkez tarafından kontrol edileceği Şekil 5.4’te harita üzerinde görsel olarak verilmiştir.



Şekil 5.4. GAMS sonuçlarına göre kontrol edilecek havalimanları ve kontrol edecek merkez

5.3.3. İkili ve üçlü havaalanı gruplandırmasının karşılaştırılması

Uzak kule merkezi uygulamasından maksimum fayda sağlayabilmek için minimum iki havaalanının kontrolü sağlanmalıdır ve daha önce yapılmış olan testler sonucunda veri kaybı ve gecikmesi olmaması için maksimum üç havaalanının kontrol edilebileceği belirtilmiştir. Bu doğrultuda ikişerli ve üçerli havaalanı gruplandırması yapılmış olup sonuçtaki değişiklikler gözlemlenmiştir. Gruplandırmalar sonucunda seçilen uzak kule merkezlerinin tek bir aday merkez dışında aynı noktalar olduğu tespit edilmiştir. İkili gruplandırmada Adiyaman ve Kahramanmaraş Havaalanları için 15. Aday merkez yeri seçilirken; üçlü gruplandırmada ise 11. Aday yer seçilmiştir. Diğer aday merkez yerlerinde herhangi bir değişiklik olmamıştır.

İkişerli havaalanı gruplandırmasının GAMS kodunun sonuçlanma süresi 0.188 saniye iken; üçerli gruplandırılmış havaalanları için oluşturulan GAMS kodunun sonuçlanma süresi 0.281 saniye olarak belirlenmiştir.

Hesaplama sonucunda ikişerli ve üçerli havaalanı gruplandırmaları için seçilen uzak kule aday merkez yerlerinin kontrol edeceği havaalanları, bu havaalanlarına olan uzaklıkları, rakım değerleri, en yakın şehir merkezine ve en yakın yerleşkeye olan uzaklıkları sırasıyla Tablo 5.8 ve Tablo 5.9’da özet olarak verilmiştir.

Tablo 5.8. İkişerli havaalanı gruplandırmasında seçilen uzak kule merkez yerlerinin parametreleri

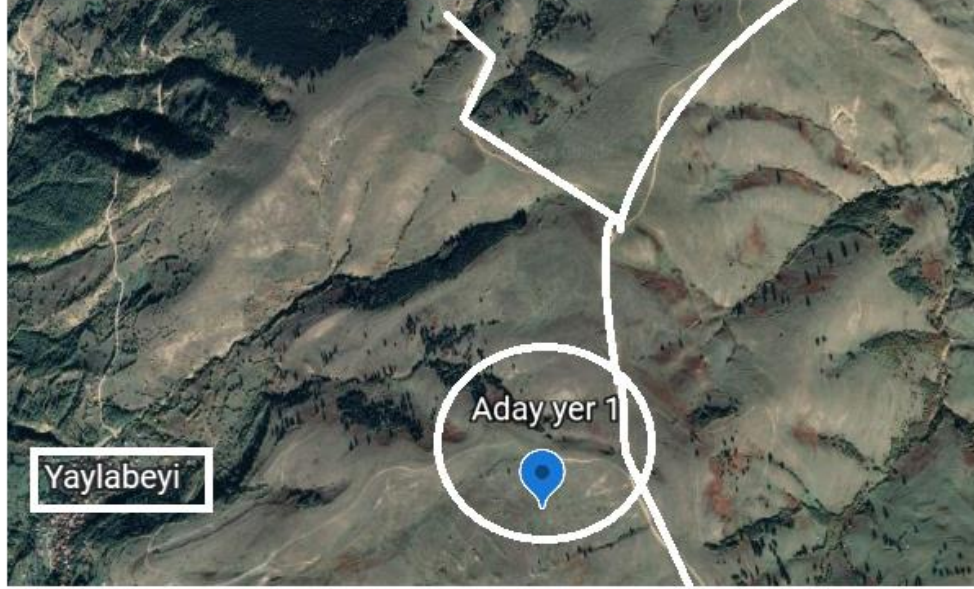
Seçilen Uzak Kule Aday Merkez Yerleri	Kontrolünü sağlayacağı havaalanları	Kontrol edeceği havaalanlarına olan uzaklık değeri	Rakım Değeri	En yakın yerleşkeye olan uzaklık değeri	En yakın şehir merkezine olan uzaklık değeri
ADAY YERİ 1	Kastamonu Sinop	70 km 59 km	800 m	1,74 km	57 km
ADAY YERİ 6	Tokat Sivas	51 km 59 km	883 m	2,07 km	37 km
ADAY YERİ 15	Adıyaman K.Maraş	62 km 75 km	1.069 m	3,36 km	43 km
ADAY YERİ 17	Bingöl Muş	36 km 62 km	1.403 m	3 km	42 km
ADAY YERİ 22	Kars Ağrı	50 km 57 km	1.394 m	3,82 km	45 km
ADAY YERİ 30	Siirt Şırnak	69 km 36 km	1.232 m	1,4 km	30 km

Tablo 5.9. Üçerli havaalanı gruplandırmasında seçilen uzak kule merkez yerlerinin parametreleri

Seçilen Uzak Kule Aday Merkez Yerleri	Kontrolünü sağlayacağı havalimanları	Rakım Değeri	En yakın yerleşkeye olan uzaklık değeri	En yakın şehir merkezine olan uzaklık değeri	Kontrol edeceği havalimanlarına olan uzaklık değeri
ADAY YERİ 1	Kastamonu Sinop Amasya	800 m	1,74 km	57 km	70 km 59 km 74 km
ADAY YERİ 6	Tokat Sivas Ordu-Giresun	883 m	2,07 km	37 km	51 km 59 km 77 km
ADAY YERİ 11	Malatya Adıyaman K.Maraş	1.457 m	3,32 km	39 km	36 km 69 km 75 km
ADAY YERİ 17	Erzincan Bingöl Muş	1.403 m	3 km	42 km	77 km 36 km 62 km
ADAY YERİ 22	Kars Iğdır Ağrı	1.394 m	3,82 km	45 km	50 km 53 km 57 km
ADAY YERİ 30	Siirt Şırnak Hakkari	1.232 m	1,4 km	30 km	69 km 36 km 76 km

İkişerli ve üçerli havaalanı gruplandırması için yapılan analizler sonucunda belirlenen aday merkez yerlerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüleri en yakın

yerleşke ve ulaşım güzergahlarına yakınlıkları ile birlikte Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.5. Seçilen 1. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü



Şekil 5.6. Seçilen 6. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü



Şekil 5.7. Seçilen 11. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü



Şekil 5.8. Seçilen 15. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü



Şekil 5.9. Seçilen 17. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü



Şekil 5.10. Seçilen 22. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü



Şekil 5.11. Seçilen 30. aday merkez yerinin Google Earth üzerindeki ekran görüntüsü

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hava taşımacılığındaki büyüme oranlarına paralel olarak havaalanları yatırımlarının gerekse hava trafik hizmet seviyelerinin de arttığı göz önünde bulundurularak uçuş sayısı düşük havalimanları için hizmet maliyetlerini en aza indirmek amacıyla uzak kule merkezi uygulamalarına odaklanılmıştır. Bu kapsamda Ana Dağıtım Üssü Yer Seçim Problem türlerinden bir tanesi olan küme kapsama problemlerinden yararlanılarak geliştirilen matematiksel model ile uzak kule merkezleri için en optimum yerlerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

ADÜ küme kapsama problemi ADÜ kurulum maliyetini minimize etmek için, ADÜ'leri tüm düğümleri kapsayacak şekilde yerleştirme problemidir. Uzak kule merkezi uygulamaları sayesinde havalimanları yatırım maliyetlerinin minimize edilmesinin yanı sıra, kızılötesi özelliği bulunan ileri teknoloji kameralar ile her türlü hava koşulunda görüş kalitesinin ve uçuş güvenliğinin artması gibi avantajlar da sunulabilmektedir.

Uzak kule merkezi olarak en uygun yerin seçilmesinde en önemli parametrelerden biri mesafedir. Kontrol merkezleri ile kontrol edilecek havalimanları arasındaki mesafenin azalması veri kayıplarının ve gecikmelerinin önüne geçebilmek için önemli bir koşuldur. Uzak kule merkezinin şehir merkezine ve en yakın yerleşkeye olan uzaklık değerleri ise kaynak yeterliliği, ulaşım ve konaklama açısından değer kazanırken; uzak kule merkezinin rakım değeri de güvenlik açısından dikkate alınabilecek önemli parametreler arasındadır. Uzak kule merkezi uygulaması için en iyi yerin bulunması konusunda matematiksel bir modelleme kullanılması havalimanlarının emniyetli bir şekilde kontrol edilmesini ve havayolu taşımacılığının dünyanın her yerinde daha iyi bir durumda olmasını sağlayarak bu çalışmanın önemini artırmaktadır.

Bu çalışmanın devamında yapılabilecek ve gelecekteki çalışmalara yol gösterebileceği düşünülen bazı öneriler aşağıda verilmiştir:

- Bugüne kadar yapılan uzak kule merkezi uygulamalarında bir uzak kule merkezi ile maksimum üç havaalanının kontrolü sağlanabilmiştir. Bunun nedeni ise uzak kule merkezinin daha fazla havaalanını kontrol etmesi halinde veri kaybı ve gecikmesinin yaşanmasıdır. Uzak kule merkezi ile havaalanları arasında veri iletiminin sağlandığı bant genişliğinin artırılması sonucu üç havaalanının sağladığı video görüntüleri ve diğer verilerden daha fazlası gecikme ve kayıp olmadan iletebilecektir.

- Çalışmada minimum sayıda uzak kule merkezinin maksimum sayıda havaalanını kontrol etmesine yönelik bir amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Tek bir amaç yerine uzak kule merkezinden maksimum faydalanabilmek için çok amaçlı yeni çözümler araştırılıp yeni bir matematiksel model veya farklı çözüm yöntemleri geliştirilebilir.
- Uzaktan kule merkezi uygulaması ile ilgili kurulum ve sistem maliyetlerine erişilmesi halinde iki veya üç havaalanının kontrol edilmesine yönelik maliyet analizini içeren bir çalışma yapılabilir.



KAYNAKÇA

- [1] ‘Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) Faaliyet Raporu’
<https://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/kurumsal/faaliyet/2021.pdf>
(Erişim Tarihi: 04.02.2022)
- [2] ‘Devlet Hava Meydanları İşletmesi(DHMI) Faaliyet Raporu’
[https://www.dhmi.gov.tr/Lists/FaaliyetRaporlari/Attachments/22/Faaliyet%20Raporu-31.05.2021web%20\(3\).pdf](https://www.dhmi.gov.tr/Lists/FaaliyetRaporlari/Attachments/22/Faaliyet%20Raporu-31.05.2021web%20(3).pdf) (Erişim Tarihi: 04.02.2022)
- [3] ‘Devlet Hava Meydanları İşletmesi(DHMI) Havacılık Terimleri Sözlüğü’
<https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Sozluk.aspx> (Erişim Tarihi: 02.08.2022)
- [4] Bayar, S. (2013). *Icao uçak kategorilerine göre tek pist sistemi için kapasite hesaplamalarında kullanılacak analitik bir model* (Order No. 28639628). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (2563685295). Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/icao-ucak-kategorilerine-gore-tek-pist-sistemi/docview/2563685295/se->
- [5] SHGM (2010), ICAO Annex 14 - Havaalanları Cilt 1: Havaalanı Tasarımı ve İşletimi, s.33.
- [6] Shmelova, T., Kredentsar, S., & Yastrub, M. (2020). Methodology for the Selection of an Optimal Location of Remote Tower Centre. In ICTERI Workshops (pp. 102- 115).
- [7] Aygün, S. (2014) Ana dağıtım üssü yer seçim problemleri ve bir kamu kurumu için gerçek bir ana dağıtım üssü yer seçim problemi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara: Kara Harp Okulu, Savunma Bilimleri Enstitüsü.
- [8] ICAO, D. (1984). 9426-AN/924 Air Traffic Services Planning Manual. International Civil Aviation Organization.
- [9] Van Schaik, F. J., Roessingh, J. J. M., Lindqvist, G., & Fält, K. (2010). Assessment of visual cues by tower controllers, with implications for a remote tower control centre. IFAC Proceedings Volumes, 43(13), 123-128.
- [10] ‘Standart Hava Trafik Kontrol Kulesi’ <https://pbs.twimg.com/media/Esp-nJ-W8AMQ1kl.jpg> (Erişim Tarihi: 01.08.2021)
- [11] Mullan, C., Lindqvist, G., Svensson, T., Abel, M., & Ankartun, P. (2013). D02/D04 OSED for Remote Provision of ATS to Aerodromes, Including

Functional Specification. NORACON, Single European Sky Air Traffic Management Research Joint Undertaking, Brussels

- [12] Jonsson, R., & Tägt, D. (2017). Remote Tower Center-Planning Tool.
- [13] Frequentis, A. G. (2016). Whitepaper: Introduction to remote virtual tower.
- [14] Yongli, Z., Zhengning, Y., & Liang, Z. (2020, October). Analysis of Remote Tower System. In 2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT (pp. 128-133). IEEE.
- [15] ‘Wide Area Network, Local Area Network’
https://tr.wikipedia.org/wiki/Geni%C5%9F_alan_a%C4%9F%C4%B1 (Erişim Tarihi:23.08.2021)
- [16] ‘Remote Tower Center’ <http://119.78.100.173/C666/handle/2XK7JSWQ/106902> (Erişim Tarihi 12.02.2022)
- [17] ‘Remote and Virtual Tower’
[‘https://en.wikipedia.org/wiki/Remote_and_virtual_tower](https://en.wikipedia.org/wiki/Remote_and_virtual_tower) ‘(Erişim tarihi 14.02.2022)
- [18] Delgado, L., Gurtner, G., Cook, A. J., & Tanner, G. (2020). Domino D1. 2-Final Project Results Report.
- [19] Aygün, S., Köse, E., & Aplak, H. S. (2015). Döğümler Arasında Direkt Gidiş Müsade Eden Kapasite Kısıtlı, Çok Atamalı Ana Dağıtım Üssü Yer Seçim Problemi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(4).
- [20] Durak, İ., & YILDIZ, M. (2015). P-Medyan tesis yeri seçim problemi: Bir uygulama. Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi, 7(2).
- [21] Current, J., Daskin, M., & Schilling, D. (2002). Discrete network location models. Facility location: Applications and theory, 1, 81-118.
- [22] O'Kelly, M. E. (1986). The location of interacting hub facilities. Transportation science, 20(2), 92-106.
- [23] Sarıçiçek, İ., & Akkuş, Y. (2015). Unmanned aerial vehicle hub-location and routing for monitoring geographic borders. *Applied Mathematical Modelling*, 39(14), 3939-3953. Özger, A. (2015). Havayolu Kargo Taşımacılığında Ana Dağıtım Üssü Yerleşim Problemine Tamsayılı Model Yaklaşımı (Doctoral dissertation, Anadolu University (Turkey)).

- [24] Skorin-Kapov, D., Skorin-Kapov, J., & O'Kelly, M. (1996). Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems. *European journal of operational research*, 94(3), 582-593.
- [25] Kara, B. Y., & Tansel, B. C. (2003). The single-assignment hub covering problem: Models and linearizations. *Journal of the Operational Research Society*, 54(1), 59-64. Campbell, J. F. (1994). Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 72(2), 387-405.
- [26] Karimi, H., Bashiri (2011). Hub covering location problems with different coverage types. Shahed University, Department of Industrial Engineering, Iran.



EKLER

Ek-1. Uzak Kule Merkezi Yer Belirleme Problemi

(İkili Havaalanı Gruplandırması)GAMS Kodu

```
option mip=cplex;
*çözücü seçimi
option optcr=0;
*boşluk toleransı
set
i havalimanı / kastamonu,
sinop,tokat,sivas,adiyaman,kahramanmaras,bingol,mus,kars,agri,siirt
,sirnak/
j aday yerleri /1*30/;
scalar
*K Her havalimanına en fazla 77 km uzaklıkta en az bir RTC olması
şartıyla en az sayıda merkez oluşturmak(km)/77/
K Her havalimanı ile aday yerleri arasındaki maximum uzaklık
değeri(km)/77/
R belirlenen aday yerlerinin minimum rakım değeri(m)/800 /
*aday yerlerinin ortalama rakım değerinin üstünde bir değer alındı.
T aday yerlerinin en yakın yerleşkeye minimum uzaklığı(km)/1.4/
*Havalimanlarının en yakın yerleşkeye olan ortalama uzaklığı ele
alındı.
S aday yerlerinin şehir merkezine max uzaklığı (km)/60/

Parameters
c(j) aday yerlerin şehir merkezine uzaklığı
b(j) aday yerlerin en yakın yerleşkeye uzaklığı
a(j) aday yerlerin rakımı
table d(j,i) her bir aday yer ile her havalimanı arası uzaklık

variables
x(i,j)
y(j),z;
binary variables
x(i,j)
y(j);
*x(i,j) hangi havalimanının hangi merkezden hizmet alacağını;
*y(j) merkezin açılıp açılmayacağını ifade ediyor.

equation
kisit1(i,j)
kisit2
kisit3
kisit4
kisit5
kisit6(i)
kisit7(i,j)
amac;

kisit1(i,j)..x(i,j)*d(j,i)=l=K;
```



```

kisit2.. sum(j$(b(j)<T),y(j))=l=0;
kisit3.. sum(j$(c(j)>S),y(j))=l=0;
kisit4..sum(j,y(j))=g=1;
kisit5.. sum(j$(a(j)<R), y(j))=l=0;
kisit6(i).. sum((j),x(i,j))=e=1;
kisit7(i,j).. x(i,j)=l=y(j);

amac.. z=e= sum((j),y(j))
model rtc/all/
solve rtc using mip minimazing z;
display x.l,y.l,z.l;

```



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-4162-1213

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hatice DOĞAN

Uyruğu : Türkiye (T.C)

EĞİTİM DURUMU

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Anadolu Üniversitesi Havacılık Elektrik ve Elektronik	29.05.2019
Lise	Turgut Özal Anadolu Lisesi	2013

İŞ DENEYİMLERİ

YIL	KURUM	GÖREV
2021-Halen	Kapadokya Üniversitesi	Araştırma Görevlisi