HAVA SAHASI SEKTÖRİZASYONU PROBLEMİNE YENİ BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

Kadriye YAMAN
Doktora Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Şubat-2010

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Kadriye YAMAN'ın "**Hava Sahası Sektörizasyonu Problemine Yeni Bir Çözüm Yaklaşımı**" başlıklı **Sivil Havacılık** Anabilim Dalındaki, Doktora Tezi 06.02.2010 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı- Soyadı	**İmza**
Üye (Tez Danışmanı)	**: Yard. Doç. Dr. HAKAN OKTAL**	**.....**
Üye	**: Prof. Dr. MUSTAFA CAVCAR**	**.....**
Üye	**: Doç. Dr. AYDAN CAVCAR**	**.....**
Üye	**: Doç. Dr. REFAİL KASIMBEYLİ**	**.....**
Üye	**: Yard. Doç. Dr. AYDIN SİPAHİOĞLU**	**.....**

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

HAVA SAHASI SEKTÖRİZASYONU PROBLEMİNE YENİ BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

Kadriye YAMAN

Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. Hakan OKTAL
2010, 196 sayfa

Son yıllarda hava taşımacılığında yaşanan hızlı büyüme karşısında gecikme ve tıkanıklık problemleri, dünyanın pek çok yerinde hava trafik yönetim sistemi kapasitelerini giderek yetersiz kılmaya başlamıştır. Bu doğrultuda sistemde kapasite-talep dengesini sağlamak amacıyla yapılan çalışmalar daha da önem kazanmış, hava trafik yoğunluğunun sektörlere dengeli bir şekilde dağılımını sağlayabilecek sektörizasyon çalışmalarına gereksinim artmıştır. Gerek hava taşımacılığının dinamik yapısı gerekse hava trafik kontrolör iş yükünün çok sayıda parametre ve değişkene bağlı olması nedeniyle hava sahası sektörizasyonu problemleri çözümü zor ve karmaşık problemler sınıfında yer almaktadır.

Bu çalışmada, hava trafik sisteminin en önemli parçası olan hava trafik kontrolörlerinin iş yükü ve hava sahası karmaşıklığını birlikte ele alan matematiksel modelleme yaklaşımı ile hava sahası sektörizasyonu problemlerine yeni bir boyut kazandırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda kontrolör iş yükü esasına dayanarak trafiğin sektörlere dengeli bir şekilde dağılımını sağlayabilmek amacı ile ızgara tabanlı bir yöntem kullanılmıştır. Hava sahası sektörlerinin iş yüklerinin dengelenebilmesi için de çok amaçlı karma tam sayılı bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir.

3 aşamadan oluşan bu tez çalışmasının ilk adımında Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanılarak hava sahası analiz aracı geliştirilmiş ve modelin uygulama bölgesi olarak seçilen Türk Hava Sahası, karelaj yöntemi ile 0,5° aralıklarla 471 eşit parçaya bölünmüştür. İkinci adımda her bir kare birimin ve toplam hava sahası iş yükünün ölçülmesi amacı ile yeni bir Hava Sahası İş Yükü Ölçüm Modeli geliştirilmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise sektör sınır tasarımını gerçekleştirebilmek üzere optimizasyon teorisi kullanılarak kümeleme algoritması ile optimum hava sahası sektörizasyonu için kontrolör iş yükü esasına dayanan bir model geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hava Sahası Sektörizasyonu, Hava Trafik Kontrolör İş Yükü, Hava Sahası Karmaşıklığı, Izgara Temelli Bölme Yöntemleri, Çok Amaçlı Optimizasyon Teorisi, Kümeleme Algoritması, Konik Skalerleştirme Yöntemi

Abstract

PhD Dissertation

A NEW SOLUTION APPROACH TO AIRSPACE SECTORIZATION PROBLEM

Kadriye YAMAN

Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Aviation Program

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hakan OKTAL
2010, 196 pages

As a result of the rapid development of the air transportation in recent years, the delays and congestion give rise to insufficient capacity in the Air Traffic Management System in many countries all over the world. In line with this, studies conducted in order to strike the capacity-demand balance became more important. Hence, the need for sectorization studies that would provide a more balanced distribution of the air traffic density has increased. Because of the dynamic structure of air transportation and the dependence of air traffic controller workload on many parameters and variables, the airspace sectorization is among the difficult and complicated problems.

In this study, through the analytical modeling approach which takes into account both the workload of air traffic controller and the complexity of the airspace which are the most important parts of the air traffic system, bringing a new dimension to the airspace sectorization problems has been aimed. In this context, a grid based method has been used in order to distribute evenly the air traffic controller workload to sectors. In order to balance the workload of the sectors, a multi-objective mixed integer optimization model has been developed.

In the first step of this PhD dissertation study, an airspace analysis tool has been developed by using Geographical Information Systems (GIS), and the Turkish Airspace, chosen as an application, has been divided into 471 parts of 0.5° separation and of equal areas by using a square grid. In the second step, an Airspace Workload Measurement Model has been developed in order to measure the workloads of each square unit and the workload of the total airspace. In the final step of the study, a model for optimum airspace sectorization based on the controller workload has been developed by using optimization theory and clustering algorithm in order to realize sector boundary determination.

Keywords: Airspace Sectorization, Air Traffic Controller Workload, Airspace Complexity, Grid-Based Partitioning Method, Multi-Objective Optimization Theory, Clustering Algorithm, Conic Scalarization Method

TEŞEKKÜR

Çalışmam süresince beni destekleyen, bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren hocalarım başta tez danışmanım Sayın Yard. Doç. Dr. Hakan OKTAL olmak üzere, Sayın Doç. Dr. Refail KASIMBEYLİ ve Sayın Doç. Dr. Aydan CAVCAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın hazırlanmasında değerli katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Can AYDAY'a, Sayın Yard. Doç. Dr. Alper GÖKSU'ya, Sayın Yard. Doç. Dr. Aydın SİPAHİOĞLU'na, Sayın Yard. Doç. Dr. Metin ALTAN'a, Sayın Yard. Doç. Dr. Gürkan ÖZTÜRK'e, Sayın Araş. Gör. Dr. Tuğba SARAÇ'a, Sayın Öğr. Grv. Ertan ÇINAR'a ve Sayın Araş. Grv. İçlem ER'e teşekkürlerimi sunarım.

Anket formunun hazırlanması aşamasında değerli katkı ve görüşlerinden dolayı Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Hava Trafik Kontrol Bölümü hocalarıma ve arkadaşlarıma, çalışmada kullanılan verilerin temininde yardımcı olan DHMİ yetkililerine ve anket çalışmasına katılarak görüşleri ile katkı sağlayan Ankara Yol Kontrol Merkezi'nde görev yapmakta olan hava trafik kontrolörlerine teşekkür ederim.

Yoğun çalışma temposu içerisinde bulunduğum zaman süresince beni anlayışla karşılayarak her zaman destekleyen sevgili aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Kadriye YAMAN

Eskişehir, 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **i**

ABSTRACT ..... **ii**

TEŞEKKÜR ..... **iii**

İÇİNDEKİLER ..... **iv**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiii**

KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xv**

SİMGELER DİZİNİ ..... **xviii**

1. GİRİŞ **1**

2. HAVA SAHASI SEKTÖRİZASYONU PROBLEMİ **5**

2.1. Hava Trafik Sistemi 5

2.2. Hava Trafik Yönetimi 6

2.2.1. Hava trafik hizmetleri 7

2.2.2. Hava trafik akış yönetimi 8

2.2.3. Hava sahası yönetimi 9

2.2.4. Hava trafik yönetim sisteminin kapasitesini kısıtlayan faktörler 12

2.2.4.1. Hava trafik kontrolör iş yükü modelleri literatür araştırması 14

2.2.4.2. Dinamik yoğunluk ve iş yükü ölçümü modelleri literatür araştırması 18

2.2.4.3. Hava trafik kontrolör iş yükü ölçüm modellerinin genel değerlendirmesi 30

2.3. Hava Sahası Sektörizasyonu 34

2.3.1. Hava sahası sektörizasyonu problemi literatür araştırması 36

2.3.1.1. İkili alan bölme 37

2.3.1.2. Üçgenleme yöntemleri 38

2.3.1.3. Izgara temelli yöntemler 44

2.3.2. Hava sahası sektörizasyon modellerinin genel değerlendirmesi 51

2.4. Tesis Yerleşim Problemleri 52

3. HAVA SAHASI SEKTÖRİZASYONU MATEMATİKSEL MODELİ 54

3.1. Araştırma Problemi 54
3.2. Araştırmanın Amacı 56
3.3. Araştırmanın Önemi 56
3.4. Araştırma Yöntemi 57
3.5. Hava Sahası Analiz Aracı 58
3.5.1. Coğrafi bilgi sistemleri (CBS) 59
3.5.2. Coğrafi bilgi sistemleri mantığı 61
3.5.3. CBS ile hava sahası analizi 62
3.5.3.1. CBS ile sorgulama ve analiz örnekleri 64
3.5.3.2. CBS ile uygulanan ızgara tabanlı bölme yaklaşımı 66
3.6. Toplam Hava Sahası İş Yükü Modeli 67
3.6.1. Trafik özellikleri ve görev zamanı esasına dayalı olarak geliştirilen toplam hava sahası iş yükü modeli 68
3.6.2. İş yükü ağırlık katsayılarının belirlenmesi 70
3.6.3. Anket sorularının ve formunun tasarlanması 71
3.6.4. Anketin uygulanması 72
3.6.5. Anketin cevaplanma ve güvenilirlik yüzdeleri 72
3.6.6. Anket verilerinin çözümlenmesinde kullanılan yöntem 73
3.6.7. Bulgular 73
3.6.7.1. Cinsiyetiniz 73
3.6.7.2. Yaşınız 74
3.6.7.3. En son mezun olduğunuz okul 74
3.6.7.4. Çalıştığınız birim 75
3.6.7.5. Kaç yıldır kontrolör olarak çalışıyorsunuz? 76
3.6.7.6. Çalışma pozisyonunuz 77
3.6.7.7. En çok hangi sektörde çalışıyorsunuz? 77
3.6.7.8. Çalıştığınız ACC sektöründe yoğun trafik periyodunda saatteki maksimum uçak sayısı nedir? 78

3.6.7.9. Çalıştığınız ACC sektöründe yoğun trafik periyodunda maksimum eş-zamanlı uçak sayısı nedir? 79
3.6.7.10. Sizce bir ACC kontrolörünün saatte kontrol edebileceği maksimum uçak sayısı nedir? 79
3.6.7.11. Sizce bir ACC kontrolörünün eş-zamanlı kontrol edebileceği maksimum uçak sayısı nedir? 80
3.6.7.12. Çalıştığınız sektörde bir uçak en fazla ne kadar süre uçmaktadır? 81
3.6.7.13. Sizce bir uçağın bir sektörde maksimum uçuş süresi ne kadar olmalıdır? 81
3.6.7.14. Kontrol faaliyetlerinin iş yükü önem derecesi 82
3.6.7.15. Farklı uçak hareketlerinin iş yüküne etkisi 86
3.6.7.16. Farklı uçak hareketleri için talimatları uygulama/uygulatma süreleri 89
3.6.7.17. Koordinasyon faaliyetlerinin iş yüküne etkisi 92
3.6.7.18. Koordinasyon faaliyetleri için ortalama süre 96
3.6.7.19. Çakışma tespit ve çözüm faaliyetlerinin iş yüküne etkisi 99
3.6.7.20. Çakışma tespit ve çözüm faaliyetleri için ortalama süre 103
3.6.8. Anket bulgularının genel değerlendirmesi 111
3.7. Hava Sahası Sektör Tasarımı Matematiksel Modeli 113
3.7.1. Kümeleme algoritması 114
3.7.2. Geliştirilen modelde kullanılan parametreler 115
3.7.2.1. Kare birim iş yükü 115
3.7.2.2. Sektör kapasitesi 116
3.7.2.3. Aday sektör merkez noktaları ve sektör sayısı 116
3.7.2.4. Mesafe 117
3.7.3. Kümeleme algoritması ile kare birimlerin gösteriminde kullanılan geometrik yaklaşım 118
3.7.4. Kümeleme algoritması ile sektör tasarımı matematiksel modeli 118
3.7.5. Çok amaçlı optimizasyon yöntemleri ve çözüm yaklaşımları 121
3.7.5.1. Skalerleştirme 122
3.7.5.2. Ağırlıklı toplam yöntemi 123

3.7.5.3. Konik skalerleştirme yöntemi 123

4. MODELİN TÜRK HAVA SAHASINDA UYGULANMASI 126

4.1. Türkiye Hava Sahası Mevcut Durumu 126

4.2. Geliştirilen Modelde Kullanılan Parametrelerin Hesaplanması 128

4.2.1. Sektör tasarım modelinde uçuş seviyelerinin belirlenmesi 128

4.2.2. Kare ızgara birim iş yükünün hesaplanmasında ilgili parametrelerin belirlenmesi 128

4.2.2.1. İzleme iş yükü parametrelerinin hesaplanması 129

4.2.2.2. Uçak hareket değişim iş yükü parametrelerinin hesaplanması 133

4.2.2.3. Koordinasyon iş yükü parametrelerinin hesaplanması 136

4.2.2.4. Uçaklar arası çakışma tespit ve çözüm iş yükü parametrelerinin hesaplanması 139

4.2.3. Sektör kapasitesinin belirlenmesi 141

4.2.4. Aday sektör merkez noktalarının ve sektör sayısının belirlenmesi 143

4.2.5. Çözüm yöntemi parametrelerinin belirlenmesi 145

4.3. Deneysel Çalışmalar 146

4.4. Modelin Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler 152

4.4.1. Algoritmanın performansının değerlendirilmesi 152

4.4.2. Çözüm yöntemi ve ilâve parametrelerinin değerlendirilmesi 152

4.4.3. Sektör kapasitesinin etkisinin değerlendirilmesi 154

5. SONUÇ ve ÖNERİLER 157

KAYNAKLAR 160

Ek-1. Kontrolör iş yükünü etkileyen karmaşıklık faktörleri literatür özeti 168

Ek-2. Veri toplama yöntemlerine göre literatür özeti 171

Ek-3. Karmaşıklık ve iş yükü ölçümünde kullanılan yöntemler 173

Ek-4. 2006-2007 yıllarında Türkiye'de aylara göre toplam trafik dağılımı ve artış oranları 174

Ek-5. 2007 yılı Ağustos ayı günlere göre trafik sayısı dağılımı.....175
Ek-6. Hava trafik kontrolör iş yükü değerlendirme anket formu.....176
Ek-7. 26 Ağustos 2007 tarihinde iki pik saatlik zaman diliminde gerçekleşen 2 dakikalık (13^{00}-13^{02}) uçuş verisi. 179
Ek-8. Uçak tiplerine göre ara irtifa değerlerine karşı gelen hız değerleri..181
Ek-9. Aday sektör merkez noktaları ve harf kodları.....186
Ek-10. Hava sahası sektör tasarım problemi toplam ağırlıklandırma yöntemi kodu 187
Ek-11. Hava sahası sektör tasarım problemi konik skalerleştirme yöntemi kodu 191
Ek-12. Çok amaçlı karma tam sayılı sektör tasarım matematiksel programlama modeli örnek analiz sonuçları.....195
Ek-13. Açılan optimum 6 sektör için Türkiye hava sahası detaylı yol haritası 196

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. Hava trafik sisteminin işleyişi 6
2.2. Kontrolör iş yükünü etkileyen faktörler 13
2.3. Hava trafik kontrolünde zihinsel ve fiziksel işlemler modeli 19
2.4. Kübik hava sahası 25
2.5. Kontrolörlerin duruma hâkimiyetini etkileyecek algı, kavrama ve tahmin gibi soyut kavramlar için yapısal olarak genelleştirilmiş bir öneri modeli ..26
2.6. Trafik özelliklerine göre modellerde kullanılan değişkenler 31
2.7. Sektör özelliklerine göre modellerde kullanılan değişkenler 31
2.8. Hem trafik hem de sektör karmaşıklığı açısından kontrolör iş yükü için ortak düşünülebilecek değişkenlerin kullanımı 32
2.9. Hava trafik karmaşıklığı ve iş yükü değerlendirmesi 33
2.10. İş yükü ve karmaşıklık ölçümünde çalışmalarda kullanılan çözüm ve değerlendirme yöntemleri 33
2.11. Regresyon eğrisi 35
2.12. İkili alan bölme işlemi 37
2.13. Voronoi diyagramı ve Delaunay üçgenlemesi 40
2.14. Hava yollarının kesişim açısı 42
2.15. Hava sahası sektörizayonu için iki aşamalı bir yaklaşım 44
2.16. Trafik kütlesinin 8 merkeze dağılımı 50
2.17. Üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü tesisler 52
3.1. Coğrafi Bilgi Sistemlerinin kavramsal çatısı 59
3.2. Türkiye yol hava sahası 63
3.3. CBS ile oluşturulan hava sahası modeli işlem basamakları 63
3.4. Pik zaman diliminde noktasal trafik dağılımı 64
3.5. Bir uçuş yörüngesi örneği 64
3.6. Zaman ve irtifaya bağlı farklı uçak yörüngelerinin izlenmesi örneği 65
3.7. Aynı zaman diliminde, aynı uçuş yörüngesinde, farklı irtifalarda gerçekleşen uçuşlar 65
3.8. Hava sahası için uygulanan karelaj işlemi 67
3.9. Katılımcıların cinsiyete göre dağılımı 73

3.10. Katılımcıların yaş gruplarına göre dağılımı 74
3.11. Katılımcıların eğitim durumlarına göre dağılımı 75
3.12. Katılımcıların çalıştığı birimlere göre dağılımı 76
3.13. Katılımcıların deneyimlerine göre dağılımı 76
3.14. Katılımcıların çalışma pozisyonlarına göre dağılımı 77
3.15. Katılımcıların en çok çalıştıkları sektörlere göre dağılımı 78
3.16. Yoğun trafik periyodunda saatteki maksimum uçak sayısı dağılımı 78
3.17. Yoğun trafik periyodunda saatteki eş zamanlı uçak sayısı dağılımı 79
3.18. Saatte kontrol edilebilecek maksimum uçak sayısı dağılımı 80
3.19. Saatte kontrol edilebilecek eş zamanlı maksimum uçak sayısı dağılımı 80
3.20. Bir uçağın sektörde en fazla uçuş süresi dağılımı 81
3.21. Bir uçağın sektörde uçması gereken en fazla uçuş süresi dağılımı 82
3.22. İzleme faaliyeti önem derecesi 83
3.23. Koordinasyon faaliyeti önem derecesi 83
3.24. Çakışma tespit ve çözüm faaliyeti önem derecesi 84
3.25. Uçak hareket değişim faaliyeti önem derecesi 85
3.26. Seviye değişikliğinin iş yüküne etkisi 86
3.27. Hız değişikliğinin iş yüküne etkisi 87
3.28. Uçuş başı değişikliğinin iş yüküne etkisi 87
3.29. Direkt rotanın iş yüküne etkisi 88
3.30. Uçuş başı değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süresi dağılımı 90
3.31. Hız değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süresi dağılımı 90
3.32. İrtifa değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süresi dağılımı 91
3.33. Direkt rota talimatı uygulama/uygulatma süresi dağılımı 91
3.34. Farklı uçak hareketi talimatlarını uygulama/uygulatma ortalama süreleri ... 92
3.35. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer sektörlerle koordinasyon faaliyetinin iş yüküne etki derecesi 93
3.36. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon faaliyetinin iş yüküne etki derecesi 93
3.37. Askeri birimlerle koordinasyon faaliyetinin iş yüküne etki derecesi 94
3.38. Farklı ACC birimleri ile koordinasyon faaliyetinin iş yüküne etki derecesi 95

3.39. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer sektörlerle koordinasyon süresi dağılımı 96
3.40. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon süresi dağılımı 97
3.41. Askeri ünitelerle koordinasyon süresi dağılımı 97
3.42. Komşu ACC birimleri ile koordinasyon süresi dağılımı 98
3.43. Kontrolörler yanıtlarına göre ortalama koordinasyon faaliyet süreleri 98
3.44. Aynı uçuş seviyesinde aynı yöndeki trafikler arasındaki çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi 99
3.45. Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerdeki trafikler arasında çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi 100
3.46. Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasında çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi 100
3.47. Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasında çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi 101
3.48. Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasında çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi 102
3.49. Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı 103
3.50. Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde trafikler arası çakışma çözüm süresi dağılımı 104
3.51. Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerde trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı 104
3.52. Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerde trafikler arası çakışma çakışma çözüm süresi dağılımı 105
3.53. Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı 106
3.54. Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma çözüm süresi dağılımı 106
3.55. Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı 107

3.56. Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma çözüm süresi dağılımı 107
3.57. Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı 108
3.58. Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma çözüm süresi dağılımı 109
3.59. Kontrolör yanıtlarına göre ortalama çakışma tespit süreleri 109
3.60. Kontrolör yanıtlarına göre ortalama çakışma çözüm süreleri 110
3.61. Kontrolör yanıtlarına göre ortalama çakışma tespit ve çözüm süreleri 110
3.62. Coğrafik koordinatların düzlemsel koordinatlara dönüşümü 117
3.63. Kare ızgara birimlerin gösterimi 118
4.1. Türkiye hava sahası yol sektörleri 127
4.2. Doğrusal interpolasyonun grafiksel gösterimi 130
4.3. Uçak çiftleri arası yakınlaşmaların hesaplanması için seçilen koruma alanı boyutları 139
4.4. Hava sahası trafik yoğunluğu 143
4.5. Seçilen aday sektör merkez noktaları 145
4.6. B_1=172.871, B_2=103427.215, B_3=2421.034 ile konik skalerleştirme kullanılarak hesaplanan yeni Pareto minimal noktalar 151
4.7. B_1=178.635, B_2=103409.005, B_3=2437.752 ile konik skalerleştirme kullanılarak hesaplanan yeni Pareto minimal noktalar 151
4.8. Hava sahası sektör tasarım modeli çözümü ile elde edilen Türkiye hava sahası sektörleri 156

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Sağlanan hava trafik hizmetlerine göre hava sahası sınıflandırması 11
3.1. Kontrol faaliyetlerinin iş yükü önem derecesi genel değerlendirmesi 85
3.2. Farklı uçak hareketi faaliyetlerinin iş yükü derecesi genel değerlendirmesi 89
3.3. Farklı koordinasyon faaliyetlerinin iş yükü derecesi genel değerlendirmesi 95
3.4. Çakışma tespit ve çözüm faaliyetlerinin iş yükü derecesi genel değerlendirmesi 102
3.5. İlgili kontrol faaliyeti ağırlık katsayıları 112
3.6. İlgili ortalama faaliyet ortalama süreleri 113
4.1. Uçuş profiline göre kare ızgara birim içerisinde izleme süresinin hesaplanması örneği 131
4.2. Kare ızgara birimler için maksimum izleme süresinin hesaplanması örneği 132
4.3. Farklı uçuş profilleri için uçak hareket değişimlerinin hesaplanması örneği 134
4.4. Kare ızgara birimler için farklı uçak hareketlerinin hesaplanması örneği 135
4.5. Farklı uçuş profilleri için koordinasyon faaliyetlerinin hesaplanması örneği 137
4.6. Kare ızgara birimler için koordinasyon faaliyetlerinin hesaplanması örneği 138
4.7. Uçaklar arası çakışma riskinin belirlenmesi örneği 140
4.8. Sektör referans kapasitesinin hesaplanması 142
4.9. Trafik analizi ve aday sektör merkezlerinin belirlenmesi 144
4.10. Toplam ağırlıklandırma yöntemi ile elde edilen sonuçlar 148
4.11. B_1=172.871, B_2=103427.215, B_3=2421.034 için konik skalerleştirme kullanılarak elde edilen sonuçlar 149
4.12. B_1=178.635, B_2=103409.005, B_3=2437.752 için konik skalerleştirme kullanılarak elde edilen sonuçlar 150

4.13. 4 Farklı ağırlık ve 2 farklı referans nokta çifti ile elde edilen
çözümlerde açılan sektörlere atanan kare birimlerdeki farklılıklar.....153

KISALTMALAR DİZİNİ

ACC : Saha Kontrol Merkezi
Area Control Centre

ACI : Uluslararası Havaalanları Konseyi
Airports Council International

AIS : Havacılık Bilgi Hizmeti
Aeronautical Information Services

AIP : Havacılık Enformasyon Yayını
Aeronautical Information Publication

APP : Yaklaşma Kontrol Merkezi/Hizmeti
Approach Control Service/Facility

ARTCC : Hava Trafik Yol Kontrol Merkezi
Air Route Traffic Control Centers

ATC : Hava Trafik Kontrol
Air Traffic Control

ATM : Hava Trafik Yönetimi
Air Traffic Management

ATWIT : Hava Trafik İş Yükü Girdi Tekniği
Air Traffic Workload Input Technique

BADA : Base of Aircraft Data

BSP : İkili Alan Bölme
Binary Space Partitions

CANAC : Bilgisayar Destekli Ulusal ATC Merkezi
Computer Assisted National ATC Center

CBS : Coğrafi Bilgi Sistemleri

CDI : Kontrol Güçlüğü İndeksi
Control Difficulty Index

CIM : Kapasite Göstergeleri Modeli
Capacity Indicators Model

CNS : Haberleşme, Seyrüsefer, İzleme
Communication, Navigation, Surveillance

DEL : Dinamik Yük Faktörü
Dynamic Element of Load

DEW : Dinamik İş Faktörü
Dynamic Element of Work

DHMİ : Devlet Hava Meydanları İşletmesi

DME : Distance Measuring Equipment
Mesafe Ölçüm Cihazı

Enb : En büyükleme

Enk : En küçükleme

FIC : Uçuş Bilgi Merkezi
Flight Information Center

FIR : Uçuş Bilgi Bölgesi
Flight Information Region

GAMS : General Algebraic Modelling System

IFR : Aletli Uçuş Kuralları
Instrument Flight Rules

Min : Minimize

MST : Örten Ağaç Algoritması
Minimum Spanning Tree

NAS : Ulusal Hava Sahası Sistemi
National Airspace System

PHARE : Eurocontrol'ün ATM Harmonizasyon Programı
Program for Harmonised ATM Research in Eurocontrol

POWER : Performans ve Objektif İş Yükü Değerlendirme Araştırması
Performance and Objective Workload Evaluation Research

PUMA : ATM'de Performans ve Elverişlilik Modelleme
Performance and Usability Modelling in ATM

RAMS : Yeniden Düzenlenmiş ATC Matematiksel Simülatörü
Reorganized ATC Mathematical Simulator

SAAM : Makroskopik Seviyede Trafik Tahsis ve Analiz Sistemi
System for Traffic Assignment & Analysis at Macroscopic Level

SDAT	: Sektör Tasarımı Analiz Aracı Sector Design Analysis Tool
SID	: Standart Aletli Kalkış Standard Instrument Departure
SMART	: Türkiye'deki ATM Kaynaklarının Sistematik Modernizasyonu Systematic Modernisation of ATM Resources in Turkey
STAR	: Standart Terminal Geliş Standard Terminal Arrival
TAAM	: Toplam Hava Sahası ve Havaalanı Modelleme Total Airspace and Airport Modelling
TAS	: Gerçek Hava Hızı True Air Speed
VFR	: Görerek Uçuş Kuralları Visual Flight Rules
VOR	: Çok Yüksek Frekanslı Omni Directional Range Çok Yüksek Frekanslı Her Yönde Yayın Yapan Verici

SİMGELER DİZİNİ

B_1 : Birinci amaç için referans noktası

B_2 : İkinci amaç için referans noktası

B_3 : Üçüncü amaç için referans noktası

C_{C1} : Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde uçan trafikler arasındaki çakışmalar için ağırlık katsayısı

C_{C2} : Aynı uçuş seviyesinde kesişen yöndeki trafikler arasındaki çakışmalar için ağırlık katsayısı

C_{C3} : Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmalar için ağırlık katsayısı

C_{C4} : Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmalar için ağırlık katsayısı

C_{C5} : Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmalar için ağırlık katsayısı

C_{H1} : Uçakların tırmanması veya alçalması için verilen talimatla ilgili faaliyet ağırlık katsayısı

C_{H2} : Hız değişikliği talimatı ağırlık katsayısı

C_{H3} : Uçuş başı değişikliği talimatı ağırlık katsayısı

C_{H4} : Direkt rota talimatı ağırlık katsayısı

C_{K1} : Aynı ACC birimi içerisindeki sektörler arası koordinasyon faaliyeti ağırlık katsayısı

C_{K2} : Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon faaliyeti ağırlık katsayısı

C_{K3} : Askeri ünitelerle koordinasyon faaliyeti ağırlık katsayısı

C_{K4} : Komşu ACC birimleri ile koordinasyon faaliyeti ağırlık katsayısı

d_i^j : Her bir kare birim ve aday sektör merkez noktası arasındaki mesafe

D_j : Sektör mesafesi

F_C : Çakışma tespit ve çözüm faaliyeti ağırlık katsayısı

F_H : Uçak hareket değişim faaliyeti ağırlık katsayısı

$F_İ$: İzleme faaliyeti ağırlık katsayısı

F_K : Koordinasyon faaliyeti ağırlık katsayısı

m : Potansiyel sektör sayısı

n	: Kare birim sayısı
N	: Sektörden geçen uçak sayısı
N_{C1}	: Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde çakışan uçak çifti sayısı
N_{C2}	: Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönde çakışan uçak çifti sayısı
N_{C3}	: Aynı yönde tırmanma veya alçalma durumunda çakışan uçak çifti sayısı
N_{C4}	: Kesişen yönde tırmanma veya alçalma durumunda çakışan uçak çifti sayısı
N_{C5}	: Karşı yönlü tırmanma veya alçalma durumunda çakışan uçak çifti sayısı
N_{H1}	: Seviye değişikliği yapan uçak sayısı
N_{H2}	: Hız değişikliği yapan uçak sayısı
N_{H3}	: Uçuş başı değişikliği yapan uçak sayısı
N_{H4}	: Direkt rotada uçan uçak sayısı
N_i	: Kare birimler için komşuluk kümesi
N_{K1}	: Aynı ACC birimi içerisinde sektörler arası geçiş yapan uçak sayısı
N_{K2}	: Aynı ACC birimi içerisinde diğer ATC birimleri ile koordinasyon gerektiren uçak sayısı
N_{K3}	: Askeri ünite koordinasyonu gerektiren uçak sayısı
N_{K4}	: Komşu ACC birimleri ile koordinasyon gerektiren uçak sayısı
S	: Açılacak sektör sayısı
T	: Maksimum uçuş süresi
T_{CS1}	: Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde uçan trafikler arasındaki çakışmaları tespit ve çözüm süresi
T_{CS2}	: Aynı uçuş seviyesinde kesişen yöndeki trafikler arasındaki çakışmaları tespit ve çözüm süresi
T_{CS3}	: Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmaları tespit ve çözüm süresi
T_{CS4}	: Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmaları tespit ve çözüm süresi
T_{CS5}	: Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmaları tespit ve çözüm süresi

T_{HS1} : Uçaklar için seviye değişikliği talimatı süresi

T_{HS2} : Hız değişikliği talimatı süresi

T_{HS3} : Uçuş başı değişikliği talimatı süresi

T_{HS4} : Direkt rota talimatı süresi

T_{KS1} : Aynı ACC birimi içerisinde sektörler arası koordinasyon faaliyeti süresi

T_{KS2} : Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon faaliyeti süresi

T_{KS3} : Askeri ünitelerle koordinasyon faaliyeti süresi

T_{KS4} : Komşu ACC birimleri ile koordinasyon faaliyeti süresi

W_{CTC} : Çakışma tespit ve çözüm iş yükü

W_H : Uçak hareket değişim iş yükü

W_I : İzleme iş yükü

W_K : Koordinasyon iş yükü

w_1, w_2, w_3 : Pozitif ağırlıklar

wl_i : Kare birim iş yükü

wl^j : Sektör iş yükü

WLT : Sektör iş yükü

α : Koni parametresi

x_i^j : Kare birim atama karar değişkeni (0/1)

y_j : Sektör açma karar değişkeni (0/1)

$\sum$: Toplam işareti

Alt ve üst indisler

i : Kare birim indisi

j : Sektör indisi

1. GİRİŞ

Dünya ticaret ve turizminin gelişmesine önemli katkı sağlayan, milyonlarca kişiye iş imkânı yaratan, uzun mesafeli taşımacılıkta neredeyse rakipsiz olan hava taşımacılığı, bir ülkenin, bir bölgenin veya bir şehrin başta ekonomisi olmak üzere kültürel ve sosyal gelişiminde önemli rol oynamaktadır [1].

Hava taşımacılığı, hızla gelişen teknoloji karşısında kısa sürede gelişim gösteren bir sektördür. Özellikle 1980'li yıllardan sonra hem A.B.D'nin hem de dünya ekonomisinin gelişiminin, hava taşımacılığına olan talep üzerinde etkisi çok fazla olmuştur [2].

Havayolu ile yolcu ve yük taşımacılığı, sosyal ve ekonomik yönden küreselleşmenin en önemli bileşenlerindendir. 20. Yüzyılda ciddi bir gelişim gösteren havayolu taşımacılığı istihdam yaratmada önemli sektörlerden biri durumuna gelmiştir. Küresel ticaretin gelişimini hızlandırmış, seyahat ve turizm açısından yeni pazarlar ve fırsatlar sunulmasında katkılar sağlanmıştır. Teknolojik gelişmeler sonucu hava taşımacılığında kullanılan uçakların hızı, menzili ve güvenilirliklerinin artması; insanların refah seviyelerinin yükselmesi ile tatil için daha fazla harcama yapabilmeleri; farklı kültürleri tanıma istekleri doğrultusunda uzak noktalar ve kıtalararası turizmde yaşanan gelişmeler; talep ve rekabetin artması sonucu oluşan bilet fiyatlarındaki düşüşler; çok uluslu şirketlerin oluşturduğu ticari ağlar, yolcu ve yükün taşınmasında havayolu taşımacılığının payı ve önemini arttırmıştır [1].

Dünya hava taşımacılığının geçtiğimiz 35 yıldaki gelişimine bakıldığında 1991, 2001 ve 2002 yılları hariç sürekli büyüme eğiliminde olduğu görülmektedir. 20. Yüzyılın son çeyreğinde yolcu trafiğinin yılda ortalama % 4 arttığı göz önüne alındığında, bu dönemde yolcu trafiğinin ikiye katlandığı görülmektedir. Gelecek 20 yılda da dünya genelinde hızlı büyümenin devam edeceği öngörülmektedir [1].

Hava taşımacılığında yaşanan hızlı gelişim, hava trafik kontrolünün önemini her geçen gün daha fazla arttırmaktadır. Günümüzde diğer üretim sistemlerinde olduğu gibi hava trafik yönetim sisteminin de en temel konusu kapasitedir. Hava trafik sisteminin kapasitesi; belirli bir periyotta (saatlik, günlük,

aylık, yıllık gibi) kontrolör iş yükü belirli bir seviyede tutulurken, kontrolör tarafından emniyetli bir şekilde yönetilecek maksimum uçak sayısı ile tanımlanmaktadır [3]. Ancak her geçen gün artan trafik miktarı, sistem kapasitesinin etkili bir biçimde kullanılmasını engellemektedir. Bu anlamda kapasiteyi kısıtlayan en temel faktörler, hava sahası limitleri ve kontrolör iş yüküdür [4]. "Tıkanıklık" ve "Gecikme" gibi kavramlar ise hava taşımacılığının bugünkü durumunu en iyi tanımlayan kelimelerdir. Bu problemler, dünyanın hemen her yerinde hem ticari hava taşıyıcılarının hem de hava trafik kontrol otoritelerinin karşı karşıya kaldığı problemleri daha da artırmaktadır [5].

Hava trafiğinin her geçen gün artış göstermesi, araştırmacıları kapasite sınırlarına ulaşmış bir hava sahasında emniyet en azından mevcut seviyelerde korunurken, artan uçak sayısı ile nasıl uyum sağlanabileceği ve gecikmelerin azaltılmasıyla hava trafik hizmetlerinin verimliliğinin nasıl artırılabileceği konularına yönlendirmektedir [6]. Bu nedenle günümüzde mevcut hava sahası problemlerini çözmek ve öngörülen talebi karşılamak üzere acil önlemlere gerek duyulmaktadır [5]. Bu konuda yapılan araştırmalar sistem seviyesinde değerlendirildiğinde hava trafik akış yönetimi ve hava sahası araştırmaları olarak gruplandırıldığı görülmektedir. Hava sahası araştırmaları konusunda yapılan çalışmalar, genel olarak hava sahası kapasitesi ve sektörizasyon, serbest uçuş, akış optimizasyonu, çarpışma tespit-çözüm ve otomasyon gibi çeşitli konularda halen devam etmektedir [7].

Sektörizasyon, kapasite miktarının belirlenmesinde ve toplam kontrol görevlerinin yönetilebilir düzeyde alt bölümlere ayrılmasında bir araç olarak görülmektedir. Halen hava trafik yönetim kapasitesindeki hava sahası limitleri ve kontrolör iş yükü gibi temel kısıtların üstesinden gelebilmek üzere uygulanan en klasik yöntem, daha fazla sektör sağlamaktır. Bu işlem, herhangi bir zaman ve frekanstaki uçak sayısını ve kesişen yolları azaltmak üzere ya ilave sektör sağlayarak ya da sektörü yeniden boyutlandırarak hava sahası hacminin küçültülmesi şeklindedir. Bu sayede kapasitede artış sağlayarak, iş yükü azaltılmaya çalışılmaktadır [4].

Sektörlerin kendi içerisinde alt sektörlere ayrılması ise gerçekte sınırlı bir stratejidir. Son günlerde pek çok sektör yeterince alt sektöre bölünmüş

durumdadır. Ayrıca kapasite artışı, mevcut sektörlerin sayısı ile orantılı değildir. Bu nedenle sektör verimliliğini ve kapasiteyi arttırmak üzere daha etkili yöntemler üzerinde durulmaktadır. Bu da sadece trafiğin değil aynı zamanda kontrolör iş yükünün de farklı sektörler içerisinde daha dengeli olmasının sağlanması, dolayısıyla hava sahası karmaşıklığının azaltılmasıyla gerçekleştirilmiş olacaktır. Bu doğrultuda hava trafik kontrol sisteminin kapasitesini emniyetli bir şekilde arttırabilmek amacıyla yeni prosedürlere gereksinim duyulmaktadır [4].

Bu çalışmada temel olarak kontrolör iş yükü esasına dayanan hava sahası sektörizasyon problemlerine yeni bir boyut kazandırılması amaçlanmış, bu kapsamda hava trafik kontrolörler iş yükünü etkileyen faktörler ve hava sahası sektör tasarımında kullanılan geometrilerin sektörizasyon problemi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Altıgen yapıların kullanıldığı ızgara temelli sektör sınır tasarım modellerinden yola çıkılarak, karelaj yöntemi ile farklı bir geometrik tasarım yaklaşımı önerilmiştir. Geliştirilen "Toplam Hava Sahası İş Yükü Modeli" ile kontrolör iş yükü ölçümü için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Yeni bir amaç ve kısıt fonksiyonu geliştirilerek mevcut modelin amaç ve kısıt fonksiyonları ile birlikte kullanılmıştır. Bu çalışma ile çok amaçlı karma tam sayılı yeni bir model önerilmiştir.

Modelin uygulaması, Türkiye hava sahası için yapılmıştır. Çalışmada Devlet Hava Meydanları İşletmesi'nden temin edilen 2007 yılının en yoğun ayı olan Ağustos ayı uçuş verileri kullanılmıştır. Verilerin analizinde bu çalışma kapsamında Geomedia 6.0 Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımı kullanılarak geliştirilen hava sahası analiz aracı ve simülasyon programı kullanılmıştır. Toplam hava sahası iş yükü modelinde gerekli olan ağırlık katsayıları, Ankara Yol Kontrol Merkezi'nde operasyonel olarak çalışan yol kontrolörlerine uygulanan anket çalışması ile belirlenmiştir.

Günümüzde gerek Amerika'da gerekse Avrupa'da hava trafik yönetim problemlerinin çözümünde yöneylem araştırması teknikleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak kontrolör iş yükü esasına dayanan sektörizasyon problemleri incelendiğinde bu alanda yapılan akademik çalışmaların azlığı ve var olanlarının da sınırlılıkları dikkati çekmektedir. Türkiye'de ise, bu tür problemlerin yöneylem araştırması teknikleri ile çözümünde mevcut bir akademik

çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle gerçekleştirilen tez çalışmasının, bu konuda yapılan araştırmalara yeni bir alternatif oluşturacağı, geliştirilen modelin uygulamasının Türk hava sahası üzerinde yapılmasının Türk hava taşımacılığının ve hava trafik sisteminin gelişimine önemli katkılar sağlayacağı, ayrıca bu alanda çalışacak kişilere gerekli alt yapıyı oluşturmalarında rehberlik edeceği düşünülmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümde hava trafik sistemi ve yönetimi hakkında genel bilgiler verildikten sonra bugüne kadar yapılmış olan hava trafik kontrolör iş yükü ölçüm modelleri ve hava sahası sektörizasyon modelleri incelenmiştir. Hava sahası sektörizasyonu modelinin oluşumunda temel yaklaşım olarak ele alınan tesis yerleşim problemlerinin genel çerçevesi de yine bu bölümde yer almaktadır.

Izgara temelli bölme yaklaşımı uygulanarak karelaj yöntemi ile ele alınan ve kümeleme algoritması kullanılarak çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal programlama modeli olarak geliştirilen hava sahası sektörizasyon modeli ve paralelinde geliştirilen hava sahası analiz aracı ile hava trafik kontrolör iş yükü modelleri çalışmanın üçüncü bölümünde sunulmuştur.

Hava sahası sektörizasyon modelinin toplam ağırlıklandırma ve konik skalerleştirme yöntemleri ile örnek uygulamasından elde edilen çözüm sonuçları ve yorumları çalışmanın dördüncü bölümünde verilmiştir.

Çalışmanın son bölümde ise yapılan analizler çerçevesinde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecekte bu konu ile ilgili gerçekleştirilecek araştırmalara yön verebilecek öneriler sunulmuştur.

2. HAVA SAHASI SEKTÖRİZASYONU PROBLEMİ

Hava sahaları, hava trafik kontrolörlerinin iş yükünü azaltmak veya belirli bir düzeyde tutmak amacıyla kendi içerisinde sektör adı verilen kısımlara ayrılmıştır. Sektör; içerisinde çok sayıda hava yolu, hava meydanı, seyrüsefer yardımcısı ve aynı zamanda irtifa sınırı da olabilen coğrafi olarak tanımlanmış bir hava sahası parçasıdır [8].

Hava sahası sektörizasyonunun amacı, artan hava trafik yönetim kapasitesi için uygun metodlar kullanarak en iyi hava sahası konfigürasyonunu geliştirmektir [9]. En iyi hava sahası; içinde seyahat eden uçakların havadaki beklemelerinin minimum olduğu, seyahati sırasında minimum yakıt sarf edebileceği yolu ve uçuş irtifasını kullandığı, diğer uçaklarla çarpışma tehlikesinin en az olduğu, mevcut ve uzun vadeli trafik talebine yeterli olan ve kontrolünde çalışan hava trafik kontrolörlerinin iş yükünün en az olduğu hava sahası olarak tanımlanmaktadır [8].

Çalışmanın amacı kapsamında literatür araştırması, *hava trafik kontrolör iş yükü* ve *hava sahası sektörizasyonu modelleri* konularında ayrı başlıklar altında incelenmiştir. Hava sahası sektörizasyon modelinin geliştirilmesinde esas alınan tesis yerleşim problemlerinin genel çerçevesi yine bu bölümde yer almaktadır.

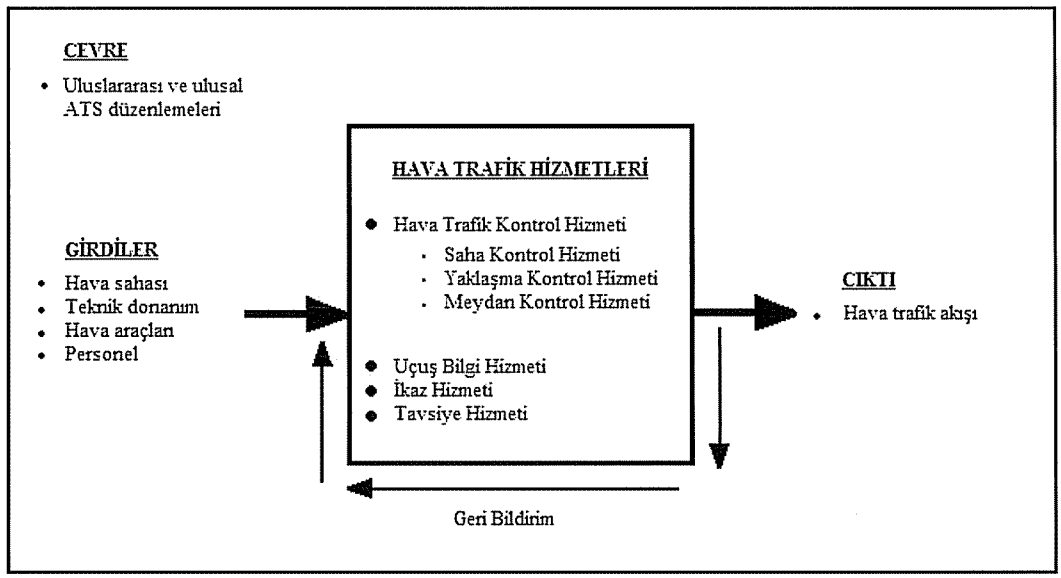
Çalışmanın bu bölümünde hava trafik sistemi ve yönetimi, hava trafik kontrolör iş yükü, hava sahası sektörizasyonu gibi temel kavramlar hakkında genel bilgi verildikten sonra bugüne kadar yapılan çalışmalara değinilmiştir.

2.1. Hava Trafik Sistemi

Hava trafiğinin kontrolü, 1930'lu yılların başlarında hava alanları civarında karşılaşılan hava trafiği tıkanıklığı problemine çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Havacılıktaki teknolojik gelişmeler ve uçak trafiğindeki artış sonucunda hava trafik sistemi meydana gelmiştir [10].

Hava trafik kontrol sistemi hava sahası, teknik donanım, hava araçları, insan ve usullerden oluşmuş karmaşık bir insan-makine sistemi olup, hava ulaştırması sisteminin önemli bir alt sistemidir [11]. Üretilen hizmetler "hava trafik hizmetleri" olarak adlandırılır.

Şekil 2.1'de girdi-süreç-çıktı akışı açısından hava trafik sisteminin işleyişi gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Hava trafik sisteminin işleyişi [10].

Şekilde de görüldüğü gibi hava trafik sisteminin girdileri; hava sahası, teknik donanım, hava araçları ve insan gücüdür. Süreç aşamasında bu girdiler bir araya getirilerek gerekli, hava trafik işlemleri yürütülür. Başka bir ifadeyle, süreç aşamasında hava trafik hizmetleri üretilir. Böylece hava trafiği düzenlenir, yani trafik akışı sağlanır. Dolayısıyla bu sistemin çıktısı hava trafik akışıdır.

Verilen hava trafik izinlerinin uçak tarafından doğru bir şekilde alınıp alınmadığının kontrol edilmesi ve belirli zaman aralıkları için verilebilecek hava trafik hizmeti yani sistem kapasitesi ile verilmiş olan hizmetin karşılaştırılması geri bildirim, uluslararası ve ulusal hava trafik hizmetleri düzenlemeleri ise hava trafik sisteminin çevresidir [10].

2.2. Hava Trafik Yönetimi

Günümüzde hava taşımacılığındaki hızlı gelişim hava trafik kontrolünün de önemini arttırmıştır. Hava trafik kontrolörleri tarafından verilen hizmetler daha karmaşık hale gelmiştir. Bütün teknolojik gelişmelere rağmen hava trafiğindeki tıkanıklık problemi günümüzde de hava trafik sisteminin ana problemi olmaya

devam etmektedir. Bunun sonucu olarak yeni hizmetler, yeni tanımlar ve yeni bir terminoloji yaratılmıştır [10,12] .

Hava trafik yönetimi, uçakların uçuşu sırasında maliyet ve gecikmeleri en aza indirirken emniyeti de temin eden kolaylıkların bir birleşimidir [8]. Hava trafik yönetimi kavramı ile hava trafik hizmetleri, hava trafik akış yönetimi, hava sahası yönetimi ve uçuş operasyonlarını içeren geniş çapta bir yönetimden söz edilmektedir [13].

2.2.1. Hava trafik hizmetleri

Gerek bir havaalanı üzerinde hareket eden, gerek bir havaalanına inişe geçen ve gerekse de hava yollarında sürekli hareket halinde olan hava araçları tek bir merkezden aynı kurallara bağlı kalmak şartıyla hava trafik hizmeti alırlar [10].

Hava trafik hizmetlerinin amaçları:

- Uçaklar arasındaki çarpışmaları engellemek,
- Manevra sahasındaki uçakların o sahadaki engellerle çarpışmasını önlemek,
- Düzenli trafik akışını sürdürmek ve hızlandırmak,
- Uçuşların emniyetli ve etkin bir şekilde idaresi için faydalı tavsiye ve bilgileri sağlamak,
- Arama ve kurtarma yardımına ihtiyaç duyan uçaklar için ilgili kuruluşları haberdar etmek ve gerektiğinde bu kuruluşlara yardımcı olmak,

şeklinde tanımlanmaktadır [14].

Hava trafik hizmetleri; hava trafik kontrol, uçuş bilgi ve ikaz hizmeti olmak üzere 3 şekilde verilmektedir.

Hava trafik kontrol hizmeti: Uçaklar arasında ve manevra sahası üzerindeki uçaklarla manialar arasında çarpışmaları önlemek, hava trafiğinin akışını düzenli bir şekilde hızlandırmak ve bunu devam ettirmek amaçlarıyla verilen bir hizmettir [14]. Hava trafik kontrol hizmetinde uçakların uçuş yörüngelerine bağlı olarak üç farklı hizmet verilir. Bu hizmetler; meydan kontrol hizmeti, yaklaşma kontrol hizmeti ve saha kontrol hizmetidir [11].

- Saha kontrol hizmeti: Uçaklar arasındaki çarpışmaları önlemek, düzgün trafik akışını devam ettirmek ve hızlandırmak amacıyla kontrollü uçaklara Uçuş Bilgi Bölgesi (FIR- Flight Information Region) içindeki hava yollarında verilen hava trafik kontrol hizmetidir.
- Yaklaşma kontrol hizmeti: Uçaklar arasındaki çarpışmaları önlemek, düzgün bir trafik akışı devam ettirmek ve hızlandırmak amacıyla kontrollü uçakların iniş kalkış ile ilgili bölümlerine terminal kontrol sahası içerisinde verilen hava trafik kontrol hizmetidir.
- Meydan kontrol hizmeti: Bir meydanın çevresindeki meydan turunda olan, manevra sahası üzerinde hareket eden, iniş ve kalkış yapan uçaklar ile araçlardan oluşan meydan trafiği için hava trafik kontrol hizmetidir.

Uçuş bilgi hizmeti: Uçuşların verimli ve güvenli bir şekilde yapılabilmesi için yararlı bilgi ve tavsiye vermek amacıyla sağlanan bir hizmettir.

İkaz hizmeti: Arama ve kurtarma hizmetine ihtiyaç duyan uçaklar için ilgili kuruluşlara bilgi vermek ve bu kuruluşların talebi halinde yardım etmek üzere sağlanan bir hizmettir [14].

2.2.2. Hava trafik akış yönetimi

Hava trafiğinin kontrolündeki problemlerin çözümü için oluşturulan, hava trafik yönetiminin bir alt bölümüdür [10]. Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı (ICAO-International Civil Aviation Organization) terminolojisine göre hava trafik akış yönetimi, akış ve kapasite yönetimi olarak tanımlanmaktadır. Hava trafik yapısının verimliliğini ve esnekliğini en üst düzeye getirmek için hava trafik kontrol servislerine destek sağlar [12].

Hava trafik sisteminde verimli bir hizmet sunumu için talep-kapasite dengesinin sağlanması gerekmektedir. Emniyetli, verimli ve ekonomik bir hizmet sunumu için de yoğun trafik talebi karşısında hava trafik sisteminin kapasitesi önem kazanmaktadır [10]. Kapasite, hava trafik servislerinin rota yapıları, hava sahasını kullanan uçakların seyrüsefer doğruluğu, meteoroloji ile ilgili faktörler ve kontrolörlerin iş yükünü kapsamaktadır [12].

Hava trafik kontrol kapasitesi, belirli bir periyot veya zaman içinde bir hava sahasına veya havaalanına gelebilecek maksimum uçak sayısıdır. Kapasitenin ölçütü bir saat içerisindeki güvenli bir şekilde ilgilenilebilecek trafik akışıdır. Bu ölçüt saatlik olabileceği gibi günlük, aylık veya belirli bir periyot için olabilir. Kapasite değerlendirilirken aşağıdaki ölçütler göz önünde bulundurulur:

- İlgili hava trafik hizmetinin seviyesi ve tipi,
- Kontrol bölgesinin yapısal karmaşıklığı ve kontrol sektörleri veya içerdiği havaalanları,
- Kontrolör iş yükü,
- Karşılıklı haberleşme tipleri, seyrüsefer ve izleme sistemlerinin kullanımı, bu sistemlerin teknik yapabilirliği ve kullanılabilirliği ile beraberindeki yedek sistemler ve prosedürlerin kullanılabilirliği,
- Hava trafik kontrol sistemi içindeki kontrolöre yardım ve alarm veren fonksiyonlar,
- Kontrolör iş yükünü etkileyen ve konuyla ilgili olacağına inanılan diğer faktörler.

Hava trafik akış yönetiminin amacı, hava trafik akış yönetimi bölgesinde talep aşıldığında veya kullanılan kapasitenin talebi karşılayamayacağı tahmin edildiğinde hava trafiğinde en uygun akışı sağlamaktır [12].

Bugün Avrupa ve Amerika'daki uçuş operasyonları karşılaştırıldığında kullanılan hava trafik akış yönetim tekniklerinde bir takım farklılıklar olmasına rağmen, her iki ortamda da özellikle birbirine yakın havaalanlarının hava sahalarında problemler yaşandığı görülmektedir. Halen kabul edilebilir kapasite limitleri içerisinde trafik akışının sağlanabilmesi için kalkış veya iniş öncesi kısıtlara bağlı olarak gecikmeler kabul edilmekte ve kontrolörler tarafından trafik akışını geciktirme, dikey veya coğrafi olarak dinamik yeni yol belirleme, sıralama ve uçuş seviyesi tahsisi gibi çeşitli uygulamalar gerçekleştirilmektedir [15].

2.2.3. Hava sahası yönetimi

Hava sahası yönetimi, hava trafik yönetiminin önemli bir bölümüdür. Bu kavram iki önemli unsurdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki haberleşme, seyrüsefer

ve izleme için hava trafik yönetim gereksinimlerinin hava sahasına uygun olarak belirlenmesidir. Diğeri ise yapısal planlamadır [13].

Genel anlamıyla hava sahası yönetimi, sistemin planlanmasıyla ilgili problemleri çözümlemek amacıyla oluşturulmuş hava trafik yönetiminin bir alt bölümüdür. Kısaca hava sahası yapısının tasarlanmasını ve sektörleme işlemini içerir [8].

En basit hava sahası bölümlenmesi, kontrollü ve kontrolsüz hava sahaları veya yüksek ve alçak hava sahaları şeklinde yapılır. Uluslararası anlaşmalara göre hava sahası sınıflandırılmasında A'dan E'ye kadar olan hava sahaları kontrollü, F ve G harf koduyla başlayan hava sahaları da kontrolsüz hava sahalarıdır. Bu hava sahaları Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi tanımlanmaktadır [14].

Bir hava sahası tasarlanırken, havaalanından başlayarak hava yoluna doğru bir tanımlama yapılır:

Havaalanı: Kısmen veya tamamen uçakların iniş, kalkış ve harekâtı için karada veya suda tesis edilmiş (binalar, tesisler, seyrüsefer cihazları vb) bir sahadır.

Kontrol Bölgesi: Yerden yukarı doğru belirli bir üst limite kadar uzanan kontrollü bir hava sahasıdır.

Havayolu: Radyo seyrüsefer yardımcılarıyla donatılmış bir koridor şeklinde tesis edilen kontrollü bir saha veya kontrollü sahanın bir bölümüdür.

Yüksek Hava Sahası: Genellikle FL 245 ile FL 660 seviyeleri arasında özel kurallı yolları içeren yüksek havayolları bulunmaktadır. Bu tip hava sahaları çoğu kez alçak hava sahalarını sıralamak için kullanılır.

Kontrol Sahası: Yerden belirli bir yükseklikten itibaren yukarı doğru uzanan kontrollü hava sahasıdır.

Kontrollü Hava Sahası: A, B, C, D ve E sınıflı hava trafik hizmet sahalarını kapsayan genel bir terimdir.

Uçuş Bilgi Bölgesi: İçerisinde uçuş bilgi ve ikaz hizmetinin sağlandığı ölçüleri belirli hava sahasıdır.

Tavsiyeli Hava Sahası: Tavsiyeli sahalar veya tavsiyeli yollar olmak üzere farklı anlamlarda kullanılan genel bir terimdir.

- Tavsiyeli Saha: Bir uçuş bilgi bölgesinde olup içerisinde hava trafik

tavsiye hizmetlerinin mevcut bulunduğu belirli bir sahadır.

- Tavsiyeli Yol: Bir uçuş bilgi bölgesinde olup içerisinde hava trafik tavsiye hizmetlerinin mevcut bulunduğu belirli bir yoldur.

Özel Kurallı Hava Sahası: Askeri çalışma bölgeleri, nispeten yoğun havaalanları, tehlikeli ve yasak sahalarda farklı kurallar uygulanabilmektedir. Uygulanan kurallar ulusal Havacılık Enformasyon Yayınları (AIP-Aeronautical Information Publication)' nda yayınlanmaktadır [12].

Çizelge 2.1. Sağlanan hava trafik hizmetlerine göre hava sahası sınıflandırması [14].

Sınıf	Uçuş Tipi	Ayırma	Hizmet	Hız Limiti	Radyo Haberleşme Gereksinimi	HTK Kleransı
A	Sadece IFR	Tüm uçaklara	Hava trafik kontrol hizmeti	Uygulanmamaktadır	İki yönlü sürekli	Var
B	IFR	Tüm uçaklara	Hava trafik kontrol hizmeti	Uygulanmamaktadır	İki yönlü sürekli	Var
	VFR	Tüm uçaklara	Hava trafik kontrol hizmeti	Uygulanmamaktadır	İki yönlü sürekli	Var
C	IFR	IFR'dan IFR'a VFR'dan IFR'a	Hava trafik kontrol hizmeti	Uygulanmamaktadır	İki yönlü sürekli	Var
	VFR	IFR'dan VFR'a	1.IFR'dan ayırma için HTK hizmeti 2.VFR/VFR trafik bilgisi	3050 m (10000 ft) AMSL'nin altında 250 knot IAS	İki yönlü sürekli	Var
D	IFR	IFR'dan IFR'a	Hava trafik kontrol hizmeti, VFR uçuşlar hakkında trafik bilgisi	3050 m (10000 ft) AMSL'nin altında 250 knot IAS	İki yönlü sürekli	Var
	VFR	Tanımsız	IFR/VFR ve VFR/VFR trafik bilgisi	3050 m (10000 ft) AMSL'nin altında 250 knot IAS	İki yönlü sürekli	Var
E	IFR	IFR'dan IFR'a	Hava trafik kontrol hizmeti ve mümkün olduğunca VFR uçuşlar hakkında trafik bilgisi	3050 m (10000 ft) AMSL'nin altında 250 knot IAS	İki yönlü sürekli	Var
	VFR	Tanımsız	mümkün olduğunca trafik bilgisi	3050 m (10000 ft) AMSL'nin altında 250 knot IAS	Yok	Yok
F	IFR	IFR'dan IFR'a	Hava trafik tavsiye hizmeti ; uçuş bilgi hizmeti	3050 m (10000 ft) AMSL'nin altında 250 knot IAS	İki yönlü sürekli	Yok
	VFR	Tanımsız	Uçuş bilgi hizmeti	3050 m (10000 ft) AMSL'nin altında 250 knot IAS	Yok	Yok
G	IFR	Tanımsız	Uçuş bilgi hizmeti	3050 m (10000 ft) AMSL'nin altında 250 knot IAS	İki yönlü sürekli	Yok
	VFR	Tanımsız	Uçuş bilgi hizmeti	3050 m (10000 ft) AMSL'nin altında 250 knot IAS	Yok	Yok

* Geçiş irtifası 3050 m (10 000 ft) AMSL'den daha düşük olduğunda, 10 000 ft yerine FL 100 kullanılmalıdır.

2.2.4. Hava trafik yönetim sisteminin kapasitesini kısıtlayan faktörler

Hava trafik yönetim sisteminin en önemli parçası kontrolörlerdir. Bu sistemde hava trafik kontrolörlerinin görevi; uçakların birbirleri ile veya diğer araç ve mânialarla çarpışmalarını önlemek ve hava trafik akışını emniyetli ve verimli bir şekilde hızlandırmak ve düzenlemektir. Hava trafik kontrolörleri uçakların birbirinden emniyet mesafesi kadar uzak kalmalarını sağlayarak uçak hareketlerini düzenler. Hava trafik kontrolörünün temel amacı uçuş emniyetini sağlamaktır. Fakat aynı zamanda bu emniyeti sağlamaktan dolayı oluşan uçuş gecikmelerini de en aza indirmeye çalışırlar. Uçaklar motor çalıştırmalarından kalkışlarına, kalkışlarından hava yoluna girişine ve daha sonra da alçalmasından inişine kadar hava trafik kontrolörlerinin sorumluluğundadır [11].

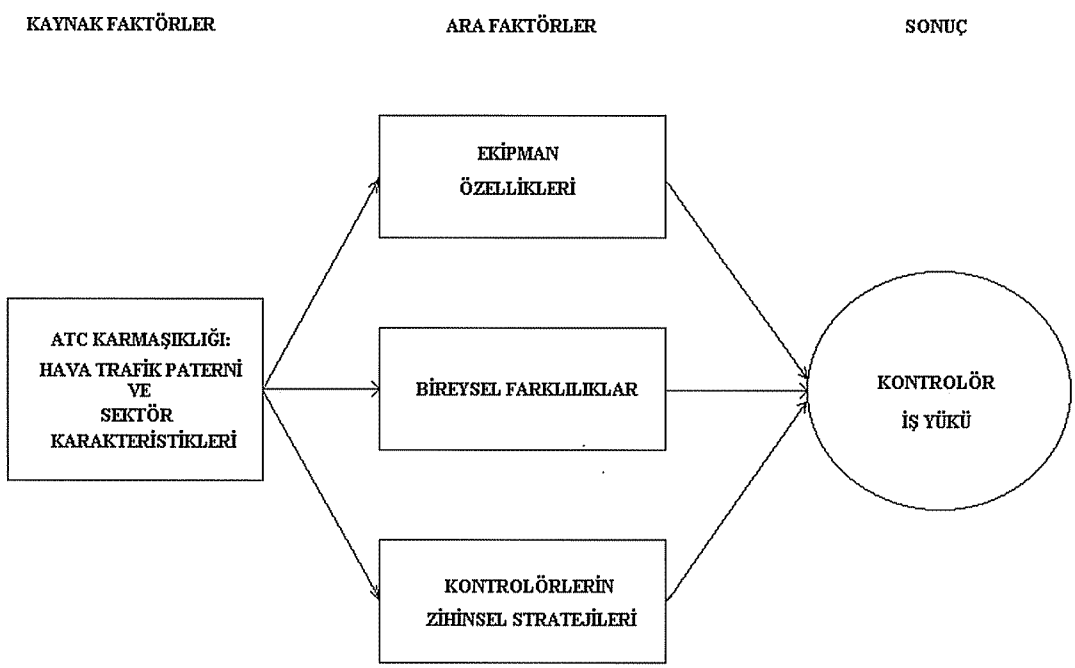
Kontrolör, hava trafiğini yönetmek için, zihninde uçak hareketlerini ve konumlarını zaman boyutu ile birlikte dört boyutlu olarak canlandırma yeteneği ile bir resim oluşturmaktadır. Bu resmi devamlı olarak muhafaza etmeye çalışarak uçaklara gerekli talimatları vermektedir. Farklı hava trafik kontrol pozisyonları, farklı uçuş safhaları, kullanılan yardımcılar ve her pozisyon için gerekli zaman kullanımı açısından farklı zihinsel görevleri içermektedir. Kontrolörlerin görevlerinin büyük bir bölümü bilişsel yapıdadır ve zihinsel süreçlere dayanmaktadır. Bilişsel beceriler, belli bir saha ve zamanda uçakların hareketleri ile ilgili olarak muhakeme, tanımlama, durum farkındalığını koruma, planlama, hızlı ve doğru karar verme ve hızlı sözel iletişim kurma becerilerini kapsamaktadır.

Kontrolörlerin pilotlarla ve diğer kontrolörlerle açık ve anlaşılır şekilde iletişim ve koordinasyon sağlamaları gerekmektedir. Bunun yanında profesyonellik, işe uygun niteliklere sahip olma ve yüksek sorumluluk düzeyi hava trafiğinin emniyetli bir şekilde kontrol edilmesinde en önemli konulardır [16].

Her bir sektördeki hava trafik kontrolörünün iş yükü, hava sahasının karmaşıklığı ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak değişim göstermektedir [17]. Trafik ve sektör özellikleri ile ilgili karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi ve bu

faktörlerin kontrolör iş yükü ile ilişkilerinin ölçülmesi konusunda gösterilen çabalar her geçen gün artmaktadır [3].

Hava sahası karmaşıklığı, hem trafiğin hem de hava sahasının geometrik yapısıyla ilgilidir [18]. Dolayısıyla karmaşıklık, hava sahasının hem yapısal hem de akış karakteristiklerine bağlıdır. Yapısal karakteristikler; sektör için sabittir ve mania, hava yollarının sayısı, havayolu kesişmeleri ve seyrüsefer yardımcıları gibi sektörün uzaysal ve fiziksel niteliklerine bağlıdır. Akış karakteristikleri ise zamanın fonksiyonu olarak değişir ve uçakların sayısı, uçak karması, meteoroloji, uçaklar arasındaki ayırma, yakın yollar, uçak hızları ve akış kısıtları gibi özelliklere bağlıdır. Bu yapısal ve akış parametrelerinin kombinasyonu, kontrolör iş yükünü etkilemektedir (Şekil 2.2) [19].



Şekil 2.2. Kontrolör iş yükünü etkileyen faktörler [20].

Günümüzde hava trafik yönetim sisteminin en temel konusu kapasitedir. Kontrolör iş yükü, hava sahası kapasitesinin en önemli belirleyicisidir. Daha öncede belirtildiği üzere hava trafik sisteminin kapasitesi, belirli bir periyotta kontrolör iş yükü belirli bir seviyede tutulurken emniyetli bir şekilde yönetilebilecek maksimum uçak sayısı ile tanımlanmaktadır [3]. Her geçen gün artan trafik miktarı ise sistem kapasitesinin etkili bir biçimde kullanılmasını

engellemektedir Bu anlamda kapasiteyi kısıtlayan en temel faktörler, hava sahası limitleri ve kontrolör iş yüküdür [4].

2.2.4.1. Hava trafik kontrolör iş yükü modelleri literatür araştırması

Gerçekte kontrolörün iş yükü hem nitel hem de nicel pek çok parametreye bağlı olduğundan matematiksel olarak ifade edilmesi zor bir kavramdır. Genel olarak iş yükü modelleri ya analitik ya da simülasyon modelleri olmak üzere iki grupta toplanmaktadır.

Analitik modeller, açık bir şekilde ifade edilen eşitlikleri esas almaktadır. Bu eşitlikler, daha çok belirlenen girdi kümesinin tahmini çıktılarının matematiksel olarak hızlı bir şekilde analiz edilmesiyle meydana gelen regresyon eşitlikleridir. Bu tip modeller için Amerika'da planlanan Sektör Tasarımı Analiz Aracı (SDAT-Sector Design Analysis Tool) ve Eurocontrol'ün kullandığı Kapasite Göstergeleri Modeli (CIM-Capacity Indicators Model) örnek olarak verilebilir. Her iki modelde de belirlenen bir sektör içerisinde kontrolöre tahsis edilen görevler için bir sektördeki iş yükü belirlenmekte ve sektör içerisinde beklenen çarpışma risklerinin ve çözüm stratejilerinin sayısını tahmin etmek üzere olasılık teorisi kullanılmaktadır.

Simülasyon modelleri ise oldukça karmaşıktır. Simülasyon, sistem performansını değerlendirmek ve geliştirmek amacıyla bir bilgisayar modeli kullanarak dinamik bir sistemin taklit edilmesidir. Bir modelin analitik olarak açık bir şekilde ifade edilemediği veya çözülemediği durumlarda başvurulan bir yöntemdir. Dolayısıyla ATC gibi karmaşık ve dinamik bir sistem için günümüzde en çok tercih edilen yöntemdir. İki önemli kontrolör iş yükü simülasyon modeli bulunmaktadır. Bunlardan ilki, İngiltere'nin ATC sektörleri için geliştirilmiş olan DORATASK modelidir. Diğeri ise daha çok Avrupa hava sahası için kullanılan Yeniden Düzenlenmiş ATC Matematiksel Simülatörü (RAMS-Reorganized ATC Mathematical Simulator)'dür. Bunların dışında NATS (UK's National Air Traffic Services) tarafından geliştirilmiş olan ve ATM'de Performans ve Elverişlilik Modelleme (PUMA-Performance and Usability Modelling in ATM) olarak bilinen iş yükü modeli, bir kontrolörün algılama görevlerini esas almaktadır.

Toplam Hava Sahası ve Havaalanı Modelleme (TAAM-Total Airspace and Airport Modelling) simülasyon modeli de oldukça popüler olmasına rağmen henüz yeterli görülmemektedir. Günümüzde RAMS, özellikle Avrupa hava sahasının büyük bölümünde kapasite tahsisinin yapılmasında kullanılmak üzere en uygun yöntem olarak görülmektedir [21].

İş yükü ölçümlerinin değerlendirme yöntemlerine göre sübjektif, davranışsal ve fizyolojik olmak üzere 3 şekilde sınıflandırıldığı görülmektedir [22]. Sübjektif değerlendirmeler, kontrolörlerin kişisel değerlendirmeleri ve uzman değerlendirmeleri olarak iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Kişisel değerlendirmeler için NASA TLX, SWAT ve MCH olarak bilinen farklı testler söz konudur. Davranışsal değerlendirmeler, strip kullanma, süre vb. radyo haberleşme karakteristikleri ile yük değişimin gösterilmesini sağlamaktadır. Genel olarak davranış parametreleri, trafik problemleri ve kontrolörlerin karar süresi ile uyumlu bir ölçekte iş yükü değişimlerini ortaya koymaktadır. Ancak bunların yorumlanması gerçek iş yükü değerlendirmeleri için elverişli görülmemektedir. Kontrolörlerin fizyolojik parametrelerinin kaydedilmesi ile stres durumları saptanmaya çalışılmaktadır. Buna ek olarak da merkezi sinir sistemi aktivitesi ile kontrolör tarafından tecrübe edilen iş yükünün görüntüsü elde edilmeye çalışılmaktadır. Ancak teknik kısıtlar bu tip ölçümlerin çalışmalarda kullanılmasını engellemektedir [23].

Literatüre bakıldığında geçmişten bugüne çok sayıda farklı modelleme çalışmalarının yapıldığı ve bugünde bu çabaların halen devam ettiği görülmektedir.

Arad, B.A (1964); çalışmasında hava sahası faktörlerinin kontrolör iş yükü üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmada kontrolör iş yükleri; Geri plan yükü-L_0 (herhangi bir trafik aktivitesi olsun ya da olmasın kontrolörün çalışmasıyla meydana gelmektedir), Rutin yük- L_1 (standart bir uçak kontrolü) ve Hava sahası yükleri- L_2 (uçak ayırmaları) olmak üzere 3 ayrı kategoride sınıflandırılmıştır. N: kontrol altındaki uçak sayısı, T: sektördeki minimum uçuş süresi, K_1 ve K_2: yük katsayıları, g: sektör akış düzen katsayısı, V: ortalama hava hızı, S: sektör alanı ve a: ortalama uçak ayırması olmak üzere kontrol pozisyonundaki toplam yük aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir [24]:

$$L = L_0 + L_1 + L_2 \tag{2.1}$$

$$L = L_0 + \left(\frac{N}{T}\right) \cdot K_1 + \left(\frac{2 \cdot a \cdot V \cdot N^2}{gS}\right) \cdot K_2 \tag{2.2}$$

Arad, çalışmasında trafik miktarında meydana gelen artışın kontrolörün rutin yükünde artışa neden olacağını bunun da sektör tasarımlarında dikkate alınması gerekliliğini vurgulamıştır [24].

Schmidt, D.K. (1976); hava trafik kontrol ekibinin yetki alanları içerisinde kalan hava sahası sektör birimlerinin dizayn edilmesi ve değerlendirilmesinde yardımcı olabilecek yarı deneysel, deterministik bir iş yükü modeli ve prosedürü tanımlamıştır. Bu çalışmada Kontrol Güçlüğü İndeksi-CDI (Control Difficulty Index) olarak adlandırılan parametreyi hesaplamak üzere gözlenebilir görevlerin sıklığı ve uygulanma süresi dikkate alınmıştır [25].

$$CDI = \sum_i W_i E_i \tag{2.3}$$

CDI : Kontrol güçlüğü indeksi,

W_i : i olayı için ağırlık,

E_i : Saatte meydana gelen i tipi beklenen olay sayısıdır.

Hurst, M.W ve Rose, R.M (1978); çalışmalarında hava trafik kontrol ortamı içerisindeki temel davranış stresörlerini belirlemek üzere 47 radar sektöründe inceleme yapmışlardır. Uzman gözlemciler kullanılarak objektif olarak yapılan bu incelemede kontrolörlerin aktivite ve davranışsal oranları, saatteki trafik miktarı, pik trafik miktarı, haberleşme süresi ve yol değişikliği yapan uçak sayısı değişkenleri esas alınarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada çoklu regresyon analiz sonuçları, kontrolörlerin aktivite ve iş yükünde pik trafikte % 53'lük bir değişim olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla pik trafik miktarının önemli bir davranış stresörü olabileceği vurgulanmıştır [26].

Buckley, E.P. ve ark. (1983); çalışmalarında farklı teknikler kullanılarak iki deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada ele alınan iş yükü ölçümleri çarpışma tehlikesi (3, 4, 5 NM'lik çarpışma tehlikelerinin sayısı ve süresi), meşguliyet (kontrol altındaki süre, akış mesafesi, yakıt tüketimi, sınır

içerisindeki süre), haberleşme (yol değişiklikleri, yerden havaya haberleşme sayısı ve süresi) ve gecikmelerdir (toplam gecikme sayısı ve süresi). Buckley, kontrolörlerin görevlerini yerine getirmedeki değişkenlik boyutunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla insan performansı ve iş yükü, bu değişkenlik açısından dinamik olarak nitelendirilmiştir [27].

Stein, E.S. (1985) ; kontrolör iş yükünü dört değişkenle ele almıştır. Bu değişkenler; uçak sayısı, tehlike ile karşılaşma sayısı (minimum ayırma ihlali sıklığı), karmaşıklık veya kümelenme (hava sahasının belirli bir bölgesindeki uçak yoğunluğu) ve planlama faaliyetleri sıklığı (irtifa, yol ve baş değişikliğinin ağırlıklandırılmış toplamı) olarak tanımlanmıştır.

Bu çalışma 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Hazırlık aşaması, uzman görüşleri ve Buckley'in tamamlamış olduğu çalışmanın sonuçlarını kullanarak çalışmaya katılan 10 kontrolör için tanıtım ve eğitim amaçlı trafik senaryolarının geliştirilmesini kapsamaktadır. Daha sonra kontrolörler için görev yükü değişkenleri ortalama uçak yoğunluğu, planlanmış ve planlanmamış kısıtlar olarak tanımlandıktan sonra düşük-orta ve yüksek iş yükü seviyeleri için bir saatlik simülasyon uygulanmıştır. Sonuçlar ATWIT (Air Traffic Workload Input Technique) tekniği ve uzman oranları ile değerlendirilerek 3 iş yükü seviyesi için ağırlıklar belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada ise kontrolör iş yükü ile toplam trafik miktarı, yetki devri sayısı, belirli bir bölgede toplanan trafik yoğunluğu, geliş ve gidiş bacağı yetki devri sayıları arasındaki ilişki incelenmiştir.

Bu çalışmanın sonuçları yukarıda belirtilen değişkenler ile iş yükü arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Burada özellikle bir bölgede toplanmış olan trafik yoğunluğunun kontrolörün algılama iş yükü açısından önemi vurgulanmıştır [28].

Mogford, R.H ve ark. (1994); çalışmalarında kontrolörlerin karar vermesinde etkili olan faktörler ve yol safhası sektör karmaşıklığını ele almışlardır. Doğrudan (karşılıklı görüşme) ve doğrudan olmayan (seçilen yol sektörlerinin planları ve haritaları) yöntemler kullanılarak başlangıçta 19 karmaşıklık faktörü tanımlanmıştır. Daha sonra karşılaştırmalı analizlerle çok boyutlu ölçeklendirme yöntemi kullanılarak kontrolörlerin karar verme işleminde etkili 15 sektör karmaşıklık faktörü ortaya koyulmuştur. Bu faktörler; tırmanma

ve alçalmadaki trafik miktarı, uçak karması (VFR, IFR, Pervaneli, jet vs.), kesişen uçak yollarının sayısı, bir kontrolörün yerine getirmek zorunda olduğu çok yönlü işlevler, gerekli prosedürlerin sayısı, askeri uçuşların sayısı, koordinasyon sayısı, havayolu şirketlerinin merkez üssü, meteoroloji, karmaşık uçak rotaları, tahditli sahalar- askeri uçuş sahaları, sektör boyutu, boylamsal sıralama ve ayırma gereklilikleri, radyo ve radar kapsama alanı uygunluğu, radyo frekans tıkanıklığı ve frekans tıkanıklığıdır [20].

Kontrolör iş yükü ve hava sahası karmaşıklığı arasındaki ilişkiyi tanımlamak üzere bu bölümde incelenen çalışmalarda genel olarak trafik artış miktarı ile ele alınan parametre ve değişkenler açısından kontrolör iş yükü arasında pozitif yönlü ilişkiler olduğu ortaya çıkmaktadır.

Ancak 90'lı yıllardan sonra yapılan araştırmalar, trafikteki artış miktarının iş yükünü tanımlamada tek başına yeterli bir gösterge olmadığını vurgulamaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda iş yükü, trafik miktarı ve trafik paternlerindeki karmaşıklığın bir fonksiyonu olarak ele alınmaya başlamıştır. Bu da dinamik yoğunluk kavramını gündeme getirmiştir.

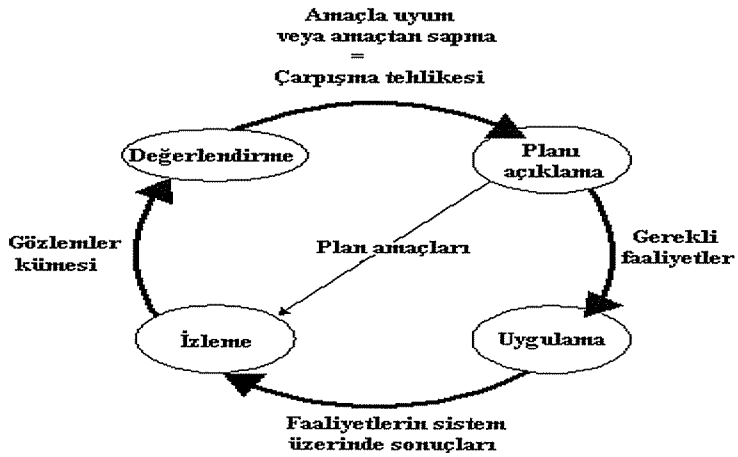
2.2.4.2. Dinamik yoğunluk ve iş yükü ölçümü modelleri literatür araştırması

Dinamik yoğunluk kavramı, hem trafik yoğunluğunu (bir hava sahası hacmi içerisindeki uçak sayısı) hem de trafik karmaşıklığını (belirli bir hava sahası hacmi içerisindeki karmaşıklığın ölçümü) kapsamaktadır. Bu doğrultuda hava trafik karmaşıklığının, sadece trafik yoğunluğu esasına dayanarak yapılan mevcut kontrolör iş yükü ölçümlerinden daha iyi sonuç vereceği görüşüne varılmıştır [29]. Gerçekte dinamik yoğunluk, hem yol hem de terminal hava sahalarında ayırma ve çarpışma tehlikelerini etkileyen faktörlerin etkisini yansıtmaktadır. Uçak sayısı ve uçuşların karmaşıklığı, bu faktörler arasında yer almaktadır. Dolayısıyla dinamik yoğunluk, kontrolör iş yükünü birim hacimdeki uçak sayısından daha fazla faktörle ilişkilendirmektedir. Bu da operasyonel bir ortam içerisinde karmaşıklığın, tahmini iş yükünün ve meydana gelebilecek

çarpışma risklerinin değerlendirilmesinde farklı parametre ve değişkenleri gündeme getirmektedir [30].

Wynedemere Inc. (1996); Wyndemere Inc. tarafından hava trafik kontrolü açısından karmaşıklığa neden olarak 19 faktör tanımlanmıştır. Bu faktörler; hava sahası yapısı, özel kullanımlı hava sahası, meteorolojik koşullar, sektör sınırına yakın olası çarpışma tehlikesi, uçak yoğunluğu, bir sektör içerisinde hizmet sağlayan tesis sayısı, tırmanma veya alçalmadaki uçak sayısı, çapraz irtifa profillerinin sayısı, uçak yoğunluğu üzerindeki meteorolojik etkiler, uçak hızındaki değişiklik, uçuş yönlerindeki değişiklik, uçak karması performansı, rüzgâr, birbirine çok yakın yaklaşma noktalarının dağılımı, çarpışma tehlikesi durumunda yakınsama açısı, uçak çiftlerinin yakınlığı (komşuluğu), uçağın niyeti ile ilgili bilgi seviyesi, ayırma gereklilikleri ve koordinasyondur [31].

Pawlak, W.S. ve ark. (1996); bir hava trafik durumunun kontrolör tarafından algılanma karmaşıklığını ölçmek ve değerlendirmek üzere hem fiziksel hem de zihinsel işlemleri kapsayan bir yapı ortaya koymuşlardır (Şekil 2.3). Bu yapı içerisinde planlama faaliyetleri, herhangi bir çarpışma tehlikesini çözmek üzere en iyi faaliyetin belirlenmesidir (yeni yolar, vektörler, hız tahsisi, irtifa değişiklikleri, diğer kontrolörlerle koordinasyon gibi). Uygulama ise çeşitli haberleşme ve veri girişleri gibi fiziksel faaliyetleri kapsamaktadır. Gerçekte bir görevin yerine getirilmesi kontrolörün bilişsel yeteneği ile ilgilidir. Dolayısıyla her görev farklı uçaklar için farklı sürelerde aynı döngü içerisinde yerine getirilmektedir.



Şekil 2.3 Hava trafik kontrolünde zihinsel ve fiziksel işlemler modeli [32].

Bu çalışmada Wynedemere Inc. tarafından tanımlanan karmaşıklık faktörleri algılama karmaşıklığı için değerlendirilmiştir. Çeşitli yol kontrol merkezlerindeki kontrolörler ve uzmanlarla yapılan görüşme sonucunda hava sahası yapısı, meteorolojik koşular, uçak yoğunluğu üzerindeki meteorolojik etkiler ve uçak çiftlerinin yakınlığı (komşuluğu) dışında kalan 15 karmaşıklık faktörü seçilmiştir. Bu faktörler, gerçek zamanlı insan döngülü simülasyonlarla hem mevcut hem de serbest uçuş senaryoları çerçevesinde incelenmiştir [32].

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, haberleşme ve veri girişi gibi fiziksel görevlerin bir karmaşıklık durumunun değerlendirilmesinde etkin bir ölçüm yöntemi olmadığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle planlama, izleme ve değerlendirme ile ilgili görevlerin önemi vurgulanmaktadır.

Smith, K. ve ark. (1998); çalışmalarında trafik artışının uçaklar arasındaki çarpışma tehlikesini arttırmasından yola çıkarak bir dinamik yoğunluk indeksi tanımlamışlardır.

$$Dt = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \frac{1}{\left(\frac{d_j(t)}{c}\right)^a} \tag{2.4}$$

N : Uçak sayısı

d_{ij} : İrtifa olarak ayrılmamış iki uçak arasındaki mesafe

c : Normalleştirme sabiti, 5 NM'e eşittir (min yatay mesafe)

a : Ağırlık parametresi (3).

Bu çalışmada araştırmacılar, çarpışma tehlikesinin tahmininde en önemli faktör olan ayırma üzerine odaklanmışlar ve özellikle insan faktörü problemlerini çözmek üzere kullanılabilecek bir yaklaşım olduğunu öne sürmüşlerdir [30].

Laudeman, I.V. ve ark. (1998); çalışmalarında dinamik yoğunluk ölçümünü şu şekilde tanımlamışlardır:

$$DD = \sum_{i=1}^{n} W_i TC_i + TD + CI \tag{2.5}$$

Denklem (2.5)'de;

DD : Dinamik yoğunluk,

TC : Karmaşıklık faktörü,

W : Faktör ağırlığı (*i* karmaşıklık faktörlerinin sayısıdır),

TD : Trafik yoğunluğu,

CI : Hava trafik kontrolörünün niyeti.

Hava trafik karmaşıklığını belirleyebilmek amacıyla kontrolörlerle yapılan görüşmeler ve bunların radar iz verileri ile gerçek zamanlı hesaplanması sonucunda 8 trafik faktörü tanımlanmıştır. Bunlar genel olarak dinamik faktörler (uçakların baş ve hız değişiklikleri), uçak yoğunluğu (sektörde uçakların dağılımındaki değişkenlik) ve çarpışma tehlikesi faktörleri olmak üzere 3 tiptir.

Trafik faktörleri belirlendikten sonra radar iz verileri, uçuş planları ve meteoroloji verileri kullanılarak ağırlıklar hesaplanmıştır. Trafik yoğunluğu ve karmaşıklığının doğrusal bir kombinasyonunu ifade eden denklemle dinamik yoğunluk elde edilmiştir.

$$DD = W_1(HC) + W_2(SC) + W_3(AC) + W_4(MD5) + W_5(MD10) + W_6(CP25) + W_7(CP40) + W_8(CP70) + TD \quad (2.6)$$

Araştırmacılar, kontrolör faaliyetlerinin değerlendirilmesinde dinamik yoğunluk ile sadece trafik yoğunluğuna bağlı olarak yapılan ölçümler arasındaki farklılığı değerlendirmek ve modelin geçerliliğini sağlamak üzere radar kontrolörlerini kapsayan 9 aktiviteyi seçerek hesaplamalarını yinelemişlerdir. Laudeman ve Ark.'nın NASA'da gerçekleştirdikleri bu çalışmada iş yükü ve kontrolör faaliyetlerinin değerlendirilmesinde dinamik yoğunluğun çok daha iyi sonuç verdiği vurgulanmıştır [29].

Sridhar, B. ve ark. (1998); çalışmalarında Laudeman ve Ark.'nın tanımladığı kontrolör iş yükü değerlendirmesini radyo haberleşmesi ve radar ekranı ile ilgili faaliyetleri de kapsayacak şekilde 1 dakikalık örnek zaman aralığı ile hesaplamışlardır [19].

Chatterji, G.B. ve Sridhar, B. (1999); karmaşıklık ve iş yükü arasındaki ilişkiyi yapay sinir ağları kullanarak doğrusal olmayan regresyon teknikleri ile göstermişlerdir. Bu çalışmada hava sahası karmaşıklığı, yapısal ve akış karmaşıklığı olarak ele alınmıştır. Burada yapısal karmaşıklık, sadece hava yolları ve kavşak noktalarının sayısı gibi hava sahasının geometrik özelliklerine bağlıdır. Hava sahasının akış karmaşıklığı ise uçakların bağıl hız ve pozisyonlarının bir fonksiyonudur [33].

Seçilen bir hava trafik yol kontrol merkezinden alınan trafik verileri ile düşük, orta ve yüksek iş yükü seviyeleri belirlenmiştir. 12 sn'lik aralıklarla kesikli bir zaman aralığında pozisyon, hız ve her uçağın komşuluğu için tanımlanan 6 kinematik değişkenin (P_s (k), $P_d(l)$, Y_s (k), $Y_d(l)$, N_s, N_d) her biri için 12 skaler ölçüm yapılmıştır. Bu ölçümde kontrolör iş yükü ile trafik yoğunluğu, tırmanma, alçalma ve düz seviyedeki uçak sayısı, uçaklar arasında ağırlıklandırılmış ortalama yatay ve dikey mesafe, uçaklar arasında ağırlıklandırılmış ortalama yatay ve dikey minimum mesafe, uçak çiftleri için minimum yatay ve dikey ayırma, çarpışma tehlikesi için kalan ortalama ve en az süre, uçaklar arasındaki yer hızı değişimi, yer hızı değişiminin ortalama hava hızı değişimine oranı, zamana bağlı olarak toplam çarpışma tehlikesi çözüm güçlüğü arasındaki ilişki karşılaştırılmıştır.

Burada doğrusal regresyon tekniklerinin kullanıldığı çalışmalara nazaran yapay sinir ağları gibi doğrusal olmayan yaklaşımlarla iş yükü ve karmaşıklık karşılaştırmasının daha iyi sonuç verdiği vurgulanmaktadır [33].

Delahaye, D. ve Puechmorel, S. (2000); uçakların mevcut hız ve pozisyonlarının sebep olduğu hava sahası karmaşıklığının ölçülmesi problemini ele almışlardır. Bu çalışmada iki yaklaşım kullanılmıştır. Bunlardan ilki, uçakların izafi pozisyon ve hızlarına dayalı olan geometrik yaklaşımdır. Bu sayede uçak kümelerini dikkate alarak bir sektördeki farklı trafik yapısına sahip bölgeleri tanımlamak mümkündür. Diğer yaklaşım ise dinamik sistem esasına dayanmaktadır. Bu amaçla isteğe bağlı bir boyutta karmaşık veya düzensiz bir hareketi nitelendirmek için kullanılan bir çeşit ölçüm yöntemi olan Kolmogorov Entropy kullanılarak uçakların global düzensizliği ölçülmüştür. [18].

Majumdar, A. ve Ochieng, W.Y. (2001); kontrolörlerin iş yükünü etkileyen karmaşıklık faktörlerini belirlemek üzere 5 Avrupa hava sahası yol sektörünü incelemişlerdir. Bu çalışmada pik saatteki kontrolör iş yükünü ölçmek üzere uçak profili ile ilgili çeşitli veriler seçilerek Regresyon Analizleri, Esas Bileşen Analizleri ve Faktör Analizleri gibi çok değişkenli analiz yöntemleri kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Bu kapsamda iş yükü ile ilgili olarak incelenen faktörler aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Eş zamanlı ortalama trafik miktarı,

- Ortalama seyir hızı,
- Tek yönlü yoğunlaşma,
- Tırmanma-düz uçuş-alçalma profili,
- Tırmanma-düz uçuş profili,
- Sürekli alçalma profili,
- Sürekli tırmanma profili,
- Sürekli düz uçuş profili,
- Düz uçuş-alçalma uçuş profili,
- Yüksek ve alçak uçuş seviyelerindeki fark,
- Tırmanma durumundan çıkan uçuşlar,
- Aynı ATC birimlerinden giriş yapan uçuşlar,
- Farklı bir ATC biriminden giriş yapan uçuşlar,
- Tırmanmaya başlayan uçuşlar,
- Düz uçuş safhasına başlayan uçuşlar,
- Alçalmaya başlayan uçuşlar,
- Başka bir ATC birimi için çıkan uçuşlar,
- Aynı ATC birimi için çıkış yapan uçuşlar,
- Seyahat safhasından çıkan uçuşlar,
- Alçalmayı tamamlayan uçuşlar,
- En işlek 30 dakikadaki uçuşlar,
- Uçuşların coğrafik yığılması,
- Seyahat edilen ortalama mesafe,
- Ortalama uçuş süresi,
- Tırmanmadaki toplam uçuş süresi,
- Toplam seyahat uçuş süresi,
- Alçalmadaki toplam uçuş süresi,
- Dikey yığılmalar [3].

Çalışmada elde edilen sonuçlar, sektörlere göre farklılık göstermektedir. Dolayısıyla her sektör için bu faktörlerin iş yükü üzerindeki etkisi değişmektedir. Bu amaçla da ağırlıklandırılmış regresyon analizleri, maksimum olasılık

analizleri, zaman sıralı (time series) analizler ve doğrusal olmayan analizlerle her bir sektör için iş yükünü etkileyen faktörlerin yapılması gerekliliği vurgulanmıştır.

Manning ve ark. (2001); gözlenebilir kontrolör aktivitelerini tanımlamaya çalışmışlardır. Bu çalışmada Performans ve Objektif İş Yükü Değerlendirme Araştırması-POWER (Performance and Objective Workload Evaluation Research) olarak adlandırılan bir araç (tool) kullanılmıştır. Sektör karmaşıklığı, kontrolör performansı ve sübjektif iş yükü ile ilişkili ölçümler Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Burada iki yüksek, iki düşük irtifa sektörü kullanılarak NASA TLX ve ATWIT kontrolör iş yükü oranları ile POWER oranları karşılaştırılmıştır. Kontrollü uçak sayısı, ortalama kontrol süresi, baş, hız ve irtifa değişimi, yetki devri sayısı, kabul için yetki devri süresi, ikaz sayısı, veri girişi hataları olarak belirlenen karmaşıklık faktörleri ile iş yükü arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

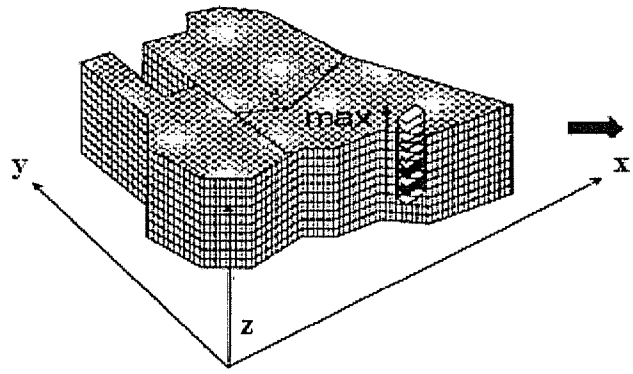
Çalışmada seçilen sektör karakteristiklerine bağlı olarak sadece bazı POWER ölçümlerinin sektör karmaşıklığı ile ilgili olduğu gösterilmiştir. Araştırmacılar, bu gibi çalışmalarda özellikle statik ve dinamik sektör özellikleri arasındaki ayrımın iyi bir şekilde yapılması gerekliliğini önermişlerdir [31].

Schaefer ve ark. (2001); çalışmalarında çoklu bir sektör planlama çalışması için hava trafik karmaşıklığını göstermekte kullanılan ve TLS (Tactical Load Smoother) olarak adlandırılan bir göstergeyi tanımlamışlardır. Eurocontrol'ün ATM Harmonizasyon Programı (PHARE-Program for Harmonised ATM Research in Eurocontrol) içerisinde yapılan ilk değerlendirmeden sonra TLS, Belçika'daki CANAC (Computer Assisted National ATC Center) operasyonel ortamına uyarlanmıştır. Bu çalışmada trafik yöneticileri ile yapılan görüşmeler sonucunda tanımlanan karmaşıklık faktörleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Çarpışma tehlikesi pozisyonu (sektör sınırına yakınlığı),
- Uçuş safhası (gelişteki trafik için çarpışma zamanı),
- Çarpışma tehlikesinin yüksekliği,
- Hava sahası yapısı (geliş ve gidiş akışları),
- Hız değişikliği,
- Çarpışma tehlikesinin tipi,

- Meteoroloji,
- Trafik karması,
- Çağrı (callsign) yoğunluğu.

Burada karmaşıklığın hesaplanması, her biri ortalama karmaşıklık değerine sahip olacak şekilde hava sahasının küçük birimlerine ayrıştırılmasını kapsamaktadır (Şekil 2.4). Her bir nokta için her bir sektörde 2 boyutlu karmaşıklık tanımlanmıştır. Dolayısıyla sektör başına genel karmaşıklık, tüm küplerin karmaşıklıklarının toplamının hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Trafik yoğunluğu ise her bir hava sahası ünitesi içerisinde olması beklenen uçak sayısı ile karmaşıklığın en temel etkeni olarak düşünülmüştür.



Şekil 2.4. Kübik hava sahası [34].

(x_i, y_i, z_k) merkezli her bir birim için karmaşıklık değeri aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$C = N_{ijk}^2 \times W_{\text{sec}} \times W_{ado} \times W_{ac} \times W_{dir} \tag{2.7}$$

N_{ijk} : Uçak yoğunluğu,

W_{sec} : Sektör sınırları faktör ağırlığı,

W_{ado} : Uçuş tipi faktör ağırlığı (geliş, gidiş, transit uçuşlar),

W_{ac} : Uçak tipi faktör ağırlığı,

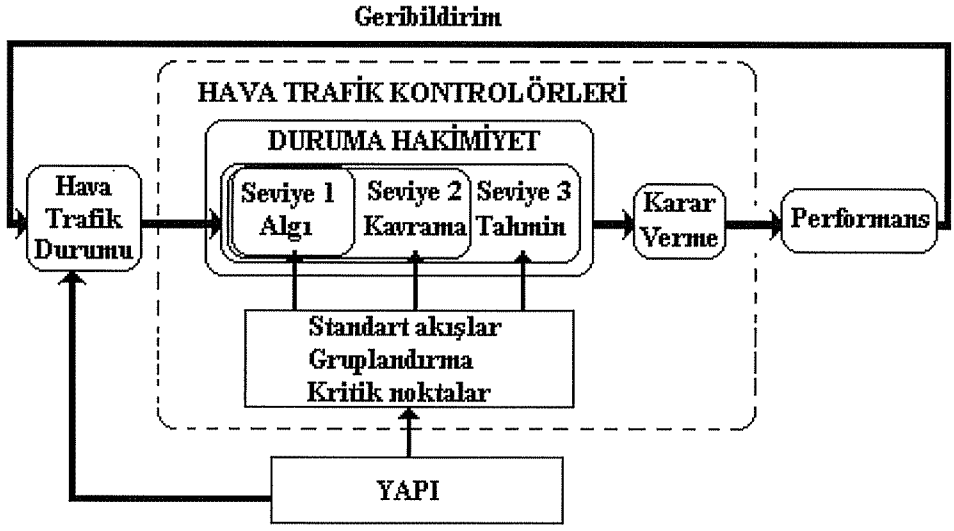
W_{dir} : Yön faktörü ağırlığı.

Bu çalışma sektör kapasitesinin artırılması amacıyla kübik bir hava sahası içerisinde karmaşıklığın hesaplanması ile alternatif bir yaklaşım olarak geliştirilmiştir [34].

Kirwan, Scaife ve Kennedy (2001); artan trafik karmaşıklığının kontrolörün zihinsel operasyonlarında ve duruma hâkimiyetinde meydana getireceği problemler üzerinde durularak karmaşıklığın azaltılması için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu çalışmada karmaşıklık faktörlerinin belirlenmesi, analiz edilmesi ve bunların hava trafik yönetim emniyeti üzerindeki etkisinin azaltılması amacıyla bir takım öneriler ortaya koyulmuştur.

Sonuç olarak araştırmacılar yeni bir sektör dizaynı yapılırken trafiğin belirli noktalarda gruplanmasının engellenmesi için stratejilerin geliştirilmesi ve uygulanması, askeri uçuşların yoğun olduğu sahalarda hava sahasının sivil-asker esnek kullanımı ve trafiğin olabildiğince standartlaştırılmasının karmaşıklığı azaltacağını vurgulamışlardır [35].

Histon, J.M ve ark. (2001 ve 2002); karmaşıklığı, normal ve olağanüstü koşullar altında emniyeti sağlamak üzere kontrolörlerin idare ettikleri trafiği algılama güçlüğü olarak ele almış ve algılama karmaşıklığını azaltacak çeşitli yapısal unsurlar tanımlamışlardır (Şekil 2.5). Bu amaçla kontrolör görüşlerine dayalı olarak elde edilen algılama karmaşıklığı faktörleri; hava sahası faktörleri, trafik faktörleri ve operasyonel kısıtlar olmak üzere üç grupta toplanarak incelenmiştir. Algılamadaki karmaşıklığı azaltmak üzere Standart akışlar, Gruplandırma ve Kritik Noktalar şeklinde sınıflandırma yapılarak 3 temel yapı ortaya konmuştur.



Şekil 2.5. Kontrolörlerin duruma hakimiyetini etkileyecek algı, kavrama ve tahmin gibi soyut kavramlar için yapısal olarak genelleştirilmiş bir öneri modeli [36].

Standart akışlar, seyrüsefer yardımcıları, havayolları ve standart prosedürler gibi hava sahası sistemi içerisindeki yapısal elemanlar arasındaki akışlara dayanmaktadır. Gruplandırma, hava sahasının belli bir bölümündeki ortak özelliklere sahip uçakları kapsamaktadır. Bu şekilde bir grup oluşturmak, özellikle birbirini etkileyebilecek trafikleri ayırmada kolaylık sağlayacaktır. Akış içerisinde trafiğin birbirini kestiği ve birleştiği noktalar olarak düşünülen kritik noktalar ise uçakların tehlikeyle karşılaşabileceği alanların bir araya toplanmasıyla trafiğin analizini kolaylaştıracaktır.

Bu çalışmada yapısal elemanlarla ilgili olarak tanımlanan en önemli faktörler; sektör boyutları, hava yollarının ve seyrüsefer cihazlarının yeri, standart akışlar (sayı; sektör şekli ile uyum; yörünge karmaşıklığı; kavşak ve birleşme noktalarının etkileşimi), diğer kontrolörlerle koordinasyon (işaret verme, yetki devri), uçakların gruplanması, sektör sınırına, birleşme noktasına en yakın yaklaşma noktasının yeri, sektör geçiş süresi, trafik akışıyla ilgili tampon kapasite, bekleme paternindeki uçak, özel kullanımlı hava sahası, gürültü azaltma prosedürleridir.

Araştırmacılar, uçak yörüngelerinin bir sektördeki dağılımını incelemek üzere yapmış oldukları deneysel çalışmada kavşak noktalarının sayısını ve sektördeki akışları değiştirerek hava sahasının yapısındaki değişimleri incelemişlerdir. Burada her bir trafik senaryosu, kontrol edilen bir sistemin kullanıcı tarafından algılanma kolaylığının tekrarlı ölçümlerini gerçekleştirmek üzere 10 ölçekli bir skala ile tasarlanmış Cooper-Harper adı verilen bir oranlama kullanılmıştır. Performans ölçümü, yatay bir eksen boyunca ilerleyen uçaklar arasındaki ayırma ihlali sayısı ve uçak başına ortalama hız değişimi ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çok sayıda kavşak noktası (rapor) olmasının kontrolör açısından bilişsel karmaşıklığı arttırdığını ortaya koymaktadır [36,37].

Athenes ve ark. (2002); çalışmalarında hava trafik karmaşıklığına özgü parametreler kullanarak karmaşıklık ve iş yükü arasındaki ilişkiyi tanımlamışlardır. Radar kontrolörleri ile yapılan bu çalışmada hem NASA-TLX kullanılarak sübjektif, hem de merkezi sinir sistemi aktivitesini yansıtan 5 fizyoloji parametresi kullanılarak fizyolojik değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

25 hava trafik kontrolörü üzerinde yapılan bu çalışmada bir çarpışma tehlikesinin tespit süresi modellenerek buna belirsizlik ve zaman baskısı ilave edilmiştir. Her bir uçak için bir trafik yük indeks değeri- t_{li} hesaplanmıştır. Burada her bir t_{li} değerinin hesaplanması uçakların sınıflandırılmasını, zaman sınırlarının hazırlanmasını ve çarpışma tehlikesinin belirsizliğinin ortaya koyulmasını gerektirmektedir.

Uçakların sınıflandırılması; herhangi bir kontrolör müdahalesine gerek olmaksızın basit bir şekilde izlenebilen ve aralarında 3 NM emniyet ayırması olan uçaklar için 1, radar düzenlemesi gerektiren ve çarpışma tehlikesi olan yani vektörleme yapılacak uçaklar için 2, çarpışma tehlikesi olası ise ve uçak kontrolörün değerlendirmesindeyse bu tip uçaklar için de 3.5 puan olacak şekilde belirlenmiştir. Zaman sınırları; tüm uçaklar için ilk radyo haberleşmesi bağlantısından son bağlantıya kadar geçen süre olarak düşünülmüştür. Belirsizlik ise ilave bir yüktür. Çarpışma tehlikesi minimumdan maksimuma olacak şekilde 4 kategoride değerlendirilmiştir.

Burada her bir uçak değerlendirildikten sonra kontrolör için trafiğin neden olduğu Trafik Yük İndeksi-TLI hesaplanmıştır. Bunun yanı sıra kalp atış oranı, merkezi sinir sistemi aktivitesini yansıtan 5 fizyoloji parametresi ve çalışmaya katılan her bir kontrolör için NASA TLX görev yük indeksi kullanılarak oranlar sağlanmıştır. Fizyolojik değişimlerin uçak sayısı, NASA TLX oranları ve TLI oranları karşılaştırması yapıldığında en iyi sonucun bu modelde önerilen TLI ile sağlandığı gösterilmiştir [38].

Kopardekar, P. ve Magyarits, S. (2002); çalışmalarında WJHTC ve Titan sistemleri, NASA tarafından geliştirilen 2 tip ölçüm, Wyndemere ve Metron havacılık tarafından şu ana kadar gerçekleştirilen dört farklı dinamik yoğunluk ölçümünün performanslarını incelemişlerdir.

Bu çalışma genel olarak 3 aşamadan ibarettir. 1. aşama, kontrolörlerle karmaşıklık oranlarının belirlenmesini kapsamaktadır. 2. aşamada ise 4 yol kontrol merkezinden toplamda 36 yüksek ve düşük irtifa sektöründen 72 tane 30 dakikalık trafik örneği alınmıştır. 3. aşama ise dinamik yoğunluk ölçümünün geçerliliğini sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu çalışmada araştırmacılar, doğrusal regresyon analizleri kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar kontrolör açısından

karmaşıklığın tahmin edilmesinde dört dinamik yoğunluk ölçümünün oldukça iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Ancak burada yapay sinir ağları, genetik algoritmalar ve doğrusal olmayan regresyon analizlerinin de geliştirilerek değerlendirilmesi önerilmiştir [39].

Masalonis, A.J. ve ark. (2003); çalışmalarında trafik karakteristiklerini kullanarak dinamik yoğunluk ve kontrolör iş yükü açısından karmaşıklığı modellemeyi amaçlamışlardır.

Bu çalışmada Wynedemere ve NASA'nın yapmış olduğu dinamik yoğunluk ölçümleri dikkate alınarak bunlar içerisinden 12 kriter belirlenmiştir. Bu kriterlere ek olarak 4 hava trafik yol kontrol merkezinden alınan 30 dakikalık trafik örneği ile kontrolör sübjektif oranları sağlamışlardır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, trafik akış koordinatörleri açısından yatayda birbirine yakın veya akışların kesiştiği aynı irtifalardaki uçakların, geliş ve kalkış durumlarının ek olarak da trafik hacmi ölçümünün oldukça önemli olduğunu göstermektedir [40].

Benkouar, A. ve ark. (2005); Avrupa hava sahası için sektör karmaşıklığını değerlendirmek ve makroskopik seviyede iş yükü ve sektör kapasite tahmini ortaya koymak üzere kontrolörler için 3 tip iş yükü tanımlamışlardır. Bunlar:

- Kontrolörlerin rutin görevi (sektör karakteristiklerine bağlı olarak geliş uçaklarının sayısı ile ilgilidir),
- Seviye değişimi izleme görevi,
- Çarpışma tehlikesini kontrol etme ve çözme görevi.

Buna göre iş yükü ölçümü aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir.

$$WL = t_{AC} \cdot O_{AC} + t_{Cnf} \cdot O_{Cnf} + t_{Cl} \cdot O_{Cl} \qquad (2.8)$$

Burada

O_{AC}, O_{Cnf}, O_{Cl} : Belli bir zaman periyodu süresince (1 saat) meydana gelen rutin, tırmanma/alçalma ve çarpışma tehlikesi olaylarının sayısı.

t_{AC}, t_{Cnf}, t_{Cl} : Rutin görevler, tırmanma/alçalma ve çarpışma tehlikesi görevlerinin süresi (saniye).

Bu çalışmada dikkate alınan karmaşıklık faktörleri iki ayrı başlık altında incelenmiştir. Bunlardan uçuş karmaşıklığı faktörleri; belirli bir zaman aralığındaki uçak tipi ve sayısı, en yoğun 3 saat, tırmanma/alçalma trafik miktarı ve merkezi bir sınıra yakınlıktır. Birbiri ile etkileşimli karmaşıklık faktörleri ise; çarpışma tehlikesi tipi ve sayısı, birçok kavşak noktası, küçük açılı yakınsak yollar, uçak performansı (jet, pervaneli...), ayırma standartları, çarpışma tehlikesi tespit ve çözümü arasındaki süre, akış organizasyonu ve yoğunluktur.

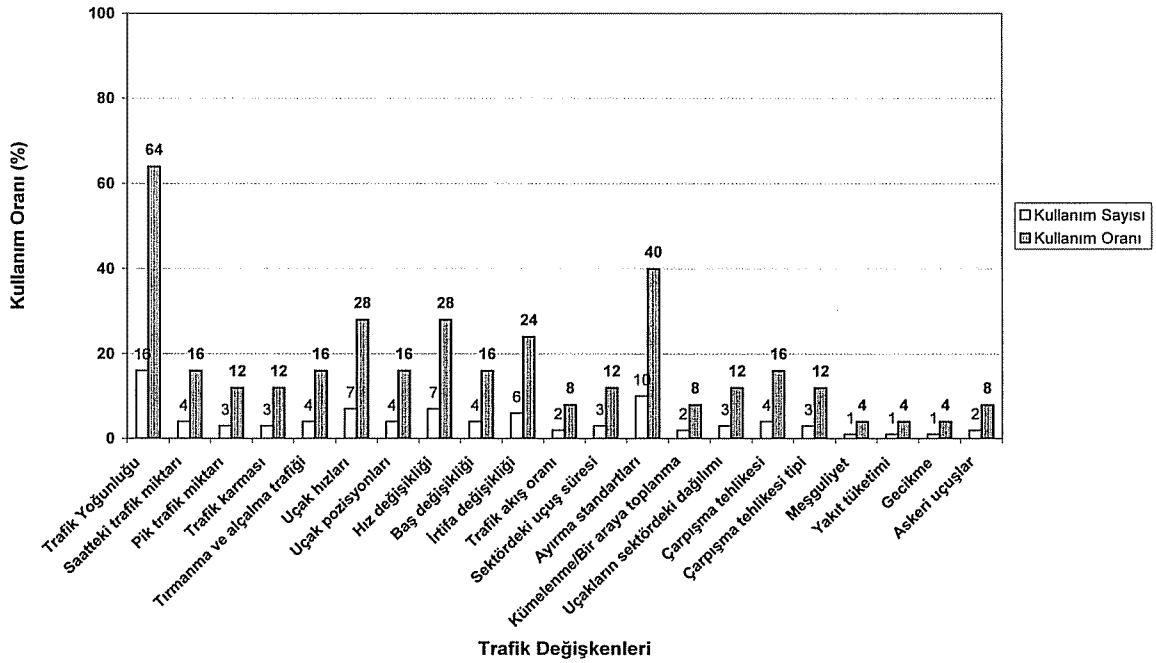
Araştırmacılar bu çalışmada 3 makro görevin ağırlıklarının seçiminde en iyi çözüme ulaşabilmek üzere genetik algoritma kullanmışlardır. Yapılan değerlendirme sonucunda 5 sektör sınıfı ortaya çıkmıştır. Model, benzer karmaşıklık seviyesine sahip sektör grupları üzerinde başarılı sonuçlara ulaşmıştır [41].

2.2.4.3. Hava trafik kontrolör iş yükü ölçüm modellerinin genel değerlendirmesi

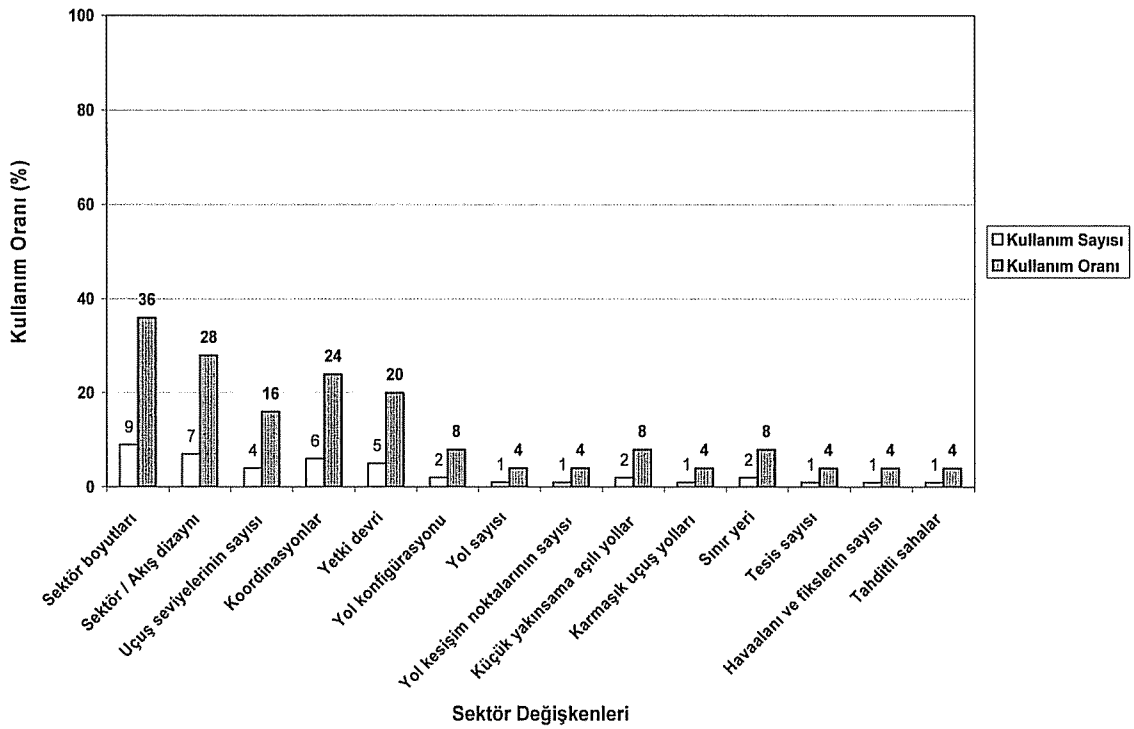
Çalışmanın bu bölümünde hava sahası kapasitesinin en önemli belirleyicisi olan kontrolör iş yükünü etkileyen faktörler ortaya koyulmuştur. İncelenen çalışmalarda da görüldüğü üzere kontrolör iş yükü, hava trafik karmaşıklığına ve sektör özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir.

Majumdar'ın kontrolör iş yükünü etkileyen hava sahası karmaşıklık faktörleri literatür özetinden esinlenerek bu çalışma kapsamında incelenen araştırmalarda kullanılan değişkenler Ek 1'de çizelge olarak gösterilmiştir. Toplamda incelenen 22 çalışmada gerek trafik, gerekse sektör özellikleri açısından iş yükü ve karmaşıklık üzerinde etkili olan değişkenler ve bu çalışmalarda kullanım oranları Şekil 2.6, Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de verilmiştir.

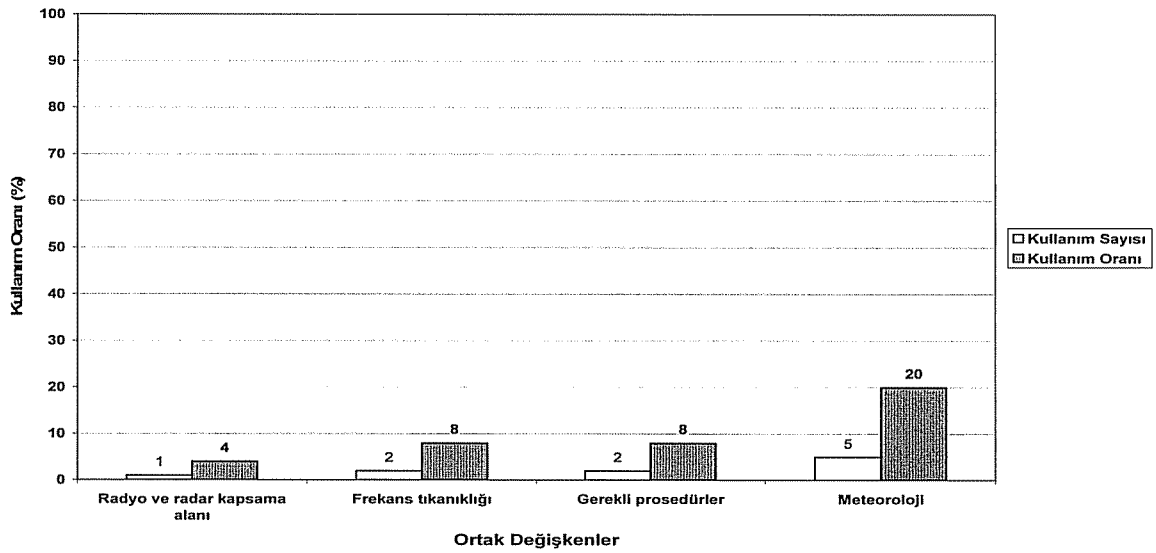
Bu faktörler, kontrolör iş yükünün ve sonuçta da hava sahası kapasitesinin en önemli etkenleri olarak görülmektedir.



Şekil 2.6. Trafik özelliklerine göre modellerde kullanılan değişkenler.



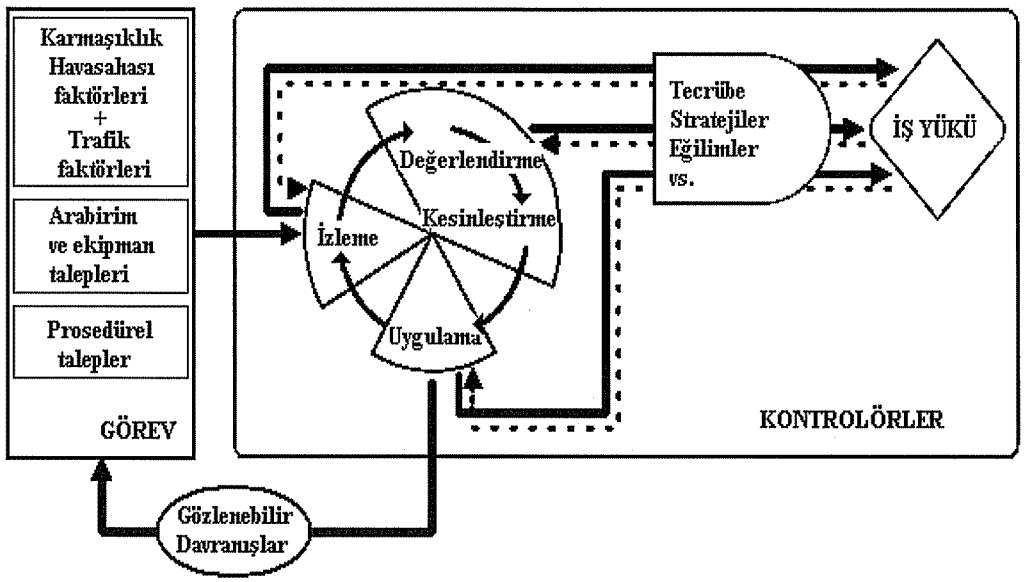
Şekil 2.7. Sektör özelliklerine göre modellerde kullanılan değişkenler.



Şekil 2.8. Hem trafik hem de sektör karmaşıklığı açısından kontrolör iş yükü için ortak düşünülebilecek değişkenlerin kullanımı.

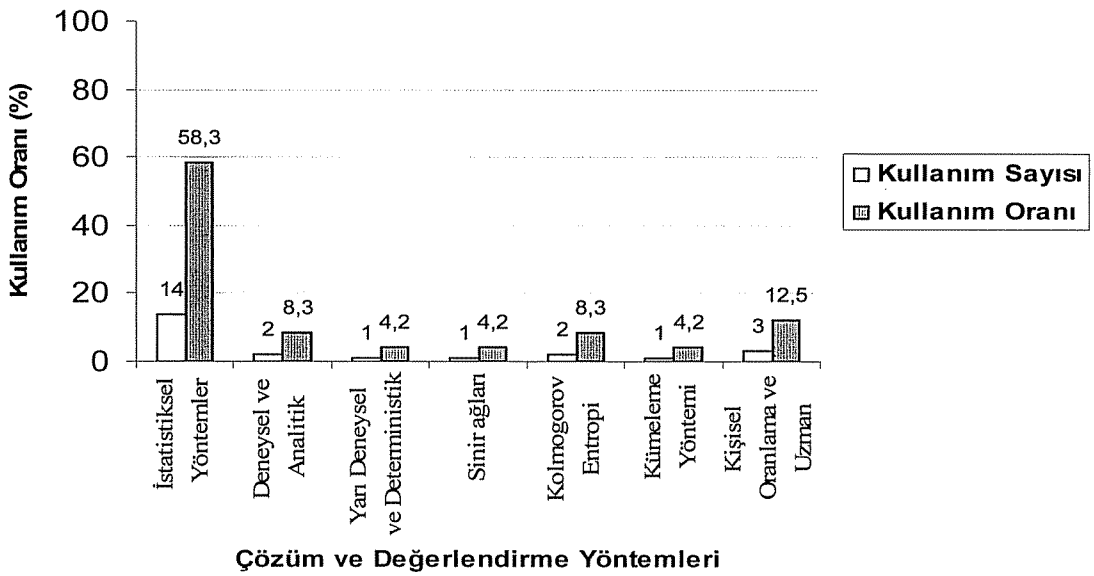
Bir hava trafik kontrolörünün iş yükü, öncelikle etkin bir şekilde idare edebileceği trafikle ilgilidir. Dolayısıyla idare edilecek trafik miktarı ne kadar fazla ise iş yükü de o oranda artacaktır. Yüksek iş yükü de kontrolörün performansını negatif yönde etkileyecektir. Ancak şu ana kadar yapılan çalışmalar trafik miktarının tek başına yeterli bir gösterge olmadığını kanıtlamıştır. Bu nedenle daha çok yoğunluk faktörleri ön plana çıkmıştır. Bu da hem toplam uçak sayısı hem de uçakların yakınlığı ile ilişkilidir ve genel olarak bir sektörün özelliklerini yansıtmaktadır. Bir sektörde aynı anda hareket eden çok sayıda uçak olduğu göz önünde bulundurulduğunda bu uçakların sektördeki dağılımlarına bağlı olarak meydana gelen çarpışma tehlikeleri kaçınılmazdır.

Bir hava trafik kontrolörünün genel işlevleri uçakların izlenmesi, ekran kontrollerinin yapılması, veri girişleri, uçuş planlarının güncellenmesi, hem uçakla hem de yerdeki hava trafik birimleri ile haberleşme, diğer kontrolörlerle koordinasyon, plan ve stratejilerin seçilmesi ve gerektiğinde değiştirilmesi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Hava trafik karmaşıklığı ve iş yükü değerlendirmesi [21].

İncelenen çalışmalarda karmaşıklık faktörlerinin iş yükü üzerindeki etki oranlarının genel olarak ya doğrudan kontrolörle karşılıklı görüşme ve anket teknikleri ya da çeşitli trafik senaryoları ve istatistiksel analizlerle belirlendiği dikkati çekmektedir (Ek 2). Bu çalışmalarda kullanılan ölçüm ve değerlendirme yöntemleri ise Şekil 2.10'da grafiksel olarak gösterilmiştir (Ek 3).



Şekil 2.10. İş yükü ve karmaşıklık ölçümünde incelenen çalışmalarda kullanılan çözüm ve değerlendirme yöntemleri.

İncelenen çalışmalardan elde edilen en genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Bunlar;

- Trafik miktarında meydana gelen artış, kontrolörlerin rutin görev yüklerinde artışa neden olmaktadır.
- Çarpışma tehlikesi, yetki devri, uygulanan prosedür sayısı ne kadar fazla ise kontrolör açısından trafiği yönetim güçlüğü o oranda artmaktadır.
- Saatteki ve pik zamanlardaki trafik miktarına bağlı olarak kontrolörlerin haberleşme sayısı ve süresi değişmekte ve dolayısıyla iş yükü artmaktadır.
- Belirli bölgelerde toplanan trafik ve rapor noktası sayısı, kontrolör açısından bilişsel iş yükü ile ilişkilidir ve karmaşıklığın artması iş yükünü arttırmaktadır.
- Baş, hız ve irtifa değişikliği gibi dinamik faktörlerin oranına bağlı olarak iş yükü artmaktadır.
- Trafik miktarının artmasına bağlı olarak fizyolojik parametrelerde de önemli artış yaşandığı görülmektedir.
- Eş zamanlı ortalama trafik miktarı ve uçak hareketleri, iş yükü açısından sektörlere bağlı olarak değişim göstermektedir.
- Çarpışma tehlikesi, meşguliyet süresi, haberleşme ve meydana gelen gecikmeler trafik yoğunluğu ve sektör geometrisine bağlı olarak iş yükünü etkilemektedir.

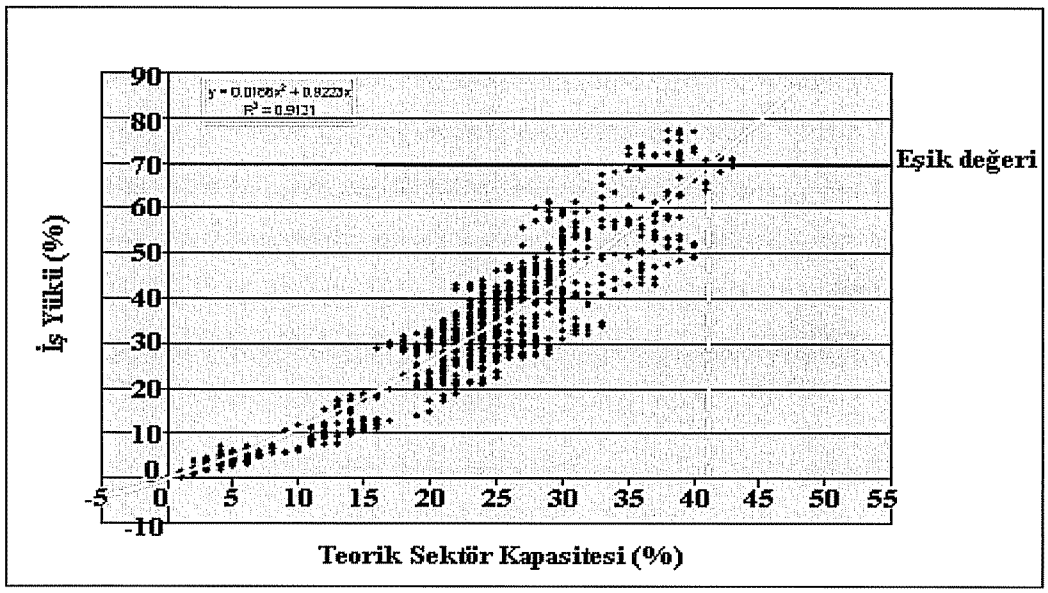
Grafiklerde de görüldüğü üzere farklı çalışmalarla farklı şekillerde ele alınan tüm karmaşıklık değişkenleri, kontrolörlerin çalışmasını sonuç olarak da hava sahası kapasitesini etkileyen en önemli özelliklerdir.

2.3. Hava Sahası Sektörizasyonu

Hava sahası sektörizasyonu, daha önce de belirtildiği üzere hava trafik yönetim kapasitesi için uygun metodlar kullanarak optimum hava sahası konfigürasyonunun geliştirilmesi amacıyla yapılmaktadır [9]. Gerek Avrupa'da gerekse Amerika'da yıllardan beri sektör sayıları aynı iken hem trafik paternleri hem de hacimleri önemli ölçüde değişmiştir. Sektörlerin genel yapısal özelliğine

bağlı olarak her bir sektörde aynı uçak sayısı için farklı iş yükleri meydana gelmektedir [17].

Bir sektörün saatlik kapasitesi, iş yükünde artışa neden olmaksızın kontrolör tarafından emniyetli bir şekilde idare edilebilecek saatteki maksimum uçak sayısı olarak tanımlanmaktadır. Bunun yanı sıra ilan edilen kapasite ve teorik kapasite değerleri de önemlidir. İlan edilen sektör kapasitesi, bir sektörün aşırı yüklenmesini engellemek için açıklanan saatteki maksimum uçak sayısıdır. Şekil 2.11'de regresyon yöntemi kullanılarak yapılan teorik kapasite tanımlaması örnek olarak verilmiştir. Buna göre trafik talebi ve kontrolör iş yükü arasında parabolik bir değişim söz konusudur. Bu eğri ve tanımlanan eşik değeri arasında kesişimin apsisi, regresyon yöntemiyle teorik kapasite değerini vermektedir. Örneğin şekilde verilen durum için bu kapasite değeri 41'dir [41, 42].



Şekil 2.11. Regresyon eğrisi [41].

Bir sektör için temel yapısal özellikler şu şekilde özetlenebilir:

- **Sektör geometrisi (çokgensel veya uzatılmış):** Çokgensel şekle sahip sektörlerde uçaklar sektöre farklı noktalardan giriş /çıkış yaparlar. Bunun aksine uzatılmış sektörlerde trafik paterni genellikle paraleldir ve daha az karmaşıktır. Karmaşık sektörlerde kontrolörlerin, trafik paternini uzun süre hafızalarında tutmaları gerektiği ispatlanmıştır. Bu da her bir uçak başına ortalama iş yükünü arttırmaktadır.

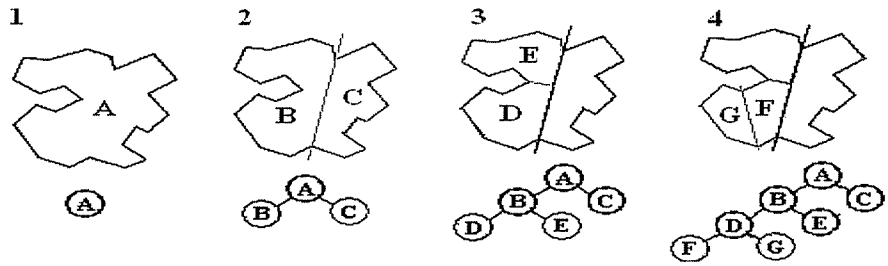
- **İrtifa:** Sektörler, düşük-yüksek ve ultra yüksek olmak üzere 3 tipte sınıflandırılmıştır. Her bir irtifada uçuş karması değişir ve kontrolörler için farklı uçak tipleri farklı iş yükü meydana getiriler.
- **Yolların sayısı:** Daha çok geçiş yoluna sahip sektörlerde genellikle karmaşıklık ve kontrolörün iş yükü daha fazladır.
- **Yol kesişim noktalarının sayısı:** Çarpışma tehlikesi genellikle kesişme noktaları yakınında meydana gelir. Kontrolörler, çok sayıda yolun kesiştiği sektörlerde daha fazla çarpışma tehlikesi çözüm faaliyeti yapmak zorundadır.
- **Komşu sektörlerin sayısı:** Çok sayıda komşu sektöre sahip sektörler, kontrolörler arasında daha fazla haberleşme ve yetki devri faaliyeti gerektirir.
- **Sektör hacmi:** Büyük sektörler, minimum ayırma ihmal edilmeksizin uçaklara yardımcı çok sayıda uzaya sahiptir. Diğer taraftan kontrolörler, daha fazla sayıda uçağı izlemek zorundadır.
- **Özel kullanımlı hava sahası:** Özel kullanımlı hava sahaları etrafındaki uçuşlar çok sayıda kısıt meydana getirir. Bu nedenle uçakların akışı zaman zaman kesilir.
- **Havaalanı:** Havaalanları, ağ içinde birleşme noktalarıdır. Havaalanları civarında pilot ve kontrolörler arasında çok sayıda haberleşme gerçekleşir. Buna ek olarak kontrolörler, uçakların tırmandığı veya alçaldığı alanlar olan terminal sahalarında çoğu zaman irtifa değişikliği veya vektörleme yaparlar [17].

2.3.1. Hava sahası sektörizasyonu problemi literatür araştırması

Hava sahası sektörizasyonu konusunda yapılan literatür araştırması, bu alandaki çalışmaların oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir. Sektörizasyon konusunda yapılan çalışmaların sınıflandırılmasında araştırmacıların uyguladıkları geometrik yaklaşımlar göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapsamda ikili alan bölme, üçgenleme ve ızgara temelli olmak üzere 3 grupta toplanan bu çalışmalar, araştırmacıların sektörizasyon tanımları, amaç ve kısıt fonksiyonları ile probleme çözüm yaklaşımları açısından incelenmiştir.

2.3.1.1. İkili alan bölme

İkili alan bölme yöntemi (BSP-Binary Space Partitions), konveks kümeler içerisindeki bir alanın hiperdüzlemler[1] tarafından tekrarlı bir şekilde bölünmesi için kullanılan bir yöntemdir. Diğer bir deyişle konveks kümeler içerisindeki karışık şekildeki çokgenleri ayırma yöntemidir (Şekil 2.12). BSP ağacı, her bir düğümde alanı iki alt bölgeye ayırmaktadır [43].



Şekil 2.12. İkili alan bölme işlemi [43].

Basu, A. ve ark. (2008); Hava sahasının geometrik açıdan otomatik olarak sektörlenmesi amacıyla yaptıkları çalışmada sektörizasyon problemini, kısıtlarla birlikte bir geometrik bölme problemi olarak ele almışlardır. Problemi, $\sigma_1 \ldots\ldots \sigma_k$ şeklinde gösterilen k tane sektöre sahip bir hava sahasının belirlenen bir D alanında kontrolör iş yükünün en aza indirilmesi olarak tanımlamışlardır.

Bu çalışmanın amacı, bir üst sınır (sektör sayısı-k) kısıtı altında maksimum ya da ortalama iş yükü miktarını minimize etmek ya da alternatif olarak maksimum veya ortalama iş yükü kısıtı altında sektör sayısını (k) minimize etmek olarak belirlenmiştir. Burada tanımlanan iş yükü, belirli bir [0,T] aralığında kontrol edilen maksimum veya ortalama uçak sayısıdır. Dolayısıyla trafik karması, ayırma standartları, uçak hızları, kesişen uçak profilleri, yollar arasındaki kesişim açıları, komşu sektörler arası koordinasyon, irtifa değişim sayısı vb. gibi iş yüküne etki eden diğer faktörler göz önünde bulundurulmamıştır [44].

---

[1] Hiperdüzlem: R^n'de bir H hiperdüzlemi, $p \in R^n$ sıfır olmayan bir vektör ve α bir sabit olmak üzere $H(p, \alpha)=\{x \in R^n: p^T x= \alpha\}$ kümesi ile tanımlanır. H hiperdüzlemi, kapalı iki yarı uzay tanımlamaktadır.

Problem, algoritma açısından hesaplama geometrisi esasına dayanmaktadır. Burada sektörizasyon, öncelikle 1 boyutlu olarak ele alınmış ve daha sonra bu çerçevede ikili alan bölme (BSP-Binary Space Partition) esasına dayanan sezgisel bir yaklaşımla 2 boyutlu olarak tanımlanmıştır [44].

2.3.1.2. Üçgenleme yöntemleri

Fiziksel yeryüzü gibi düzgün olmayan yüzeylerin matematiksel olarak ifadesinde zorluklarla karşılaşılmaktadır. Tam olarak ifade edilebilmesi için yüzeydeki tüm noktaların tanımlı olması gerekir ki bu da pratik olarak mümkün değildir. Uygulamada, yüzeyler örnekleme noktaları yardımıyla modellenmektedir. "Dayanak noktası" veya "referans noktası" olarak adlandırılan örnekleme noktaları, elde edilme veya seçilme yöntemine bağlı olarak farklı konumsal dağılım gösterirler. Dayanak noktalarının düzensiz bir dağılım göstermesi yüzey modellemesinde sıkça karşılaşılan bir durumdur. Yüzey modellemesi yüzeyin tek bir fonksiyonla bütün olarak ifade edilmesiyle yapılabileceği gibi üçgen, kare, dikdörtgen ve benzeri geometrik şekillere bölünerek parça parça ifade edilmesiyle de yapılabilmektedir. Özellikle düzensiz dağılım gösteren dayanak noktalarına bağlı yüzey modellemesinde, dayanak noktalarının işlenerek üçgenler ağı oluşturulması (üçgenleme), eşdeğer eğrilerinin (eşyükselti, eşgravite, vb.) oluşturulması ve enterpolasyon işlemi gibi harita mühendisleri için önemli olan konularda sıkça kullanılan bir çözüm yöntemidir.

Üçgenlemenin amacı söz konusu yüzeyi, birbirleri üzerine binmeyen üçgen elemanların toplamı şeklinde ifade etmektir. Yüzeyi oluşturan üçgenlerin köşe noktaları dayanak noktalarıdır ve her bir dayanak noktası en az bir üçgenin köşe noktasını oluşturur. Üçgenleme rasgele konumda dağılmış veri noktalarının işlenmesi için kullanılabilecek iyi bir yapıdır. Üçgenlemenin amacı dayanak noktalarını ilişkilendirmektir. Bir üçgen kenarını oluşturan iki dayanak noktasının birbiri ile ilişkili olduğu düşünülür. Üçgenlemenin kalitesi dayanak noktaları arasındaki bu ilişkilendirmenin uygunluğuna bağlıdır. Aynı veri kullanılarak farklı üçgenler ağı oluşturulabilir. Bu üçgenlemelerden bazıları sistematiği olan ve

algoritması kurulabilen üçgenlemeler bazıları ise bir sistematiği bulunmayan dolayısıyla programlama olanağı olmayan üçgenlemelerdir.

Üçgenleme algoritmaları, hedeflenen amaç ve kullanılan çözüm yöntemi esas alınarak iki farklı şekilde sınıflandırılabilir.

a. Amaca göre sınıflandırma

- Oluşan üçgenlerin eşkenar üçgenlere en yakın üçgenler olması, diğer bir deyişle, üçgenlerin iç açılarının 60°'den farklarının az olması (eşaçılık özelliği),
- Oluşan üçgenler ağının kenarları toplamının minimum olması,
- Her bir üçgen oluşturulurken olası kenarlardan en kısa olanının seçilmesi.

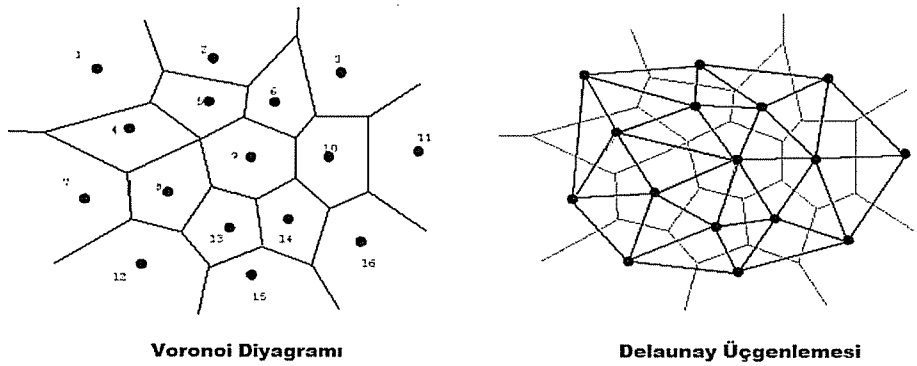
b. Çözüm yöntemlerine göre sınıflandırma

Üçgenleme algoritmaları, dayandıkları çözüm yöntemlerine göre iki genel gruba ayrılabilirler. Bunlardan birincisi, artan yöntemler, ikincisi ise bölüp-birleştiren yöntemlerdir. Artan yöntemler, veri alanının içindeki veya sınırındaki bir dayanak noktasından başlayıp adım adım diğer noktaları ağa katarak üçgenleme işlemini gerçekleştirir. Dalga dalga gelişen bir yapı içerisinde üçgenleme tanımlanır. Bölüp-birleştiren yöntemler ise son üçgenleme oluşana kadar veri alanını ardışık olarak alt bölgelere ayıran yöntemlerdir. Veri alanını bölmek için kullanılacak yaklaşım, algoritmanın temelini oluşturur.

Bu ayırımın yanı sıra yöntemler, direkt ve iteratif yöntemler olarak da sınıflandırılabilir. Direkt yöntemler üçgenleme işlemini bir kerede tamamlayan algoritmalardır. İteratif yöntemlerde ise ilk olarak keyfi bir üçgenleme oluşturulur, daha sonra seçilen bir optimizasyon kriteri kullanılarak, hiçbir üçgen kenarı değişmeyene kadar üçgenleme iyileştirilir.

Delaunay üçgenlemesi, hesapsal geometride oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu üçgenlemenin önemini anlayabilmek için geometrik olarak eşleniği sayılabilecek Voronoi diyagramının tanımlanması gerekir. Düzlemde yer alan sonlu nokta kümesine ait herhangi bir noktaya, kümedeki diğer noktalardan daha yakın konumda bulunan düzlem noktalarının geometrik yerine o noktanın Voronoi Çokgeni (poligonu) denilmektedir. Kümedeki tüm noktaların Voronoi çokgenlerinin birleşimi, o kümenin Voronoi diyagramını oluşturur. Şekil 2.13'de

bir veri kümesi ve ona ait Voronoi diyagramı görülmektedir. Bu diyagram, en yakın nokta problemleri için kullanılan kesin bir yapıdır. Bir noktanın Voronoi çokgeni herhangi bir noktayı, kendisine en yakın konumdaki komşu noktalardan ayırmaktadır. Çokgenin kenarları, nokta ile komşu noktaları birleştiren doğru parçalarının kenar orta dikmelerinden oluşmakta, her nokta kendisine ait komşu noktalar ile birleştirildiğinde Delaunay üçgenlemesi elde edilmektedir [45].



Şekil 2.13. Voronoi diyagramı ve Delaunay üçgenlemesi [46].

Delahaye, D. ve Pesic, B. (1999); Çalışmalarında hava sahasını V $(v_1,v_2....v_n)$ düğümler kümesi (seyrüsefer fiksleri) ve E $(V\times V)$ ayrıtlar kümesi (hava yolları) olmak üzere $G=(V,E)$ şeklinde 2 boyutlu bir taşımacılık ağı olarak modellemişlerdir. Bu modelde akışlar bir düğümden diğerine direk olarak ele alınmıştır. Problemin çözümünde bir uçağın aynı sektöre ikinci kez girmemesi (yol konvekslik kısıtı), bir sektör sınırının ağın her bir düğümünden en az belirli bir mesafede olması (emniyet kısıtı) ve sektörden geçiş süresi 14 dakikayı aşmayacak şekilde olması kısıtları altında sektörler arasında iş yükünün dengelenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada tanımlanan iş yükü; çarpışma tehlikesi, koordinasyon ve izleme iş yüklerinin toplamı olarak tanımlanmıştır [47].

İzleme İş Yükü; Direk olarak sektördeki uçak sayısı ile ilgilidir. Bu da aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir.

$$Wmo_{S_k}(t) = \eta \cdot \overline{n_{S_k}}(t) \qquad (2.9)$$

η : Ağırlık katsayısı,

$\overline{\eta}_{S_k}(t)$: t anında S_k sektöründeki ortalama uçak sayısı,

$\eta_{S_k}(t)$: t periyodu süresince S_k sektörü içerisindeki uçak sayısıdır.

D : Makul zaman aralığıdır.

$$\overline{\eta}_{S_k}(t) = \frac{1}{2D+1} \cdot \sum_{l=t-D}^{l=t+D} \eta_{S_k}(l) \tag{2.10}$$

$$\eta_{S_k}(t) = \eta_{S_k}(t-1) + Nin_{S_k}(t) - Nout_{S_k}(t) \tag{2.11}$$

$Nin_{S_k}(t)$: t periyodu süresince S_k sektörüne giren uçak sayısı,

$Nout_{S_k}(t)$: t periyodu süresince S_k sektöründen çıkan uçak sayısıdır.

Koordinasyon İş Yükü; Bir S_k sektörü içerisinde t zamanı süresince meydana gelen koordinasyon sayısı, aynı zaman aralığında sektöre giren ve çıkan uçak sayısına eşittir. Bunun için koordinasyon iş yükü, sektör sınırlarında akış kesişimleri ile ilgilidir.

$$Wco_{S_k}(t) = \beta(Fin_{S_k}(t) + Fout_{S_k}(t)) \tag{2.12}$$

Burada

β : Bir ağırlık katsayısı,

$Fin_{S_k}(t)$: t zamanında S_k sektöre giren akışlar,

$Fout_{S_k}(t)$: t zamanında S_k sektöründen çıkan akışlar.

$$Fin_{S_k}(t) = \frac{1}{2.D+1} \cdot \sum_{l=t-D}^{l=t+D} Nin_{S_k}(l) \tag{2.13}$$

$$Fout_{S_k}(t) = \frac{1}{2.D+1} \sum_{l=t-D}^{l=t+D} Nout_{S_k}(l) \tag{2.14}$$

Denklem (2.13) ve (2.14)'de

$Nin_{S_k}(l)$: l periyodu boyunca S_k sektörüne giren bir uçak için anlık olay sayısı,

$Nout_{S_k}(l)$: l periyodu boyunca S_k sektöründen çıkan bir uçak için anlık olay sayısıdır.

Çarpışma Tehlikesi İş Yükü; Sektörde kesişen akışlara bağlı olarak bir S_k sektörü içerisinde meydana gelen çarpışma tehlikesi iş yüküdür.

$$Wcf_{S_k}(t) = \alpha \frac{1}{2} \sum_{j \in NO_{S_k}} \sum_{\substack{i \in NO \\ i \neq j}} \sum_{\substack{l \in NO \\ l \neq i \\ l \neq j}} \left[h(\theta_{AB}) f_A(t) f_B(t) \right] \tag{2.15}$$

Denklem (2.15)'de

α : Bir ağırlık katsayısı,

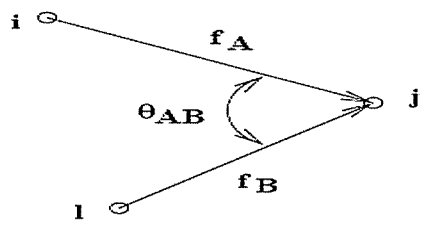
NO_{S_k} : S_k sektöründeki kavşak noktalarının kümesi,

NO : Ağ içerisindeki tüm kavşak noktaları kümesi,

θ_{AB} : (i, j) ve (l, j) bağlantılarının kesişim açısı (Şekil 2.14),

$h(\theta_{AB})$: Açı küçük olduğunda çarpışma tehlikesini çözmek için bir ağırlıklandırma fonksiyonu.

f_A, f_B : Ağ üzerindeki (i, j) ve (l, j) bağlantılarındaki akışlar. ((i, j), bir hava yoludur.)



Şekil 2.14. Hava yollarının kesişim açısı [47].

Eğer bu iş yükünü tanımlamak üzere çarpışma tehlikesi sıklığı kullanılırsa bu da aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$Wcf_{S_k}(t) = \alpha \frac{1}{2} \sum_{j \in NO_{S_k}} \sum_{\substack{i \in NO \\ i \neq j}} \sum_{\substack{l \in NO \\ l \neq i \\ l \neq j}} \psi\gamma(\theta_{AB}) \tag{2.16}$$

$$\gamma(\theta_{AB}) = \frac{2 \cdot f_A \cdot f_B \cdot R\sqrt{\overline{V}_A^2 - 2\overline{V}_B \cdot \cos\theta_{AB} + \overline{V}_B^2}}{\overline{V}_A \cdot \overline{V}_B \cdot \sin\theta_{AB}} \tag{2.17}$$

Denklem (2.16) ve (2.17)'de

ψ : Ağırlık katsayısı.

$\gamma(\theta_{AB})$: Ortalama çarpışma tehlikesi sayısı.

R : Standart ayırma

$\overline{V}_A, \overline{V}_B$: A ve B hava yolları üzerindeki hız [47].

Bu çalışmada hava sahasının en iyi şekilde bölünebilmesi için yol yapıları üzerinde durulmaktadır. Dolayısıyla graf bölme optimizasyonunun amacı da sektör sınırları yakınlarında trafik akışlarının minimize edilmesidir. Bu çalışma, optimum çözüm için sezgisel bir yaklaşım olan genetik algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Trandac, H. ve ark. (2002); Trandac ve ark. hava sahası sektörizasyon işlemini tıpkı Delahaye ve ark. gibi bir graf bölme problemi olarak ele almışlar ve bölme işleminde üçgenleme yöntemi kullanmışlardır.

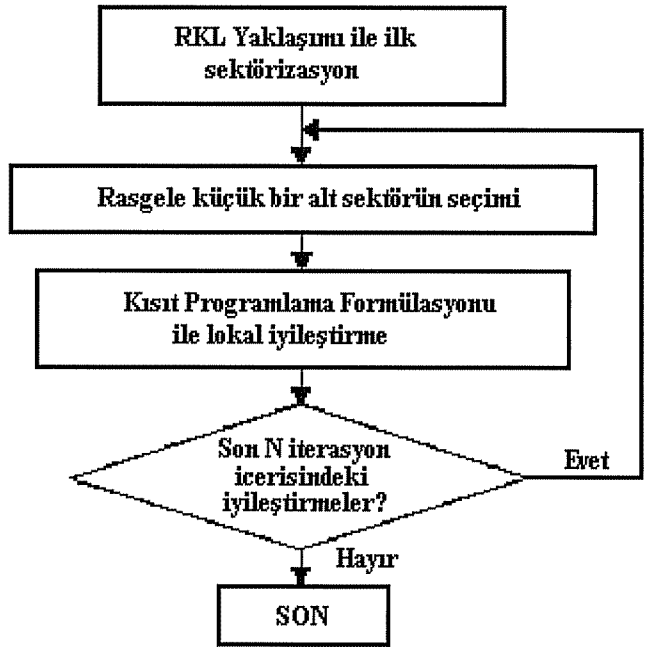
Bu çalışmada genel amaç, sektörler arasında kontrolör iş yükünü dengelemek ve komşu sektörler arasındaki koordinasyon iş yükünü en aza indirmektir. Dolayısıyla hava sahası; düğümler kümesi (kavşak noktaları) V ve ayrıtlar kümesi (hava yolları) E olmak üzere kümesi $G=(V,E)$ şeklinde 2 boyutlu olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada tanımlanan kısıtlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Dışbükeylik kısıtı (Convexity); Aynı uçak aynı sektöre ikince kez girmemelidir.
- Minimum mesafe kısıtı; Sektör sınırı ve kritik nokta arasındaki mesafe, verilen mesafeden az olmamalıdır. Bu kısıt, kontrolörün bu düğümde meydana gelebilecek çarpışma risklerini çözmesi için yeterli süreyi sağlayacaktır.
- Minimum sektör geçiş süresi kısıtı; Uçak, geçtiği her bir sektörde en azından belirlenen T_{min} süresi kadar kalmalıdır. Bu kısıt, kontrolörlere uçağı kontrol etmesi için yeterli süreyi temin edecektir.
- Bağlantı kısıtı; Sektör, parçalara ayrılmamalıdır.

Bu kapsamda çalışmanın amaç fonksiyonu tepe noktalarının ağırlıkları ve koordinasyon iş yükünün minimizasyonu ile ilişkilendirilmiştir [48].

$$Min \sum c_{ij}.\omega_{ij} \tag{2.18}$$

Çözüm yöntemi 2 aşamalıdır (Şekil 2.15). Öncelikle Kerninghan/Lin adı verilen özel bir algoritma ile sezgisel yaklaşım ve daha sonrasında rasgele nokta seçimi ile lokal iyileştirme amaçlı kısıt programlama formülasyonu kullanılmıştır. Burada sektörleme işlemi, 2 boyutlu olarak ele alınmış ve uçakların dikey hareketleri göz ardı edilmiştir.



Şekil 2.15. Hava sahası sektörizayonu için iki aşamalı bir yaklaşım [48].

2.3.1.3. Izgara temelli yöntemler

Yousefi, A. (2005); Çalışmasında Ulusal Hava Sahası Sistemi-NAS (National Airspace System) için hava trafik kontrol iş yükü esasına dayanan bir bölme ile optimum hava sahası tasarlamıştır. Bu çalışmada diğer sektörizasyon çalışmalarından farklı olarak sektör sınırlarının değişimi için daha analitik bir yaklaşım uygulanmıştır. Burada trafiğin irtifalardaki dağılımı ve iş yükü arasındaki ilişki çerçevesinde sektör boyutlarının altıgen ızgaralar kullanılarak belirlenmesi önerilmektedir. Çalışmada kümeleme uygulamalarında altıgen ızgaraların, sadece yatay veya dikey değil aynı zamanda diagonal yönlerde de

düzgün bir şekilde genişletilebileceği ve bu nedenle de sektörleme işleminde üçgen veya dikdörtgenlerden daha uygun olduğu vurgulanmıştır.

Yousefi, çalışmasında altıgen birimlerin her birini, bir tesis tarafından hizmet verilmesi gereken bir talep bölgesi olarak ele almıştır. Bu altıgen birimler, optimum yol kontrol merkezi sınırlarını oluşturabilmek üzere kümelenmiştir. Bu gibi bir kümeleme problemi de tesis yerleşim problemi olarak ifade edilmiştir.

Burada iş yükü, Toplam Hava Sahası ve Hava Alanı Modelleyicisi-TAAM (Total Airspace and Airport Modeller) simülasyonu kullanılarak modellenmiştir. İş yükü ölçümü; yatay hareket, çarpışma tespit ve çözüm, koordinasyon ve irtifa değişimini kapsamaktadır. Daha sonra hava sahası karmaşıklığının yoğun yaşandığı 5 yol kontrol merkezi için simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve sektör karmaşıklıkları belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan iş yükü modeli aşağıda açıklanmıştır.

- Yatay Hareket İş Yükü (WL_{HM}- Horizantal Movement Workload),
- Çarpışma Riski Tespit ve Çözüm İş Yükü (WL_{CDR}-Conflict Detection and Resolution Workload),
- Koordinasyon İş Yükü (WL_C-Coordination Workload),
- İrtifa Değişim İş Yükü (WL_{AC}-Altitude Change Workload).

$$Toplam\ WL = \sum_{n} WL_{HM} + WL_{CDR} + WL_C + WL_{AC} \qquad (2.19)$$

Yatay Hareket İş Yükü (WL_{HM}); her bir sektör içindeki uçak sayısı ve ortalama uçuş süresi ile tanımlanmaktadır.

$$WL_{HM} = F_{HM} \cdot (N_{HM} \cdot T) \qquad (2.20)$$

F_{HM} : Yatay hareket için ayarlama faktörü,

N_{HM} : Sektörden geçen uçak sayısı,

T : Ortalama uçuş süresi,

Çarpışma Riski İş Yükü (WL_{CDR}); çarpışma riski tipi ve büyüklüğü esasına dayanmaktadır. Çarpışma riskinin tipi, uçağın izleri ve uçuş safhaları (tırmanma, düz uçuş veya alçalma) ile belirlenmektedir. Her tip çarpışma riski için farklı bir düzeltme faktörü F_{CDR} tahsis edilebilir. Çarpışma riskinin büyüklüğü ise

mevcut ayırma yüzdesidir. Örneğin uçaklar arasında minimum ayırma varsa doğal olarak uçaklar birbirine yakındır ve kontrolör için daha fazla iş yükü söz konusudur. Her bir çarpışma riski büyüklüğü için de T_{CS} olarak tanımlanan bir faktör vardır.

$$WL_{CDR} = F_{CDR} \cdot (T_{CT} \cdot T_{CS} \cdot N_{CDR}) \quad (2.21)$$

F_{CDR} : Çarpışma riski tipi için ayarlama faktörü,

T_{CS} : Çarpışma riskinin büyüklük faktörü,

T_{CT} : Çarpışma riski tipi faktörü,

N_{CDR} : Çarpışma riski olan uçak sayısı,

Koordinasyon İş Yükü (WL_C); ATC birimleri arası haberleşme (FIR içi), farklı ATC birimleri arası haberleşme (FIR dışı), talimat (baş, hız, irtifa değişimi) ve kontrollü sahadan kontrolsüz sahaya geçişler olarak tanımlanmıştır. Her faaliyet için farklı bir ayarlama faktörü vardır.

$$WL_C = F_C \cdot N_{CA} \quad (2.22)$$

F_C : Koordinasyon faktörü,

N_{CA} : İlgili koordinasyon faaliyetindeki uçak sayısı,

İrtifa Değiştirme İş Yükü (WL_{AC}); tırmanma, alçalma ve düz uçuş seviyesi gibi seviye değişiklikleri için verilen izinle belirlenir.

$$WL_{AC} = F_{AC} \cdot N_{AC} \quad (2.23)$$

F_{AC} : İrtifa izin faktörü,

N_{AC} : Uçak sayısı.

Çalışmanın bir sonraki aşaması, harita üzerine altıgen ızgaraların yerleştirilmesini ve iş yükü dağılımının izlenmesini kapsamaktadır (FL 210, FL 210-FL 310 ve FL 310 olarak belirlenen her bir katman için 2,566 altıgen ızgara ile kaplanmıştır). Bu altıgen birimler, optimum Hava Trafik Yol Kontrol Merkezi-ARTCC (Air Route Traffic Control Centers) sınırlarını oluşturmak üzere gruplandırılmıştır. Bu altıgen birimlerin her biri bir ARTCC tarafından hizmet

verilen talep bölgesi olarak değerlendirilmiştir. Tesisler için 20 tane adaydan oluşan bir küme göz önünde bulundurulmuştur.

Çalışmanın amaç fonksiyonu, tüm ARTCC'ler arasındaki ATC iş yükünün değişimini ve tanımlanan *i* altıgen birimler ve aday ARTCC'ler arasından açılan *j*'nin yeri arasındaki mesafeyi minimize etmek olarak ifade edilmiştir. Çalışmanın amaç fonksiyonları ve kısıtlarını gösteren denklem takımı aşağıda açıklanmıştır.

Küme algoritmasının formülasyonu ile her bir altıgen birim *i* (*i* ϵ {1,....2.566}) ve her tesisde *j* (*j* ϵ {1,....n}) indeksi ile gösterilmiştir. İkil değişken x_i^j aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$x_i^j = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ Eğer *i* altıgen birimi *j* ARTCC'sine tahsis edilmişse 1, aksi halde 0

$y_j = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ Eğer ARTCC *j* açılmışsa 1, aksi halde 0

Her bir altıgen sadece bir ARTCC'ye atanacaktır. Bu da aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$\sum_{j=1}^{n} x_i^j = 1 \qquad \forall i \in \{1,.....2,566\} \tag{2.24}$$

$$\sum_{i=1}^{2,566} x_i^j \leq 2,566 \times y_j \qquad \forall j \in \{1,.....n\} \tag{2.25}$$

Her bir katmandaki altıgen birim ayrı ayrı kümelenmiştir ve her bir irtifa katmanında 2,566 altıgen birim vardır. m (m=20) aday tesis arasından n sayıda tesis açmalıdır. Bunu da garantilemek için aşağıdaki ifade kullanılmıştır.

$$\sum_{j=1}^{m} y_j = n \tag{2.26}$$

Her bir küme içerisindeki tüm altıgen birimler birbiri ile bağlantılı olmak zorundadır. *i* altıgen biriminin *j* ARTCC'sine tahsis edilmiş en az bir komşuluğu olmadıkça *i* altıgen birimi *j* ARTCC'sine atanmayacaktır. Bu da şu şekilde ifade edilmiştir.

$$x_i^j \leq \sum_{k \in N_i} x_k^j \qquad \forall i, j \; ve \; N_i = \{c | c \; i' \; ye \; komşu\} \tag{2.27}$$

N_i, i altıgen biriminin bir komşuluk kümesidir ve i altıgen birimlerinin tüm komşuluk indislerini içermektedir.

Her bir i altıgen birimi ve j tesis yeri arasındaki mesafe de deniz mili olarak aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir.

$$d_i^j = 3{,}963 \cos^{-1}\left[\cos\delta_i \cos\delta_j \cos(\lambda_i - \lambda_j) + \sin\lambda_i \sin\lambda_j\right] \qquad (2.28)$$

Çalışmanın matematiksel ifadesi amaç ve kısıt fonksiyonları ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.

Birinci amaç; Tüm ARTCC'ler arasındaki iş yükü değişimini minimize etmektir. i altıgen biriminin her biri için iş yükü wl_i, j ARTCC için toplam iş yükü de wl^j ile gösterilmiştir. Bu şekilde toplam iş yükü aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$wl^j = \sum_{i=1}^{2566} wl_i \cdot x(i,j) \qquad \forall j \in \{1,.....n\} \qquad (2.29)$$

Tüm ARTCC'ler arasındaki iş yükü değişimi minimizasyonu;

$$Min\ \Delta = \sum_{j=1}^{n} \left| wl^j - \mu \right| \qquad (2.30)$$

n : Açılması istenen tesis sayısı,

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{n} wl^j}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{2566} wl_i}{n} \qquad (2.31)$$

μ parametresi, n ARTCC açıldığında her bir ARTCC içerisindeki ortalama iş yüküdür ve iş yükünün ARTCC'ler arasında aynı şekilde dağıldığı varsayılmıştır. Eğer tüm ARTCC'ler eşit iş yükü değerine sahipse $\Delta = 0$ olacaktır.

İkinci amaç; Her bir i altıgen birimi ve her bir j ARTCC yeri arasındaki mesafeyi minimize etmektir.

$$Min \sum_{i=1}^{2566} \sum_{j=1}^{n} d_i^j \cdot x_i^j \qquad (2.32)$$

(2.32) numaralı denklem, altıgen birimlerin büyük çoğunluğunun en yakın ARTCC'ye atanmış olduğunu garantilemektedir. Ancak uzaktaki bir ARTCC'ye

atanmış olabilecek altıgen birim olması durumunu elimine etmek için aşağıdaki ifade tanımlanmıştır [49].

$$Min \sum_{j=1}^{n} D_j \tag{2.33}$$

$$D_j \geq d_i^j \cdot x(i,j) \qquad \forall i \in \{1,.....2566\} \qquad \forall j \in \{1,.....n\} \tag{2.34}$$

Bu şekilde hava sahası tasarım işlemi, çok amaçlı bir optimizasyon problemi olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$Enk \qquad F(x_i^j) = \left[F_1(x_i^j), F_2(x_i^j), F_3(x_i^j)\right] \tag{2.35}$$

$$F_1(x_i^j) = \sum_{j=1}^{n} \left| wl^j - \mu \right|$$

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{n} wl^j}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{2566} wl_i}{n} \tag{2.36}$$

$$F_2(x_i^j) = \sum_{i=1}^{2566} \sum_{j=1}^{n} d_i^j \cdot x(i,j) \tag{2.37}$$

$$F_3(x_i^j) = \sum_{j=1}^{n} D_j \tag{2.38}$$

Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^{n} x_i^j = 1 \qquad \forall i \in \{1,.....2,566\} \tag{2.39}$$

$$\sum_{i=1}^{2566} x_i^j \leq 2566 \times y_j \qquad \forall j \in \{1,.....n\} \tag{2.40}$$

$$\sum_{j=1}^{m} y_j = n \tag{2.41}$$

$$x_i^j \leq \sum_{k \in N_i} x_k^j \qquad \forall i, j \; ve \; N_i = \{c | c \; i' ye \; komşu\} \tag{2.42}$$

$$D_j \geq d_i^j \cdot x(i,j) \qquad \forall i \in \{1,.....2566\} \qquad \forall j \in \{1,.....n\} \tag{2.43}$$

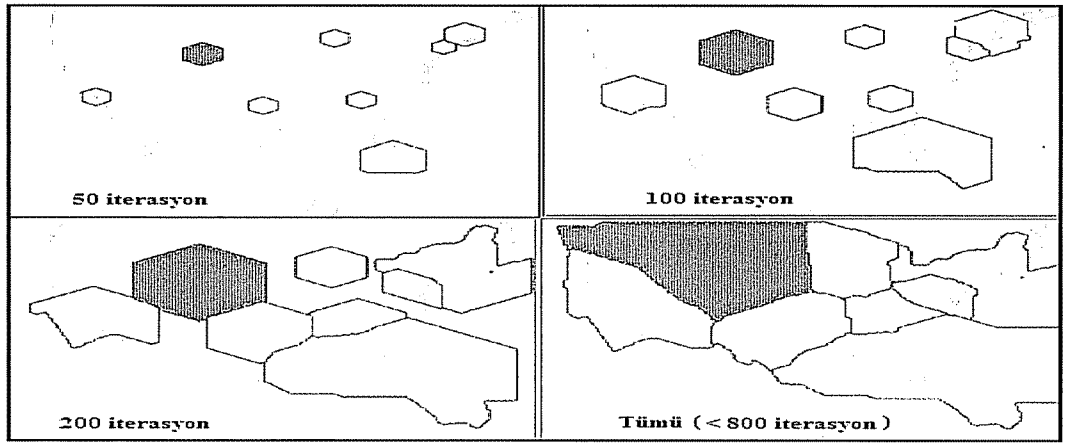
Klein A. (2005); Çalışmasında yüksek çözünürlükte bir altıgen ızgara kullanarak NAS hava sahası için olası yeni bir sektörleme işlemi

gerçekleştirmiştir. Hava sahası sektörleme işlemi, her bir sektör içerisindeki trafik kütlelerinin eşitlenmesi esasına dayanmaktadır. Diğer bir ifade ile her bir merkezdeki toplam trafik miktarlarının seçilen bir zaman aralığında olabildiğince eşit olmasıdır. Bu da oldukça işlek merkezlerin küçültülmesi ve daha az işlek olan merkezlerin boyut olarak büyütülmesi anlamına gelmektedir.

Burada trafik kütlesi ölçümü için toplam uçak pozisyon raporlarından yola çıkılarak her bir ızgara veya sektör içerisindeki miktar hesaplanmıştır. Daha sonra da bu trafik kütlesinin iş yükü ile ilişkisi karşılaştırılmıştır. Burada çok miktardaki trafik verisini işlemden geçiren ve seçilen bir noktadan başlayarak olası sektör sınırlarını oluşturabilen hızlı bir algoritma tanımlanmıştır.

Her bir altıgen hücre için toplam uçak pozisyon raporlarını (enlem, boylam ve irtifa olarak tanımlanmış) değerlendirmek üzere bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritmayı test etmek amacıyla da bir gün içerisindeki en yoğun saatler için bir program geliştirilmiştir. Bu programla FL 0-180, FL 180-340 ve 340-600 olarak belirlenen irtifa aralıkları içerisinde trafik kütlesinin dağılım paternlerindeki değişiklikler izlenmiştir. Daha sonra yapılan işlem, özel bir algoritma (seed growth) kullanılarak sektör sınırlarının belirlenmesini kapsamaktadır.

İlk olarak olası merkezlerden sabit bir yer sübjektif olarak seçilmiştir. Bu da en düşük pozisyon raporuna sahip sektörlerin seçilmesi işlemidir. 200 ardışık işlem (iterasyon)[2] sonucunda her bir merkezdeki toplam trafik kütlesi aralarındaki değişim %1'i aşmayacak şekilde 8 merkeze dağıtılmıştır (Şekil 2.16) [50].



Şekil 2.16. Trafik kütlesinin 8 merkeze dağılımı [50].

[2] İterasyon: Kelime anlamı ile tekrarlama, yineleme ve ardışık işlem anlamlarına gelen iterasyon, programlamada kod blokları yazılırken dizi elemanlarının teker teker yazılması yerine çeşitli döngüler kullanarak yazılmasıdır.

2.3.2. Hava sahası sektörizasyon modellerinin genel değerlendirmesi

Bu çalışmanın giriş bölümünde günümüzde hava sahası sektörizasyonu işleminde iki ayrı strateji kullanıldığından söz edilmiştir. Bu stratejiler;

- Belirli bir zaman ve frekanstaki uçak sayısının ve kesişen yolların azaltılarak ilave sektör sağlanması ve
- Trafiğin farklı sektörler içerisinde daha dengeli olmasının yanı sıra iş yükünün de dengelenmesiyle hava sahası karmaşıklığının azaltılmasıdır.

Yapılan çalışmaları bu kapsamda değerlendirdiğimizde Delahaye ve Trandac'ın gerçekleştirdiği çalışmaların hava sahası yollarına odaklandığı ve akışların minimize edilmesi ve bu sayede de kontrolör iş yükünün azaltılması amaçlı olduğu görülmektedir.

Araştırmacıların graf bölme problemi olarak adlandırdıkları bu çalışmalar, yöneylem araştırmalarında şebeke modelleri olarak bilinmektedir. Bu tip modeller; bilgi akışı, ürün akışı, ulaştırma, atama ve benzeri sistemlerin planlama ve kontrolünde kullanılan bilimsel tekniklerdir. Ele alınan problemin yapısına göre serim modelleri en kısa yol, en küçük yayılma ve en büyük akış problemi olarak ele alınmaktadır. Dolayısıyla en kısa yola odaklı bu çalışmalarla hava sahasını daha küçük sektörlere ayrıştırma stratejileri ortaya koyulmuştur. Ancak günümüzde bu oldukça sınırlı bir uygulamadır. Kontrolör iş yükünü azaltıyor gibi görünse de hava sahası sektörlerini gruplaştırarak daha karmaşık bir ağ yapısı meydana getirmek söz konusu olabilecektir. Bu iki çalışmanın operasyonel verilerle tanımlanmamış olması problemin anlaşılmasını oldukça güçleştirmektedir. Delahaye'nin çalışmasında kullandığı iş yükü ölçümü ve ilgili ağırlık katsayılarının nasıl bir katkı sağladığı yeterince açık değildir.

Izgara tekniği kullanılarak yapılan sektörizasyon çalışmalarında ise sektörizasyon işleminde irtifa boyutu da göz önünde bulundurularak problemin çözümü 3 boyutta incelenmiştir. Bu çalışmalar, trafiğin ve dolayısıyla iş yükünün farklı sektörlerde dengelenmesi esasına dayalı stratejiye odaklanmıştır. Her iki çalışmada da iş yükü ölçümü TAAM simülasyonu esasına dayanmaktadır ve trafik yoğunluğu göz önünde bulundurulmaktadır.

Yapılan literatür incelemesi bu alanda yapılan akademik çalışmaların yetersizliğini ortaya koymaktadır.

2.4. Tesis Yerleşim Problemleri

Tesis yerleşimi; ürün veya hizmet üretmek, kaynak kullanımında en yüksek etkinliği sağlamak için fiziksel tesisin en etkili yerini seçme işidir. Tesis yerleşim problemleri, sabit yatırımların ve ilgili malzeme taşıma maliyetlerinin minimize edilmeye çalışıldığı m tesisi, n yerleşime ($m \leq n$) etkin bir şekilde atama işiyle ilgilidir [51].

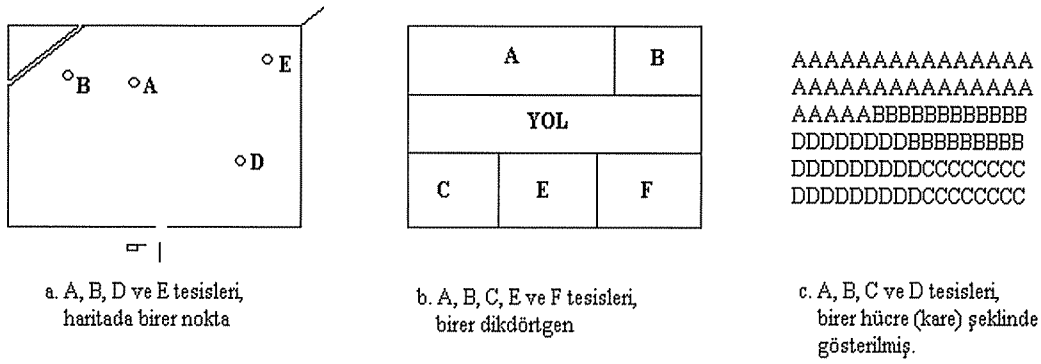
Tesis yerleşim problemlerinin amacı, departmanların zemin alanı ihtiyaçlarını ve yerleşim sınırlarını göz önünde bulundurarak malzeme taşıma maliyetlerini en küçüklemektir.

Tesis yeri seçimi, birden fazla amacın en iyilenmesini gerektiren çok ölçütlü bir problemdir. İki adımda ele alınmaktadır:

1. Bölge seçimi
2. Kuruluş noktası seçimi

Tesisler, belli bir mekâna bağlıdır ve belli alana sahiptir. Üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü bu alanlar tesis planlamasında üç şekilde ele alınmaktadır (Şekil 2.17):

- Tek noktada yoğunlaşmış
- Düzgün dağılmış
- Sonlu sayıda noktada yoğunlaşmış



a. A, B, D ve E tesisleri, haritada birer nokta

b. A, B, C, E ve F tesisleri, birer dikdörtgen

c. A, B, C ve D tesisleri, birer hücre (kare) şeklinde gösterilmiş.

Şekil 2.17. Üretim faaliyetlerinin yürütüldüğü tesisler [52].

Kesikli, sürekli veya sonlu elemanlı yapılardaki bu gösterim şekilleri, her ne kadar gerçeklerden uzaksa da yerleşim durumlarını modelleyebilmek için bir takım kabuller yapılması gerekmektedir.

Tesisler arasındaki uzaklıklar;

- Bu tesislerin birbirine en yakın noktaları,
- En uzak noktaları,
- Alan ağırlık merkezleri (ortalama),
- Malzeme alma-bırakma (a/b) noktalarına göre belirlenebilir.

Tesis yerleşiminde kullanılan modele bağlı olarak en iyilenmesi istenen amaçlar:

- Toplam malzeme taşıma maliyetinin en küçüklenmesi,
- En büyük uzaklığın en küçüklenmesi,
- Diğer (esnekliğin, kalitenin vb. arttırılması gibi) [52].

3. HAVA SAHASI SEKTÖRİZASYONU MATEMATİKSEL MODELİ

3.1. Araştırma Problemi

Hava taşımacılığı, dünya ekonomisinin en hızlı büyüyen sektörlerinden birisidir. Hava taşımacılığına olan talep, dünya çapındaki ekonomik büyümeye paralel olarak her geçen gün artmaktadır [53].

Gelişen dünya ekonomisi ve dünya ticaretine paralel olarak, gelecek 20 yıllık bir dönem içinde, artan havayolu rekabeti doğrultusunda yıllık yolcu trafiğinde % 4.9 ve yük taşımacılığında yıllık % 6.1 oranında büyüme beklenmektedir. Çin'in içinde bulunduğu Asya-Pasifik bölgesinin 2005-2025 yılları arasında en büyük uluslararası hava taşımacılığı pazarını elinde tutacağı tahmin edilmektedir. Diğer bölgeler ile karşılaştırıldığında Kuzey Amerika ve Avrupa'nın daha az büyüme göstereceği beklenmektedir. Uluslararası Havaalanları Konseyi'nin (ACI-Airports Council International) yaptığı bir araştırmaya göre 2005 yılında, toplam 4.1 milyar yolcu havayolu ile taşınmış olup 20 yıl sonra bu rakamın 9.1 milyar yolcuya çıkacağı tahmin edilmektedir. Yine ACI'nin tahminlerine göre yolcu trafiğinde yılda ortalama % 4, uçak trafiğinde ise % 2.8'lik bir büyüme olacağı öngörülmektedir. Aynı çalışma kapsamında, gelecek 20 yılda hava taşımacılığının en hızlı gelişmesi beklenen 10 ülke içerisinde Türkiye; Hindistan, Çin, Endonezya ve Tayland'dan sonra 5. sırada bulunmaktadır [1].

Türkiye, özellikle Orta Doğu'dan Avrupa hava sahasına giriş ve çıkışlarda coğrafik olarak stratejik bir konumdadır [54]. Son yıllarda sivil havacılık faaliyetinin mümkün olan her ile yayılması, genel havacılık işletmelerinin açılması, helikopter, uçak, planör, balon gibi hava araçlarının ve havaalanlarının sayısının artması, hava trafiğinin oldukça hızlı bir şekilde büyümesine sebep olmuştur. Bununla birlikte gerek turizm yatırımlarına önem verilmesi sonucu oluşan turizm hareketi, gerekse ülkemizin ekonomik, siyasi ve ticari ilişkilerindeki yoğunluk yıllar itibariyle ülkemiz ile diğer ülkeler arasındaki işçi ve turist trafiğinin artmasını sağlamıştır [55]. Hava taşımacılığı son dönemde dünya genelinde ortalama % 5 büyürken, Türkiye'de bu rakam % 30 civarında olmuştur.

EUROCONTROL ve IATA tarafından, Türkiye için 2015 yılında öngörülen toplam trafik artışını Türkiye, 2005 yılı içerisinde yakalamıştır. 2002–2006 yılları arasında yolcu trafiğinde; iç hatlarda % 239, dış hatlarda % 31, uçak trafiğinde; iç hatlarda % 118, dış hatlarda % 31, transit uçuşlarda; % 42, yük trafiğinde; iç hatlarda % 105, dış hatlarda % 39, uçak sayısında % 72 ve toplam koltuk kapasitesinde de % 71'lik artış kaydedilmiştir [56]. DHMİ istatistikî verilerine göre 2008 yılı sonu itibariyle de iç ve dış hatlarda toplam 74.395.039 adet yolcuya hizmet verilmiştir. Bu rakamlar 2007 yılı ile karşılaştırıldığında % 6'lık bir artış yaşandığı görülmektedir. Bunun yanı sıra 2007 yılında toplam 693.162, 2008 yılında ise 741.029 uçak trafiği gerçekleşmiştir. Dolayısıyla uçak trafiğinde de % 7'lik bir artış yaşanmıştır [57].

Hava taşımacılığının sürekli artışla karşı karşıya kalması hava trafik hizmetlerine olan talebi de arttırmaktadır [38]. Hava trafik sisteminde verimli bir hizmet sunumu için talep ve kapasite dengesinin sağlanması gerekmektedir. Hava trafik hizmeti verilen bir hava sahasında, uçak trafiğinin artmasıyla birlikte problemler ortaya çıkar. Talebin kapasiteyi aştığı zamanlarda sistemin aşırı yüklenmesi nedeniyle uçaklar arasında güvenli ayırmaları sağlamak zorlaşmakta ve uçakların çarpışma riskleri artmaktadır. Dünyanın birçok bölgesinde artan talep karşısında hava trafik sistemlerinin kapasiteleri yetersiz kalmaya başlamıştır [10]. Dolayısıyla hava taşımacılığının uzun dönemdeki en büyük sorunlarından biri tıkanıklık problemidir [58].

Geçmişte tıkanıklık problemi, özelikle trafik yoğunluğu yüksek havaalanlarının terminal sahalarında yaşanmaktaydı. Ancak günümüzde pek çok yol safhası sektörü içinde önemli bir problem olmaya başlamıştır. Bu problem, ister hava sahalarında ister havaalanlarında meydana gelsin uçuşlar açısından gecikmelerle, havayolu işletmeleri açısından maliyetlerin artmasıyla, yolcular açısından memnuniyetsizlikle ve trafiği emniyetli bir şekilde yönetmekle sorumlu hava trafik kontrolörleri açısından da zihinsel ve fiziksel iş yükünün artmasıyla sonuçlanmaktadır [59].

Tıkanıklık nedeniyle ortaya çıkan trafik gecikmeleri ve kısıtlamaları, ülkeleri havacılık alt yapısının gelişimi konusunda harekete geçirmiştir [58]. Hava trafiğinde yaşanan hızlı büyüme karşısında, özellikle trafiğin yoğun olduğu periyotlarda trafik talebi ile mevcut hava trafik kontrol kapasitesinin uyumlu hale getirilmesi

ve hava sahalarının daha verimli kullanımı konuları oldukça önemli hale gelmeye başlamıştır [60].

Gelecekte uçuş kavramının yakıt verimliliği yüksek, kullanıcı tercihli daha doğrudan rotalara imkân sağlayan, daha dinamik ve esnek bir yapılanmaya doğru yol aldığı düşünüldüğünde, hava sahası kullanıcılarının taleplerinde de büyük değişimler olacağı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla hava trafik yönetim sistemlerinde teknolojik açıdan her ne kadar köklü değişiklik yapılırsa yapılsın hava sahaları yeniden yapılandırılmadıkça verim elde edilemeyecektir [61]. Bu nedenle mevcut hava sahası tasarımlarının, trafik akışı ile uyumlu hale getirilmesi ve hava sahası kapasitelerinin arttırılmasına olan gereksinim giderek önem kazanmaktadır [38].

3.2. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmada temel olarak emniyet ve verimlilik faktörlerini göz önünde bulundurarak, trafik yoğunluğunun sektörlerde dengeli bir şekilde dağılımını sağlayabilecek ve kontrolör iş yükünü en aza indirebilecek hava sahası sektörizasyon problemlerine yeni bir boyut kazandırılması amaçlanmıştır.

Hava taşımacılığının gelişimi göz önünde bulundurulduğunda bir hava trafik kontrol biriminin yetki sınırları içerisinde kalan bir hava sahasında bir kontrol pozisyonunda yönetilebilecek trafik miktarının ayarlanması ve sektörler arası iş yükü dengesinin sağlanması diğer bir deyişle hava sahası sektörizasyonu kavramı bugün olduğu gibi gelecekte de hava taşımacılığı için önemini koruyacaktır. Bu kapsamda hava trafik kontrolör iş yükü etkenleri göz önünde bulundurularak, hava sahası yol safhası sektörlerinde stratejik seviyede ve statik bir yapıda iş yükünü dengeleyebilecek sektörizasyon problemine çözüm aranmıştır.

3.3. Araştırmanın Önemi

Son yıllarda sektörizasyon konusunda trafik taleplerindeki değişikliklere bağlı olarak dinamik esaslı bir yapılanma üzerinde durulduğu gözlenmektedir. Bu

çalışmalar, benzetim yöntemleri esasına dayandırılmaktadır. Ancak sistemde insan faktörünün rolü düşünüldüğünde taktiksel seviyede yapılan değişikliklerle hava sahası kapasitesi arttırılırken emniyet, verim ve iş yükü dengesinin tam olarak nasıl korunabileceği konusunda yapılmış çalışmalara rastlanmamıştır.

Türkiye hava sahası, coğrafik açıdan oldukça stratejik bir konumdadır. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de hava taşımacılığına olan talep her geçen gün artış göstermekte hatta büyüme hızı dünya ortalamalarının çok üzerinde seyretmektedir. Sözü edilen hızlı büyümeye cevap verecek hava sahası sektörizasyonu konusunda akademik bir çalışmanın olmaması araştırmanın önemini artırmaktadır.

3.4. Araştırma Yöntemi

Hava sahası sektörizasyonu modelinin geliştirilmesinde 2. Bölümde incelenen yöntemlerden ızgara temelli yaklaşımlar dikkate alınmıştır. Bu çalışmalardan Yousefi [49]'nin geliştirdiği ızgara temelli hava sahası sektörizasyon modeli, gerek hava sahası geometrisinde gerekse iş yükü ölçüm modelinde ve amaç fonksiyonunda yapılan yeniliklerle yeniden düzenlenmiştir. Araştırmanın amacı kapsamında bu çalışma genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır.

Çalışmanın ilk kısmında Geomedia Professional 6.0 Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) yazılımı kullanılarak uzaysal ve zamansal veri analizi imkânı sağlayan *Hava Sahası Analiz Aracı* geliştirilmiştir. Bu aşamada örnek uygulama alanı olarak seçilen Türk hava sahası, karelaj yöntemi kullanılarak 0.5 derecelik aralıklarla 585 eşit parçaya ayrılmıştır. Bu doğrultuda sektör sınır tasarımında ızgara temelli yaklaşımlar için karelaj yapı önerilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında *Toplam Hava Sahası İş Yükü Modeli* geliştirilerek kontrolör iş yükü ölçümü için yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Hesaplamalarda kullanılan hava trafik verileri, Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI)'nden alınmıştır. Modelde yer alan ilgili parametrelerin hesaplanabilmesi amacıyla oldukça büyük boyutlu bir veri analizi işlemi gerçekleştirilmiş ve interpolasyon vb. gibi bir takım ilâve yöntemlerden yararlanılmıştır. Tanımlanan

çeşitli kontrol faaliyetlerine ilişkin olarak ilgili ağırlık katsayılarının hesaplanmasında ise *anket yöntemi* kullanılmıştır. Ankara Yol Kontrol Merkezi'nde yol kontrolörlerine uygulanan anket çalışması ile elde edilen veriler, istatistiksel analiz aracı SPSS 15.0 kullanılarak hesaplanmıştır.

Çalışmanın son kısmında ise yeni bir iş yükü amaç ve kısıt fonksiyonu geliştirilmiş, mevcut altıgen ızgara temelli sektör tasarım modelinin amaç ve kısıt fonksiyonları ile birlikte kullanılarak yeni çok amaçlı karma tamsayılı model önerilmiştir.

Geliştirilen çok amaçlı karma tamsayılı hava sahası sektör tasarım modeli, Gasimov tarafından önerilen ve çeşitli çalışmalarda başarılı şekilde uygulanan [62,63] *Konik Skalerleştirme Yöntemi* ile çözülmüştür. Model, GAMS yazılımı ile programlanmış ve DICOPT çözücüsü kullanılmıştır. Modelin çözümünden elde edilen çıktılar, geliştirilen hava sahası analiz aracı vasıtasıyla görselleştirilmiştir.

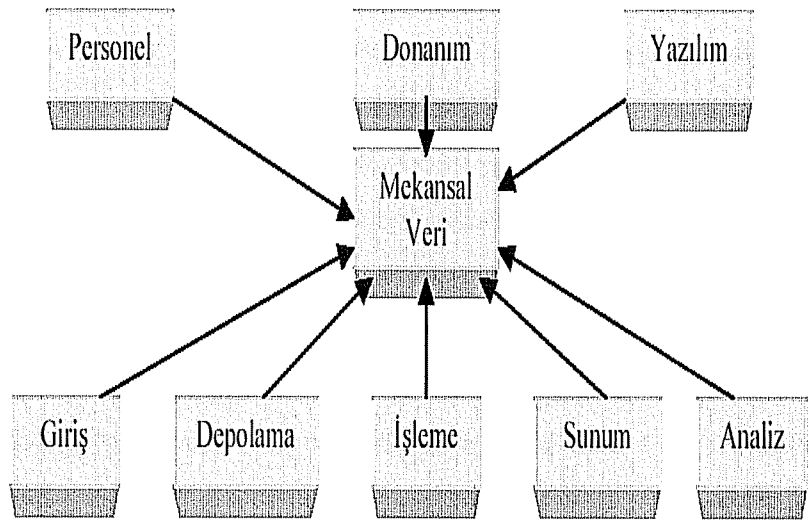
3.5. Hava Sahası Analiz Aracı

Günümüzde gerek Amerika'da gerekse Avrupa'da hava sahası analizi vb. amaçlar için Toplam Hava Sahası ve Hava Alanı Modelleyicisi-TAAM (Total Airspace and Airport Modeller), Yeniden Düzenlenmiş ATC Matematiksel Benzetimi –RAMS (Reorganized ATC Mathematical Simulator), Makroskopik Seviyede Trafik Tahsis ve Analiz Sistemi-SAAM (System for Traffic Assignment & Analysis at Macroscopic level) gibi benzetim programlarından yararlanılmaktadır. Bu kapsamda gerekli trafik analizlerinin gerçekleştirilmesi, sektör sınır tasarımında kolaylık sağlanması ve geliştirilen matematiksel model ile yapılacak optimizasyon işleminden elde edilecek sonuçların görselleştirilmesi gibi amaçlar doğrultusunda yukarıda sözü edilen türde bir programa olan gereksinim belirlenmiştir. Günümüzde pek çok uygulama alanı bulunan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), bu doğrultuda sağladığı kolaylıklarla oldukça iyi bir karar destek aracı olarak görülebilir.

Çalışmanın bu bölümünde öncelikle CBS'nin temel işlevleri ve uygulama mantığı hakkında genel bilgi verilmiştir. Bu kapsamda da Intergraph Geomedio 6.0 Professional CBS yazılımı kullanılarak yapılan işlemler anlatılmıştır.

3.5.1. Coğrafi bilgi sistemleri (CBS)

CBS, mekânsal verilerin değerlendirilmesi, analizi, modeli ve sunumunu içeren bilgisayar tabanlı bir bilgi sistemidir [64]. Diğer bir deyişle konumsal bilgiye dayalı veri toplama, saklama ve yenileme yeteneğine sahip bir sistemdir. Bu amaçla konumsal analiz yapabilme yeteneğine sahip olan CBS, analizler sonucunda uygulamaya geçme işlemini kolaylaştırmak için alternatif uygulama modelleri üreterek bu modellerin sonucunu görsel ve sayısal olarak gösterebilir [65]. CBS'nin kavramsal yapısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Coğrafi Bilgi Sistemlerinin kavramsal çatısı [66].

Coğrafi bilgi sistemlerinin sağlıklı bir şekilde çalışması aşağıdaki maddeler halinde belirtilen temel işlevlerin yerine getirilmesine bağlıdır.

- **Veri toplama:** Coğrafik veriler CBS' de kullanılmadan önce mutlaka sayısal formata dönüştürülmelidir. Verilerin kâğıt ya da harita ortamından bilgisayar ortamına dönüştürülmesi işlemi, *sayısallaştırma* olarak adlandırılmaktadır.
- **Veri Yönetimi:** Küçük boyutlu projelerde coğrafik bilgilerin sınırlı boyuttaki basit dosyalarda saklanması mümkündür. Ancak veri hacimlerinin geniş ve kapsamlı olması bunun yanı sıra birden çok veri gruplarının kullanılması durumunda verilerin saklanması, organize

edilmesi ve yönetilmesinde veri tabanı yönetim sistemleri kullanılmaktadır.

- **Veri İşleme:** Bazı durumlarda özel CBS projelerinde verilerin sisteme uyumlu olması için veri çeşitlerinin birbirine dönüşümü veya irdelenmesi gerekebilir. Dolayısıyla tüm bilgiler birleştirilmeden önce aynı ölçeğe dönüştürülmelidir.
- **Veri Sunumu:** Görsel işlemler yine CBS için önemli bir işlevdir. Birçok coğrafik işlemin sonunda yapılanlar harita veya grafik gösterimlerle görsel hale getirilir. Haritalar, coğrafik bilgiler ile kullanıcı arasındaki iletişimi sağlayan araçlardır [67].

Yapılan araştırmalara göre CBS teknolojisinin aşağıda maddeler halinde verilen alanlarda uygulamaları ortaya koyulmuştur. Bu uygulama alanları;

a. Tesis ve demirbaş envanteri: Doğal kaynakları en uygun kullanmak amacı ile yer yüzeyinin üzerinde ve altında dağılmış olan nesnelerin konumlanması, sayımı, dağılımı ve analizleri.
b. Coğrafi veri toplama ve üretimi: Uzaysal veritabanları kurmak üzere coğrafi verilerin toplanması.
c. Harita ve plan üretiminde: Karmaşık verilerin çok hızlı bir şekilde işlendiği ve güncel verilerle çalışma imkânı olan bu sistemler planlama sektörü için büyük bir kolaylıktır. Sağlıklı bir planlama yapma imkânı sağlar. Bu sayede haritaların baskı kalitesinde ve planların üretiminde kullanılmaktadır.
d. Kaynak tahsisi: Doğal ve insan yapısı kaynakların politik, ekonomik ve sosyal kriterlere göre tahsisi için konum, kalite, sayı ve hareketlerin analizinde uygulama alanları bulmuştur.
e. Rota ve akış optimizasyonu: Hizmet ağları kapasite yönetimi, dağıtım, ve toplama araçlarının güzergah ve zamanlama yönetimi gibi uygulamalarında yönlendirme ve optimum çözümleri amaçlar.
f. Rota seçimi ve navigasyon: Sağlık ve güvenlikle ilgili olayların izlenmesi, analizi ve görüntülenmesinde.
g. Tesis yerlerinin belirlenmesi: Tesisler için en uygun yerlerin araştırılması ve saptanmasında.

h. Yer altı ve yerüstü değerlendirmeleri: Doğal kaynakların tespiti, korunması, en avantajlı kullanımı için yer altı ve yerüstündeki fiziksel olguların analizinde.

ı. İzleme ve gözleme: Tamamlayıcı ve düzenleyici tedbirler geliştirmek üzere çalışılan süreci anlamak için tekrarlı olayları kaydetmek ve analiz etmekle çözüm üretmekte kullanılmaktadır [68].

3.5.2. Coğrafi bilgi sistemleri mantığı

Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımı ile çeşitli ölçek, renk ve projeksiyonlarda haritalar üretilebilmektedir [65]. CBS'nin avantajı, harita özellikleri arasındaki konumsal ilişkileri tanımlamaya olanak vermesidir. CBS'de bilgisayar ortamında grafik olarak üretilen harita bilgileri, grafik olmayan diğer yazılı bilgiler ile ilişkilendirilerek gerekli konumsal bilgi analizi yapılabilmektedir. CBS, veritabanında depolanmış verileri kullanarak harita üzerindeki detaylara ilişkin yeni bilgileri hesaplayabilmektedir. Belli bir bölgeye ait grafik ve grafik olmayan bilgiler katmanlar halinde bilgisayar ortamına girilebildiğinden, ilişkisel veri modeline uygun olan bu katmanlama yaklaşımı hem görüntüleme işlemlerinde hem de katmanların üst üste çakıştırılması ve analizi işlemlerinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır [69].

CBS'nin grafik verileri belirli katman yapısı içermektedir. Katmanlar ortak koordinat sistemi içinde aynı bölgenin farklı gruptaki elemanlarını içermektedir. Elemanlar arasındaki katman ayrımı, içerdikleri özelliklere göre temsil ettikleri gruplar dikkate alınarak yapılmaktadır.

CBS, değişik konumlardaki haritaları tek bir yığında toplama yeteneğine sahiptir. Bunun gereği olarak katman yapısının temel ilkesi, ortak gruplardaki harita elemanlarını gösterimdeki karmaşıklıktan kurtarmaktır. Ayrıca katman yapısı kullanılarak farklı temalardaki harita elemanlarının konumsal analizi yapılabilmektedir. Konumsal analiz sonucunda elemanların kesişim ve birleşimleri amaca göre yeni haritalar oluşturmaktadır.

Oluşturulan haritaların veritabanları ve veri tabanı bağlantıları CBS yardımıyla kurulmaktadır. Yeni harita elemanlarının öznitelik bilgileri, her iki

haritadan gelen bilgileri içermektedir. Katman yapısı, belirli bir hiyerarşik düzene göre kurulmaktadır. Öncelikle koordinat sistemi karelaj ağı oluşturulur, daha sonra bölgenin altlık haritası ve amaca uygun katmanlar yaratılır [65].

3.5.3. CBS ile hava sahası analizi

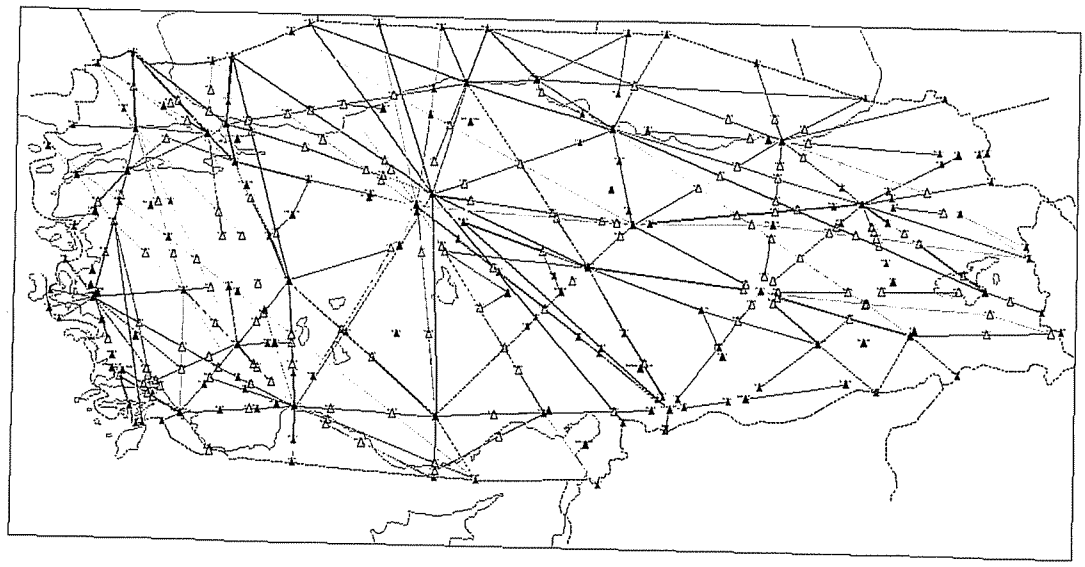
Bu çalışmada hava sahası bölünmesi işlemi için gerek araştırmacıların göstermiş olduğu analitik yaklaşımlar, gerekse hava sahasının 3 boyutta tanımlanabilmesi için sağlayabileceği kolaylıklar göz önünde bulundurularak ızgara tekniği dikkate alınmıştır. Bu kapsamda çalışmanın bu bölümünde *Hava Sahası Analiz Yöntemi* başlığı altında tanıtılan Coğrafi Bilgi Sistemi vasıtasıyla şu ana kadar yapılan işlem basamakları anlatılacaktır.

Çalışmada öncelikle hava sahası sektörizasyon modelinin uygulama alanı olarak düşünülen Türkiye hava sahasının 1/2.000.000 ölçekli yol hava sahası haritası, yeni teknoloji CBS yazılımı olan Geomedia 6.0 Professional kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu işlem, haritanın tarayıcıdan geçirilmesi, jpg formatında programa aktarılması ve ülke koordinatlarına oturtulması amacıyla rektifiye edilmesini kapsamaktadır. Daha sonra harita üzerindeki standart geliş-gidiş yolları, seyrüsefer yardımcılarıyla tanımlanmış 64 adet nokta, coğrafik koordinatlarla tanımlanmış 100 adet rapor noktası ve 148 adet fiks noktası manuel olarak tek tek tanımlanmış ve öznitelikleri ortaya koyulmuştur. Haritanın oluşturulmasında Havacılık Enformasyon Yayını-AIP 2007-2008 güncellemeleri dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda sayısallaştırma ve bir takım veri işleme yöntemleri kullanılarak oluşturulan hava sahası haritası Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Çalışmanın bir sonraki adımında, Devlet Hava Meydanları Yol Kontrol Merkezi'nden temin edilen ve 2007 yılının en yoğun günü olan 26 Ağustos tarihine ait pik saat trafik verileri programa aktarılmıştır. Türk hava sahasına ait trafik miktarı analiz verileri, Ek 4've Ek 5'te verilmiştir. Bu doğrultuda trafik verileri, coğrafi koordinat ataması ile program için uygun formata dönüştürülmüş ve çalışma ortamına aktarılmıştır.

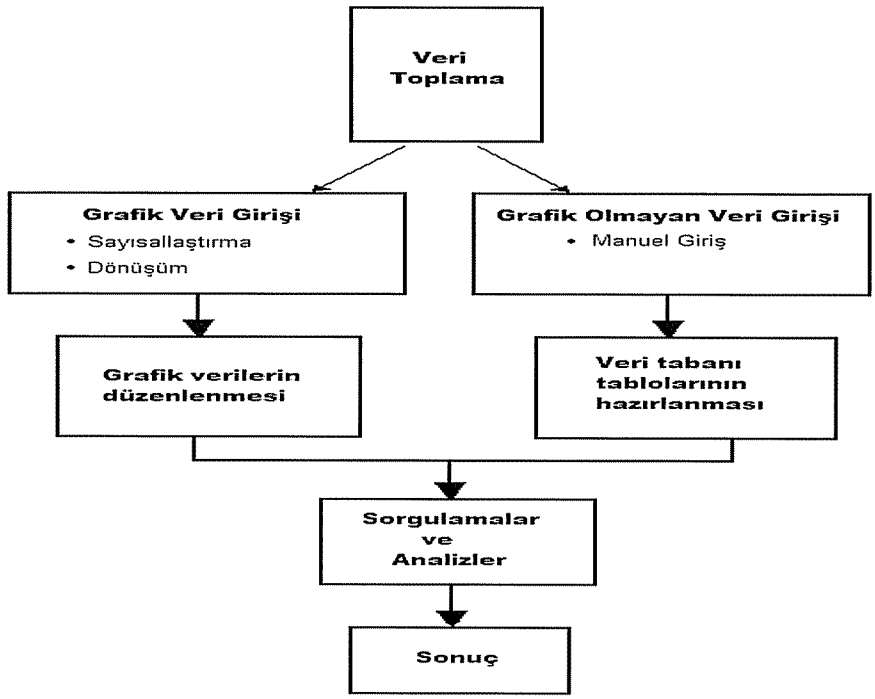
Çalışmanın ilerleyen aşamalarında analiz işlemlerini gerçekleştirmek ve çözüm önerileri geliştirebilmek amacıyla mevcut uçuş verileri kullanılarak enlem,

boylam, irtifa ve zaman boyutu da göz önünde bulundurularak 4 boyutlu bir hava sahası modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3.2.Türkiye yol hava sahası.

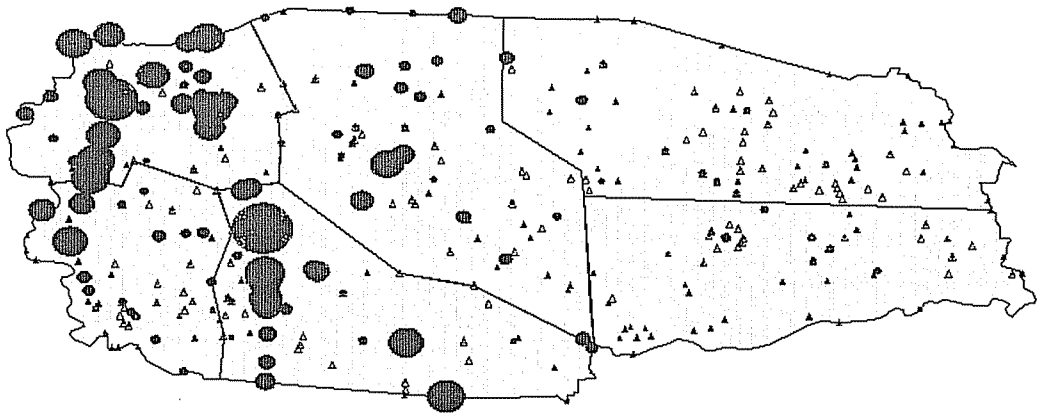
Yukarıda sözü edilen işlem basamakları için CBS organizasyon şemasından esinlenerek bu çalışma için oluşturulan algoritma, Şekil 3.3'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. CBS ile oluşturulan hava sahası modeli işlem basamakları.

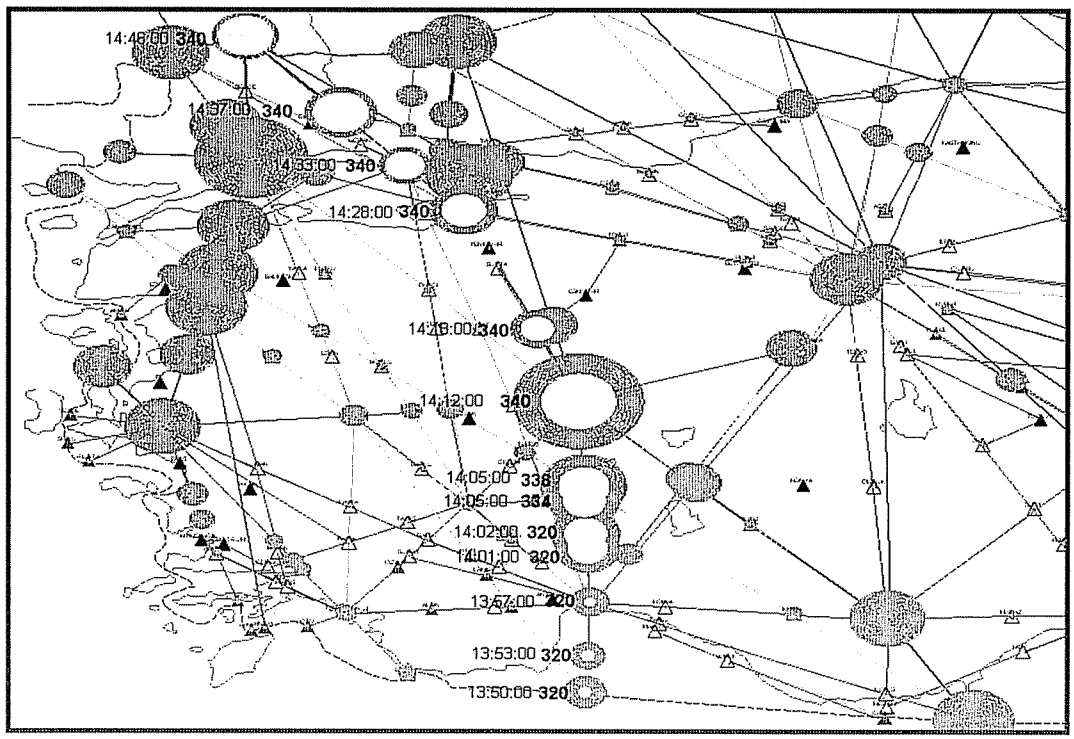
3.5.3.1. CBS ile sorgulama ve analiz örnekleri

Şekil 3.4'de 2 pik saatlik zaman diliminde trafiğin Türkiye hava sahası üzerindeki noktasal dağılımı gösterilmiştir.

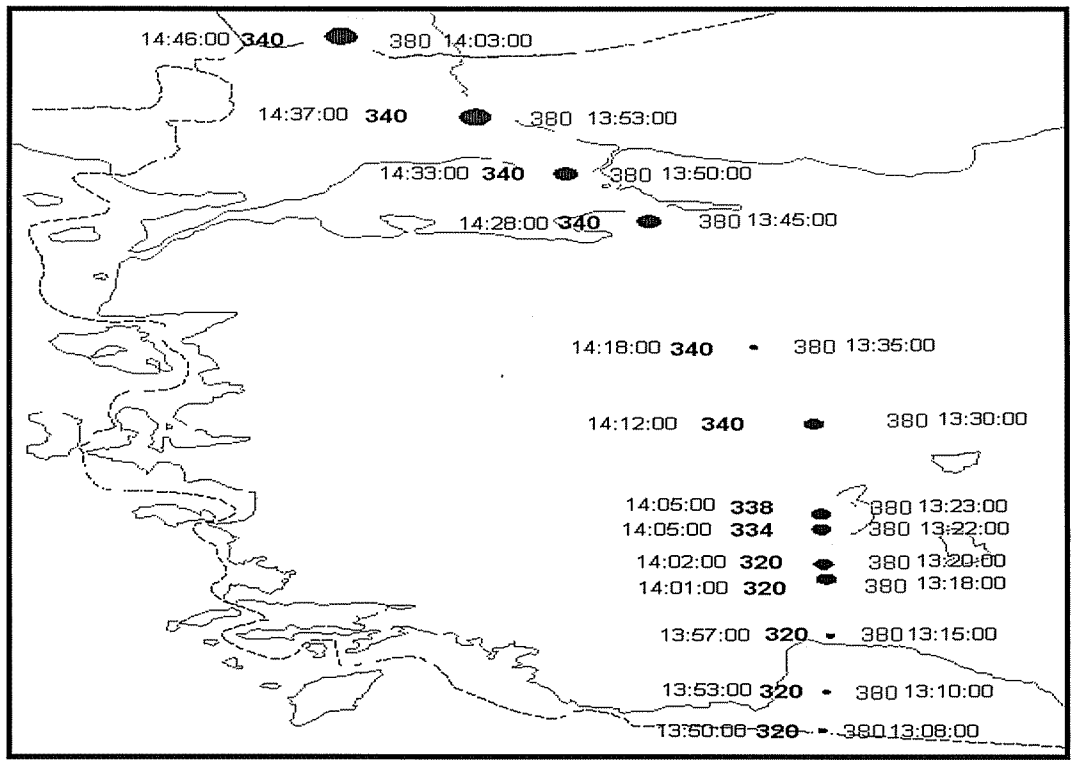


Şekil 3.4. Pik zaman diliminde noktasal trafik dağılımı.

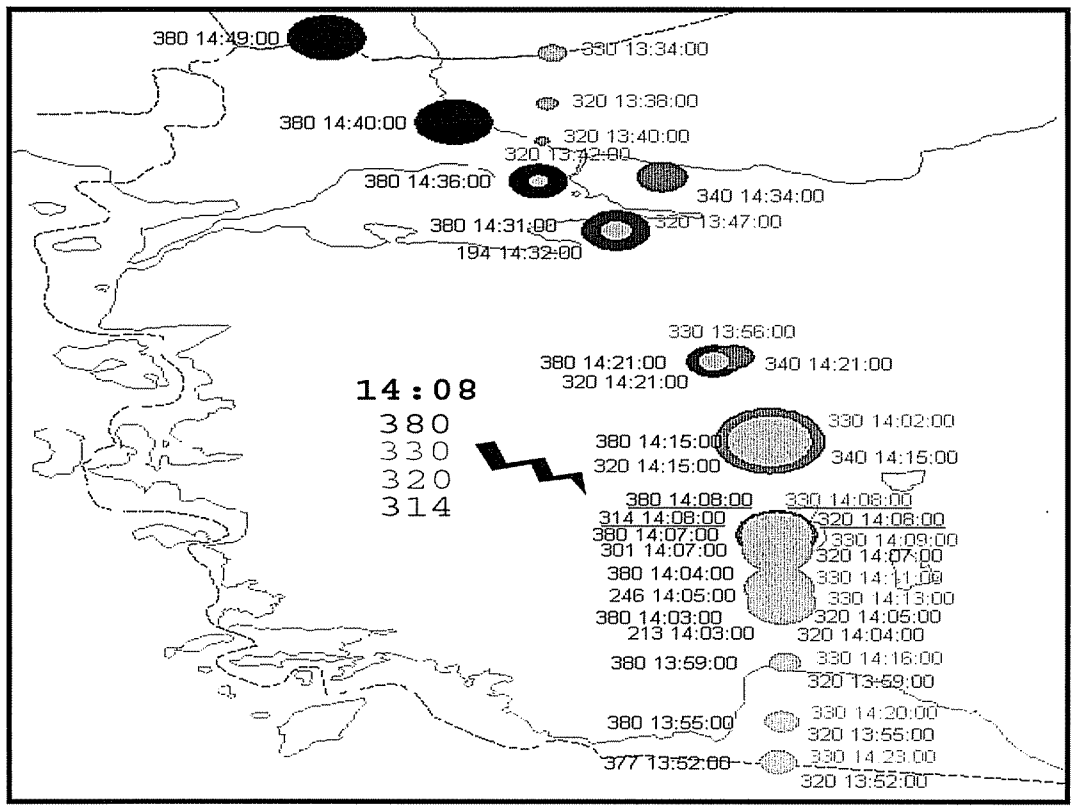
Mevcut trafik verileri ile trafiğin konumsal, zamansal ve uçuş seviyesine göre dağılım analizleri Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de örnek olarak verilmiştir.



Şekil 3.5. Bir uçuş yörüngesi örneği.



Şekil 3.6. Zaman ve irtifaya bağlı farklı uçak yörüngelerinin izlenmesi örneği.



Şekil 3.7. Aynı zaman diliminde, aynı uçuş yörüngesinde, farklı irtifalarda gerçekleşen uçuşlar.

3.5.3.2. CBS ile uygulanan ızgara temelli bölme yaklaşımı

Dünyanın şekli tam bir küre olmayıp kutuplardan biraz basık, Ekvator bölgesinde ise daha şişkin küreye yakın bir şekildir. Dünyanın bu özel şekline GEOİD denir. Ortalama yarıçapı 6367 km, ortalama çevresi ise 40.000 km'dir. Yerin ekvator çapı ile kutup yarıçapı arasında yaklaşık 42 km'lik bir fark vardır. Ancak tüm bu şekilsel özelliklerine karşın pratikte seyrüsefer amaçları açısından dünyanın şeklinin tam bir küre olduğu kabul edilir.

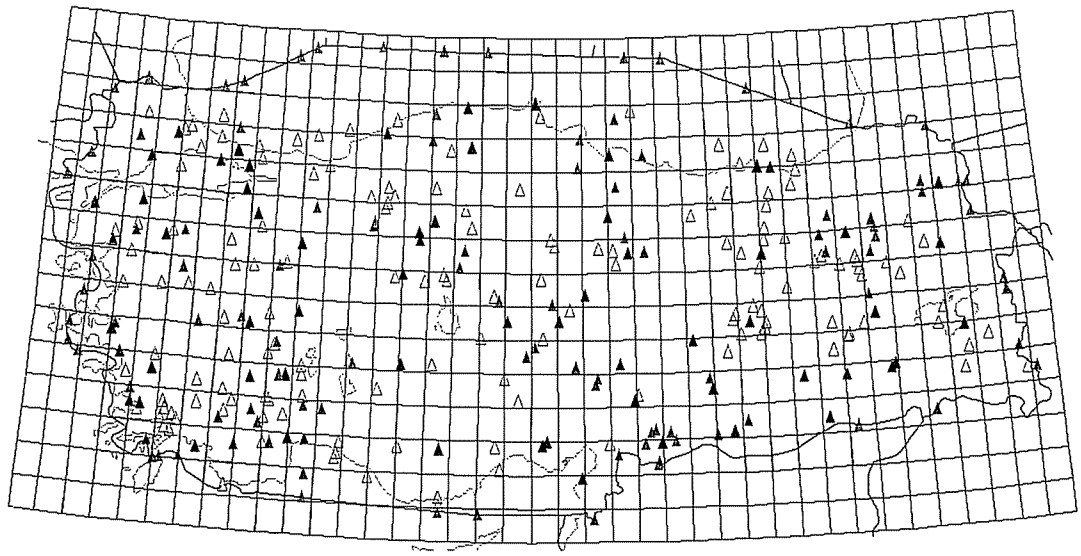
Dünyanın koordinat sisteminin oluşturulmasına olanak sağlayacak iki sabit noktası vardır. Bunlar Kuzey ve Güney Kutupları'dır. Üçüncü referans noktası ise dünyanın eksenine dik olan, küreyi eşit iki parçaya ayıracak biçimde geçtiği varsayılan ekvatordur. Bir yerin coğrafi konumunun tam olarak belirlenmesi amacıyla enlem ve boylamlar kullanılır.

Enlem çizgileri, ekvatora paralel olarak 1°'lik açı aralıkları ile çizildiği varsayılan dairelerdir. 90 tanesi Güney, 90 tanesi Kuzey yarım kürede olmak üzere toplam 180 tanedirler. Kutuplara doğru gidildikçe çevre uzunlukları azalır (kutup noktasında 0). İki enlem arası ise her yerde 111 km'dir.

Boylam çizgileri, bir kutuptan diğerine uzanan ve ekvatoru dik olarak kesen 1°'lik açı aralıkları ile çizilmiş çemberlerdir. 180 batı, 180 doğu yarım kürede olmak üzere toplam 360 tanedir. Aralarındaki uzaklık sadece ekvator üzerinde 111 km'dir. Kutuplara gidildikçe bu uzaklık daralır [70].

Türkiye, coğrafi konumu itibariyle 36 °- 42 ° Kuzey enlemleri ile 26 °- 45 ° Doğu boylamları arasında yer almaktadır. Bu çalışmada harita üzerindeki coğrafik koordinatlar referans alınarak 0.5° aralıklarla kare ızgaralara ayrıştırma yaklaşımı kullanılmıştır. Her bir kare birimin kenar uzunluğu yaklaşık 55,5 km (30 NM)'dir. Bu şekilde harita, her biri ayrı bir eleman olarak tanımlanan ve her biri hizmet bölgesi olarak adlandırılan 585 kareye bölünmüştür (Şekil 3.8).

Şekilde de görüldüğü üzere bazı kare birimlerin ülke sınırları dışında kalması nedeni ile bu birimler çıkartılarak Türk hava sahasının 471 kare ızgara birimden oluştuğu saptanmıştır.



Şekil 3.8. Hava sahası için uygulanan karelaj işlemi.

3.6. Toplam Hava Sahası İş Yükü Modeli

Bir önceki bölümde, hava trafik kontrolör iş yükü ölçüm yöntemleri ve modelleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bugüne kadar çok sayıda araştırma yapılmış olmasına rağmen, kontrolör iş yükünün matematiksel olarak tanımlanmasındaki güçlük dikkati çekmektedir. Hava taşımacılığı, oldukça dinamik ve yapısal olarak da karmaşık bir sistemdir. Dolayısıyla hava trafiğinin emniyetli, etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesinden sorumlu olan kontrolörler, çok sayıda uçağa aynı anda ve uluslararası standartlarda tanımlanan prosedürler çerçevesinde hizmet vermek durumundadır. Neticede oldukça karmaşık ve zor bir görevi yerine getirmektedirler.

Kontrolör iş yükü, yöntem ve tecrübe açısından direk olarak gözlenemezken, ancak gözlenebilir davranışlardan yapılan çıkarımlarla elde edilebilir. Bu nedenle iş yükü ölçümleri; sübjektif, davranışsal ve fizyolojik olmak üzere 3 şekilde sınıflandırılmaktadır. Günümüzde Avrupa'daki hava sahası kapasite analizlerinde bir ATC sektörü için kabul edilebilir iş yükünün belirlenmesinde, fiziksel ve zihinsel görevlere karşı gelen zaman esaslı ölçümler önerilmektedir. Bu gibi bir ölçüm, görev zamanı esaslı kontrolör iş yükü ölçümü olarak düşünülebilir [71]. Bu kapsamda çalışmada mevcut iş yükü literatüründe

özellikle 90'lı yıllardan sonra gerçekleştirilen dinamik yoğunluk esaslı çalışmalar göz önünde bulundurularak (Laudeman ve ark. [29], Benkouar ve ark. [41] ve Yousefi [49]) trafik özellikleri ve görev zamanı esasına dayalı "*Toplam Hava Sahası İş Yükü Ölçüm Modeli*" geliştirilmiştir.

3.6.1. Trafik özellikleri ve görev zamanı esasına dayalı olarak geliştirilen toplam hava sahası iş yükü modeli

Toplam hava sahası iş yükü modelinde hava trafik kontrolörleri için belirlenen 4 iş yükü değişkeni aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Bunlar;

1. İzleme İş Yükü ($W_İ$),
2. Çakışma Tespit ve Çözüm İş Yükü (W_{CTC}),
3. Koordinasyon İş Yükü (W_K),
4. Uçak Hareket Değişim İş Yükü (W_H).

Her bir sektör için toplam hava sahası iş yükü, bu dört iş yükü değişkeninin toplamı olarak belirlenecektir.

$$\text{Toplam Hava Sahası İş Yükü} = W_İ + W_{CTC} + W_K + W_H \tag{3.1}$$

- ***İzleme İş Yükü***; Sektörden geçen uçak sayısı ve maksimum uçuş süresi ile ilgilidir.

$$W_İ = F_İ \times (N \times T) \tag{3.2}$$

Denklem (3.2)'de;

$F_İ$: Faaliyet ağırlık katsayısı,
N : Sektörden geçen uçak sayısı,
T : Maksimum uçuş süresidir.

- ***Çakışma Tespit ve Çözüm İş Yükü***; Sektörden geçen uçak çiftleri için yakınlıkların ve çarpışma tehlikelerinin tespit edilmesi ile ilgilidir. Çözüm ise uçakları ayırmak için kullanılan hız veya seviye değişikliği yöntemlerine göre belirlenir.

Çakışma tehlikeleri, uçak izleri ve uçuş aşamaları (düz-tırmanma-alçalma) ile belirlenir. Bu kapsamda ICAO ilgili dokümanında [72] tanımlanan aynı yönlü, karşı yönlü ve takip olarak adlandırılan farklı çarpışma tehlikesi tipleri için uçak çiftleri arasındaki zaman farkı parametresi ≤ 1 dk olarak dikkate alınmıştır.

- Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde uçan trafikler arasındaki çakışmalar (C1)
- Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerdeki trafikler arasındaki çakışmalar (C2)
- Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmalar (C3)
- Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmalar (C4)
- Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmalar (C5)

$$W_{CTC} = F_C \times [(N_{C1} \times C_{C1} \times T_{CS1}) + (N_{C2} \times C_{C2} \times T_{CS2}) + (N_{C3} \times C_{C3} \times T_{CS3}) + (N_{C4} \times C_{C4} \times T_{CS4}) + (N_{C5} \times C_{C5} \times T_{CS5})] \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'de;

F_C : Faaliyet ağırlık katsayısı,

N_{C1}, N_{C2}, N_{C3}, N_{C4}, N_{C5} : Uçak sayısı,

C_{C1}, C_{C2}, C_{C3}, C_{C4}, C_{C5} : Çakışma tipi ağırlık faktörü,

T_{CS1}, T_{CS2}, T_{CS3}, T_{CS4}, T_{CS5} : İlgili tespit ve çözüm faaliyet süresidir.

- ***Koordinasyon İş Yükü***; FIR içi ve FIR dışı olarak gerçekleştirilen koordinasyon faaliyetleri ile ilgilidir. Bu faaliyetler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

<u>FIR içi</u> :

- Aynı ACC birimi içerisindeki sektörler arası koordinasyon (K1)
- Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon (K2)
- Askeri ünitelerle koordinasyon (K3)

<u>FIR dışı</u> :

- Komşu ACC birimleri ile koordinasyon (K4)

$$W_K = F_K \times [(N_{K1} \times C_{K1} \times T_{KS1}) + (N_{K2} \times C_{K2} \times T_{KS2}) + (N_{K3} \times C_{K3} \times T_{KS3}) + (N_{K4} \times C_{K4} \times T_{KS4})] \quad (3.4)$$

Denklem (3.4)'de;

F_K : Faaliyet ağırlık katsayısı,

$N_{K1}, N_{K2}, N_{K3}, N_{K4}$: İlgili koordinasyon faaliyetindeki uçak sayısı,

$C_{K1}, C_{K2}, C_{K3}, C_{K4}$: İlgili koordinasyon faaliyeti ağırlık katsayısı,

$T_{KS1}, T_{KS2}, T_{KS3}, T_{KS4}$: İlgili koordinasyon faaliyet süresidir.

- ***Uçak Hareket Değişim İş Yükü***; Farklı uçak hareketleri ve bu talimatlar için harcanan süre ile ilgilidir. Farklı uçak hareketi kapsamında göz önünde bulundurulan kontrol faaliyetleri aşağıda verilmiştir.

Uçuş seviyesi : Uçakların tırmanması veya alçalması için verilen izinle ilgilidir (H1).

Hız : Uçaklara verilen hız değişikliği talimatı ile ilgilidir ve 10 knot veya 0,02 Mach'tan fazla hız değişikliği dikkate alınmaktadır (H2).

Uçuş başı : Uçak yörüngesi dikkate alınarak 15°'den fazla uçuş başı değişikliğini kapsar (H3).

Direkt rota : Uçakların tanımlanmış rotalar dışında direkt rotalarda uçması için verilen izinle ilgilidir (H4).

$$W_H = F_H \times [(N_{H1} \times C_{H1} \times T_{HS1}) + (N_{H2} \times C_{H2} \times T_{HS2}) + (N_{H3} \times C_{H3} \times T_{HS3}) + (N_{H4} \times C_{H4} \times T_{HS4})] \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'de;

F_H : Faaliyet ağırlık katsayısı,

$N_{H1}, N_{H2}, N_{H3}, N_{H4}$: İlgili hareket değişim faaliyetindeki uçak sayısı,

$C_{H1}, C_{H2}, C_{H3}, C_{H4}$: İlgili hareket değişim faaliyeti ağırlık katsayısı,

$T_{HS1}, T_{HS2}, T_{HS3}, T_{HS4}$: İlgili hareket değişim faaliyet süresidir.

3.6.2. İş yükü ağırlık katsayılarının belirlenmesi

İş yükünün doğru bir şekilde modellenebilmesi ve ilgili ağırlık katsayılarının belirlenmesi, hava sahası sektör modeli için oldukça büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen toplam hava sahası iş yükü

modeli için ilgili ağırlık katsayılarının ve ilgili ortalama görev sürelerinin belirlenmesi amacına yönelik olarak anket yöntemi kullanılmıştır.

Çalışmada geliştirilen hava sahası sektörizasyon modelinin uygulama alanı Türkiye hava sahasıdır. Türkiye hava sahası, Ankara ve İstanbul olmak üzere 2 Yol Kontrol Merkezi'nden yönetilmektedir. Bu kapsamda anket araştırmasının evrenini Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMİ)'nde görev yapmakta olan hava trafik yol kontrolörleri oluşturmaktadır.

3.6.3. Anket sorularının ve formunun tasarlanması

Anket formunun hazırlanması çalışmanın en önemli bölümlerinden biridir. Anket soruları hazırlanırken konu ile ilgili uzman görüşlerine başvurulmuştur. Anket formunda açık ve kapalı uçlu sorular ile Likert tipi sayısal ölçek soruları kullanılmıştır.

Anket formu ve sorular hazırlandıktan sonra anketin güvenilirliğini test etmek amacıyla 20 adet çoğaltılarak Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulu Hava Trafik Kontrol Bölümü öğretim elemanları ve Ankara-İstanbul Yol Kontrol merkezlerinde görev yapmakta olan kontrolörlerle bir deneme uygulaması yapılmıştır. Likert ölçeğine göre hazırlanan tutum cümleleri içerisinde güvenilirliği düşüren ve ölçeğin iç tutarlılığını bozan cümleler anketten çıkartılarak, diğer eksiklikler de belirlenerek anket formu, yapılan deneme çalışması doğrultusunda yeniden düzenlenmiştir. Anket çalışmasından elde edilen verilerin analiz edilmesinde, en önemli stratejik karar destek sistemlerinden ve istatistiksel analiz yazılımlarından biri olan SPSS 15 kullanılmıştır.

Hazırlanan anket formunda sorular 20 ana başlıkta toplanmış olup, bu başlıklar altında toplam 43 adet soru bulunmaktadır. Likert tipi sayısal ölçeğin kullanıldığı 14-15-17 ve 19. sorular, kendi içerisinde ayrı ayrı tutum cümlelerinden oluşmaktadır. Bu sorulardan 22 tanesi kısa cevaplı açık uçlu, 4 tanesi ise kapalı uçludur. Likert tipi sayısal ölçeklendirme, cevaplayıcıların verilen yargılara genel katılıp katılmaması ile ilgilidir ve değişik format ve şekillerde de uygulanabilir. Bu doğrultuda özellikle kontrolörler açısından hangi kontrol faaliyetlerinin daha fazla iş yükü meydana getirebileceği cevabının

arandığı 14. soru ile sözü geçen kontrol faaliyetlerinin iş yüklerinde ne derecede etkili olduğu cevabının arandığı 15-17 ve 19. sorularda beş seçenekli Likert Ölçeği tercih edilmiştir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen anket formu Ek 6'da verilmiştir.

3.6.4. Anketin uygulanması

Anket uygulama çalışması, Devlet Hava Meydanları İşletmesi'nden gelen onay doğrultusunda 2008 Mayıs ayı 3. haftası içerisinde sadece Ankara Yol Kontrol Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir.

Ankara Yol Kontrol Merkezin'de operasyonel olarak çalışan ve her biri 34 kişiden oluşan 4 ekip bulunmaktadır. Merkezden alınan personel sayısı ile ilgili bilgiler çerçevesinde anketin uygulandığı dönemde izinli ve raporlu personel dışında toplam 128 yol kontrolörü aktif olarak görev yapmaktadır. Tam sayım uygulaması ile gerçekleştirilen ankete 94 yol kontrolörü (% 73,4) katılmıştır. Anketten elde edilen veriler, SPSS'te analiz edilmek üzere Excel tablolarına işlenmiştir.

3.6.5. Anketin cevaplanma ve güvenilirlik yüzdeleri

Yapılan analiz neticesinde 94 anket geçerli olarak değerlendirmeye alınmıştır. Likert türünde sorulan soruların tamamı için Cronbach Alpha değerleri hesaplanarak güvenilirlik katsayıları bulunmuştur. Cronbach Alpha, içsel tutarlılığın ölçümünde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Alfa değeri, 0 ile 1 arası değerler alır ve kabul edilebilir bir değerin en az 0.7 olması gerekir [73].

Kontrolörlerin iş yükü faaliyetleri ve bu faaliyetler içerisinde yer alan ilgili görevler için verdiği önemin ölçüldüğü 17 maddelik Likert tipi ölçme aracının Cronbach Alpha değeri, 0.835 olarak hesaplanmıştır. Bu değerden de anlaşılacağı üzere Likert tipi ölçme aracı iç tutarlılık şartını sağlamaktadır.

3.6.6. Anket verilerinin çözümlenmesinde kullanılan yöntem

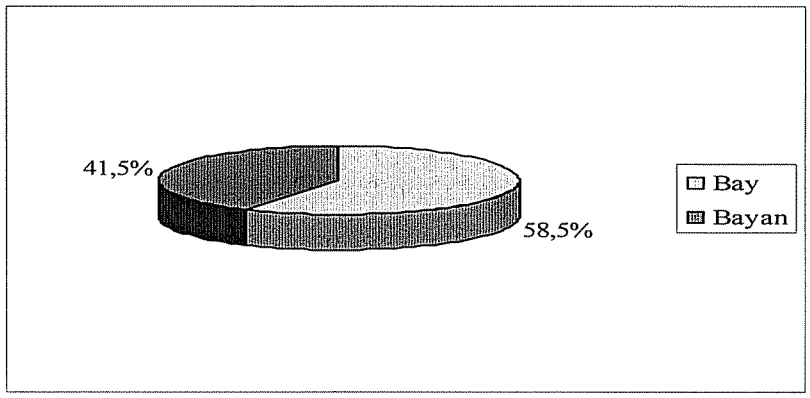
İncelenen iş yükü literatürü ile şimdiye kadar bu alanda yapılan çalışmalarda ilgili katsayıların regresyon, ortalama vb. gibi bir takım istatistiksel yöntemlere dayalı olarak hesaplandığı görülmektedir. Bu kapsamda ilgili faaliyet ağırlık katsayılarının ve görev sürelerinin hesaplanmasında Laudeman ve ark. [29] ile Sridhar ve ark. [19]'nın gerçekleştirdiği uygulamalardan yola çıkılarak ortalama değerler dikkate alınmıştır. Anket verilerinin çözümlenmesinde tanımlayıcı istatistikler, frekans, ortalama ve standart sapma gibi istatistiksel yöntemler ile grafiksel gösterimlerden yararlanılmıştır.

3.6.7. Bulgular

Toplam hava sahası iş yükü modelinde tanımlanan kontrol faaliyeti ağırlık katsayılarını belirlemek amacı ile Ankara Yol Kontrol Merkezi'nde uygulanan anket, 20 başlıktan oluşmaktadır. Her soru alt başlıklarla sıralanarak yorumlanmıştır.

3.6.7.1. Cinsiyetiniz

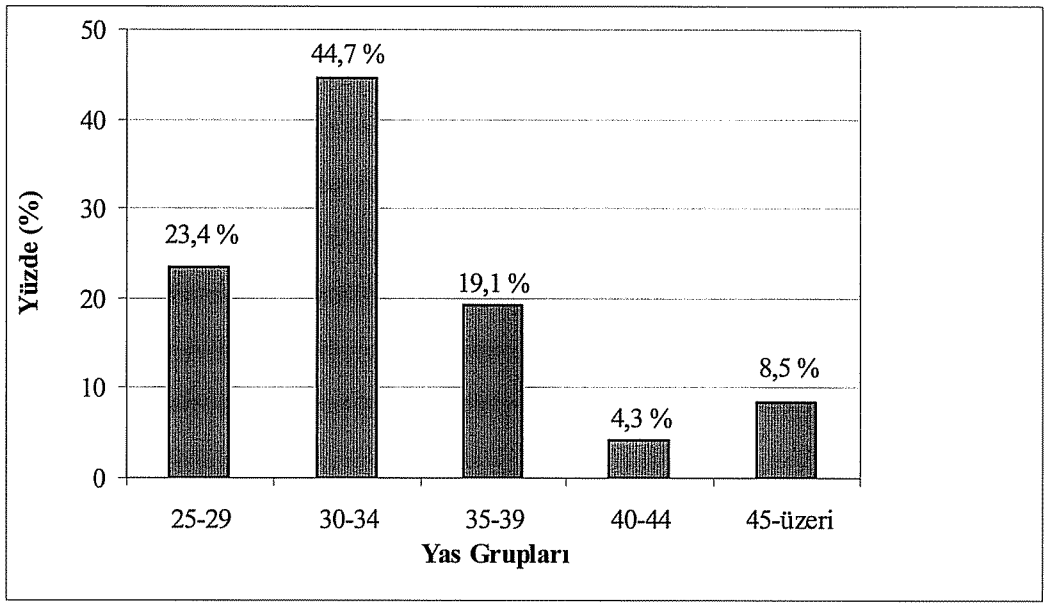
Şekil 3.9'da ankete katılan kontrolörlerin cinsiyete göre dağılımı ve yüzdeleri verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere ankete katılan 94 kontrolörden 55'i (% 58.5) bay ve 39'u (% 41.5) bayandır.



Şekil 3.9. Katılımcıların cinsiyete göre dağılımı.

3.6.7.2. Yaşınız

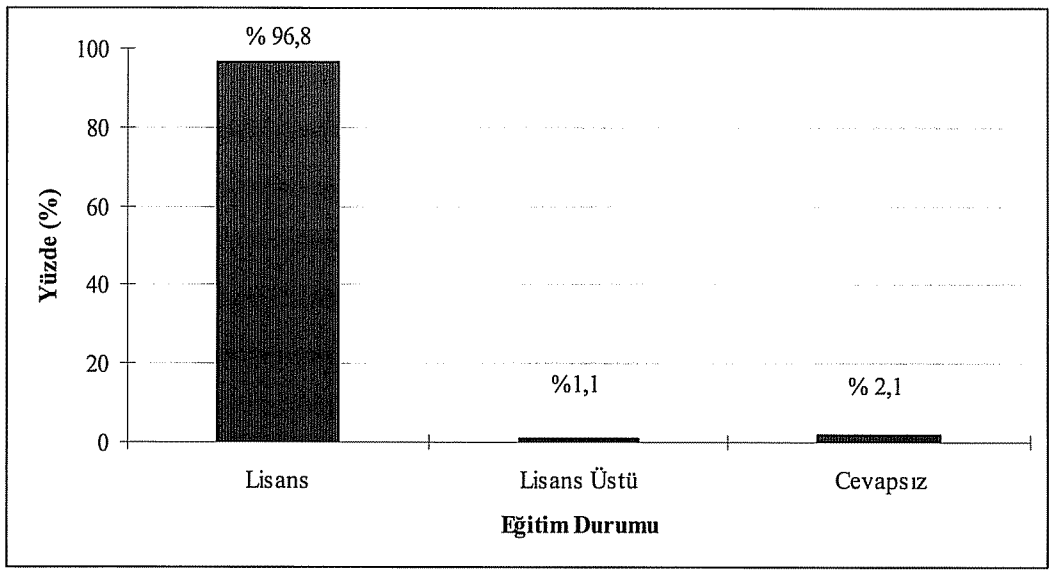
Şekil 3.10'da ankete katılan kontrolörlerin yaş grubuna göre dağılımı görülmektedir. Elde edilen verilere göre kontrolörlerin yaşları, 25 ilâ 53 arasında değişmektedir. Açık uçlu olarak sorulan bu sorudan elde edilen veriler, gruplandırılarak değerlendirilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere katılımcıların büyük çoğunluğu (% 44.7), 30-34 arası yaş grubunda yer almaktadır.



Şekil 3.10. Katılımcıların yaş gruplarına göre dağılımı.

3.6.7.3. En son mezun olduğunuz okul

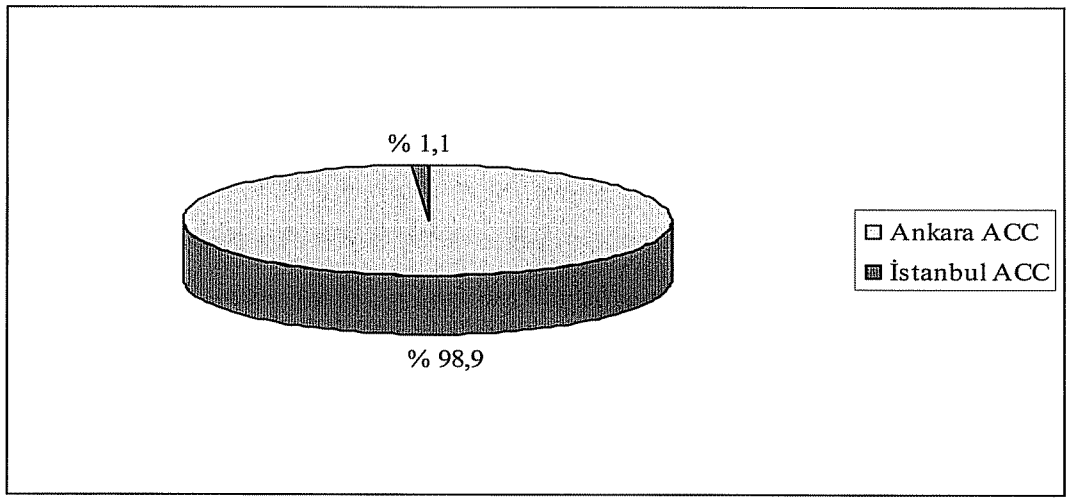
Ankete katılan kontrolörlerin mezun oldukları okul ve bölümler dikkate alınmaksızın eğitim durumu gruplandırılarak Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Buna göre cevap vermeyen 2 kontrolör (% 2.1) dışında tüm katılımcıların Türkiye'deki çeşitli üniversitelerin fakülte ve yüksek okullarından mezun olduğu, 1 kişinin de (% 1.1) lisans üstü eğitim yaptığı görülmektedir.



Şekil 3.11. Katılımcıların eğitim durumlarına göre dağılımı.

3.6.7.4. Çalıştığınız birim

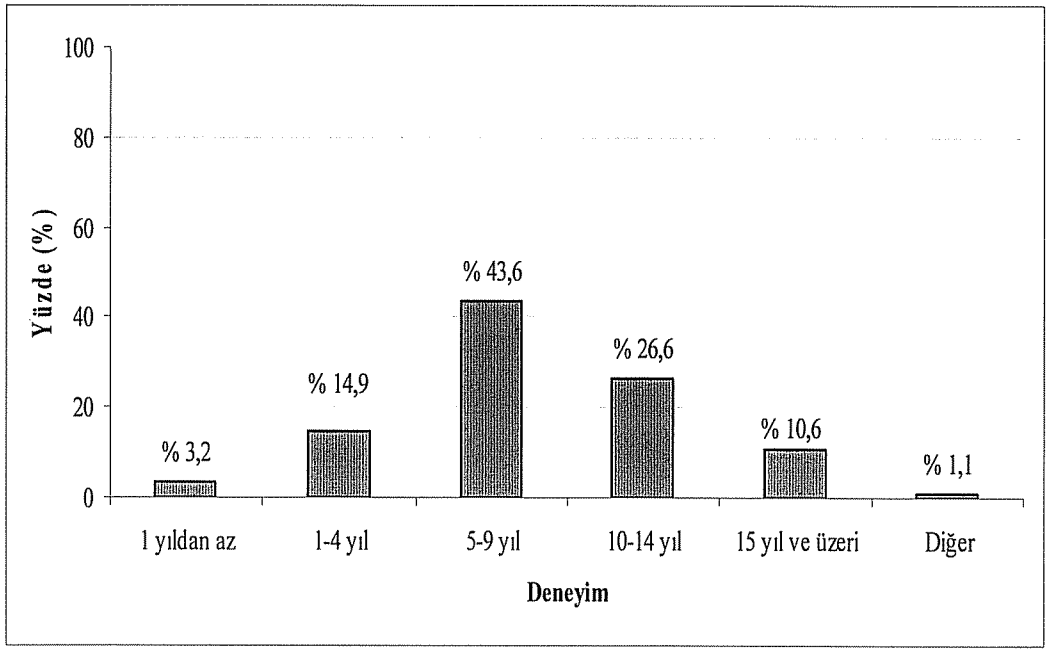
Anket çalışması, İstanbul ve Ankara Yol Kontrol Merkezleri'nde operasyonel olarak çalışan yol kontrolörlerine uygulanmak üzere tasarlanmıştır. Ancak anketin uygulandığı tarihlerde Türkiye'deki ATM Kaynaklarının Sistematik Modernizasyonu (SMART-Systematic Modernisation of ATM Resources in Turkey) projesi kapsamında bir ara modernizasyon geçiş dönemi söz konusudur. İstanbul Yol Kontrol Merkezi'ndeki yoğunluk nedeni ile DHMİ tarafından verilen izin doğrultusunda anket, sadece Ankara Yol Kontrol Merkezi'nde uygulanabilmiştir. Bu nedenle ankete katılan 93 kontrolör (% 98.9) Ankara ACC'de görev yapmakta olup, her iki seçeneği işaretleyen 1 kontrolöründe (% 1,1) daha önce İstanbul ACC'de operasyonel olarak çalıştığı görülmektedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Katılımcıların çalıştığı birimlere göre dağılımı.

3.6.7.5. Kaç yıldır kontrolör olarak çalışıyorsunuz?

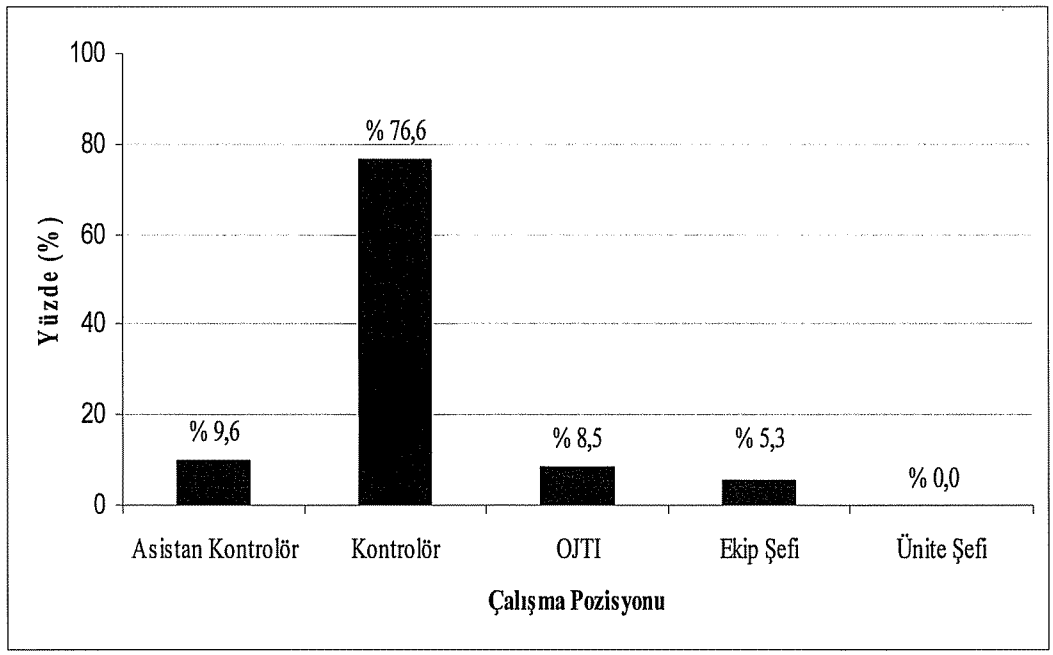
Ankete katılan 94 kontrolörün yıl bazında deneyimleri, 1 ay ile 29 yıl arasında değişim göstermektedir. Anketten elde edilen bu veriler, gruplandırılarak değerlendirilmiş ve Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Bu verilere göre ankete katılan kontrolörlerin yaklaşık % 80'sinin en az 5 yıllık iş deneyimine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 3.13. Katılımcıların deneyimlerine göre dağılımı.

3.6.7.6. Çalışma pozisyonunuz

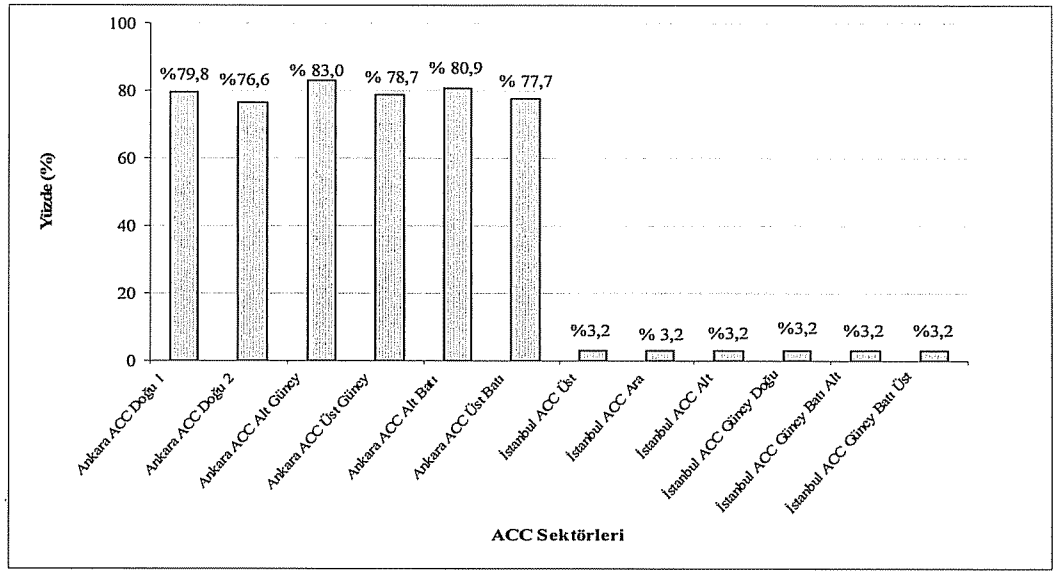
Ankete katılan 94 kontrolörün çalışma pozisyonlarına göre dağılımları Şekil 3.14'de verilmiştir. Bu verilere göre ankete katılanların yaklaşık % 90'ının kontrolör ve üstü pozisyonda çalıştığı görülmektedir.



Şekil 3.14. Katılımcıların çalışma pozisyonlarına göre dağılımı.

3.6.7.7. En çok hangi sektörde çalışıyorsunuz?

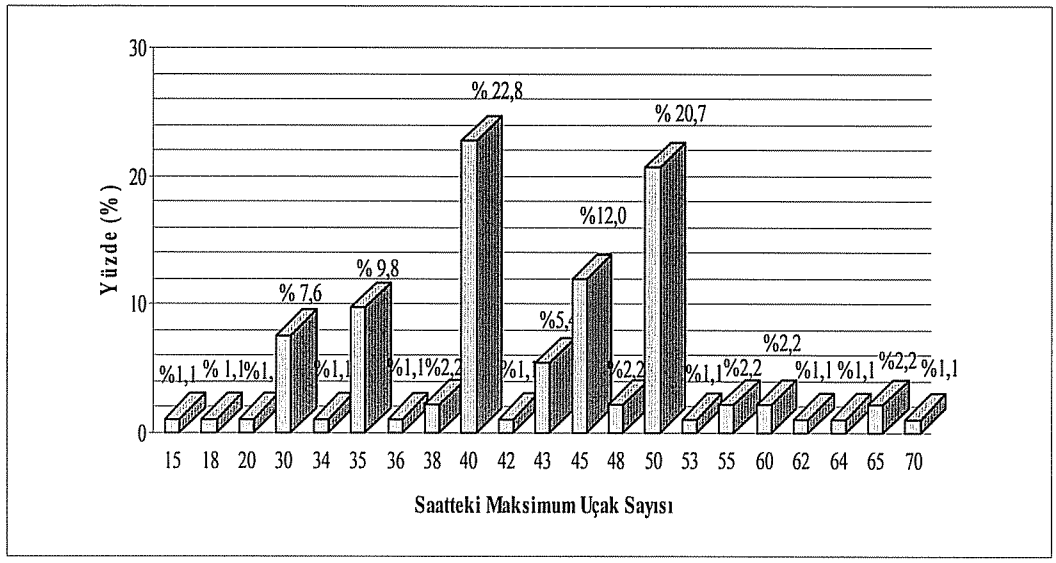
Kontrolörlerin en çok çalıştıkları sektörlere göre dağılımları Şekil 3.15'de verilmiştir. Bu verilere göre kontrolörlerin hemen hemen tüm sektörlerde görev aldığı söylenebilir. Grafikte de görüldüğü üzere katılımcıların % 3.2'sinin daha önce İstanbul FIR'ında çalıştığı anlaşılmaktadır.



Şekil 3.15. Katılımcıların en çok çalıştıkları sektörlere göre dağılımı.

3.6.7.8. Çalıştığınız ACC sektöründe yoğun trafik periyodunda Saatteki maksimum uçak sayısı nedir?

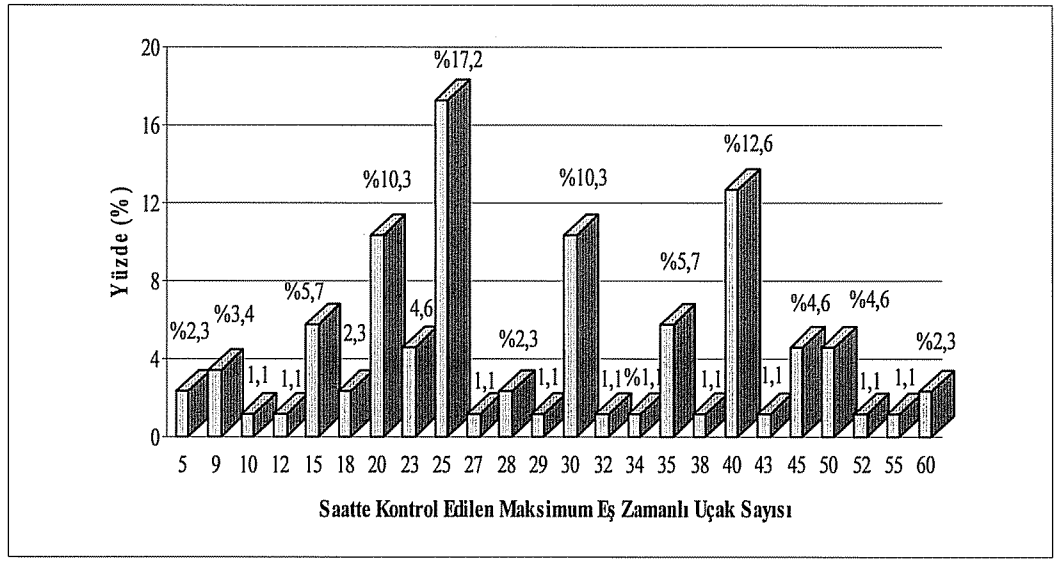
Şekil 3.16'da kontrolörlerin yoğun trafik periyodunda saatte kontrol ettikleri uçak sayısı için verdikleri yanıtların dağılımı verilmiştir. Katılımcıların yaklaşık % 62'lik bir bölümünün 40 ilâ 50 trafik yanıtı üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 3.16. Yoğun trafik periyodunda saatteki maksimum uçak sayısı dağılımı.

3.6.7.9. Çalıştığınız ACC sektöründe yoğun trafik periyodunda maksimum eş zamanlı uçak sayısı nedir?

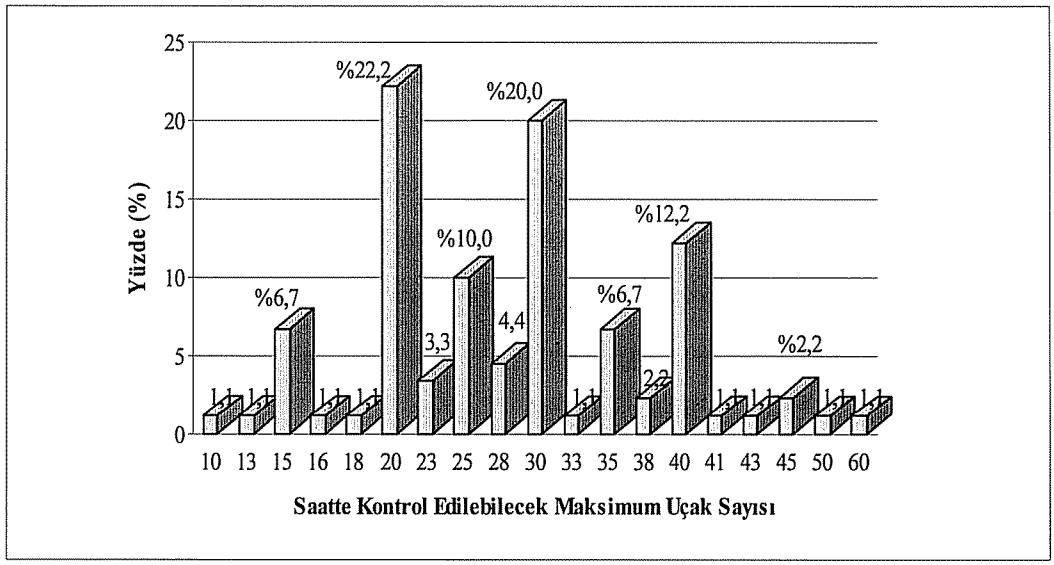
Şekil 3.17'de kontrolörlerin maksimum eş zamanlı uçak sayısı için verdikleri yanıtlar ve yüzde dağılımları verilmiştir. Ankete katılanların yaklaşık % 68'inin eş zamanlı uçak trafiği için 20 ilâ 40 uçak yanıtı üzerine yoğunlaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.17. Yoğun trafik periyodunda saatteki eş zamanlı maksimum uçak sayısı dağılımı.

3.6.7.10. Sizce bir ACC kontrolörünün saatte kontrol edebileceği maksimum uçak sayısı nedir?

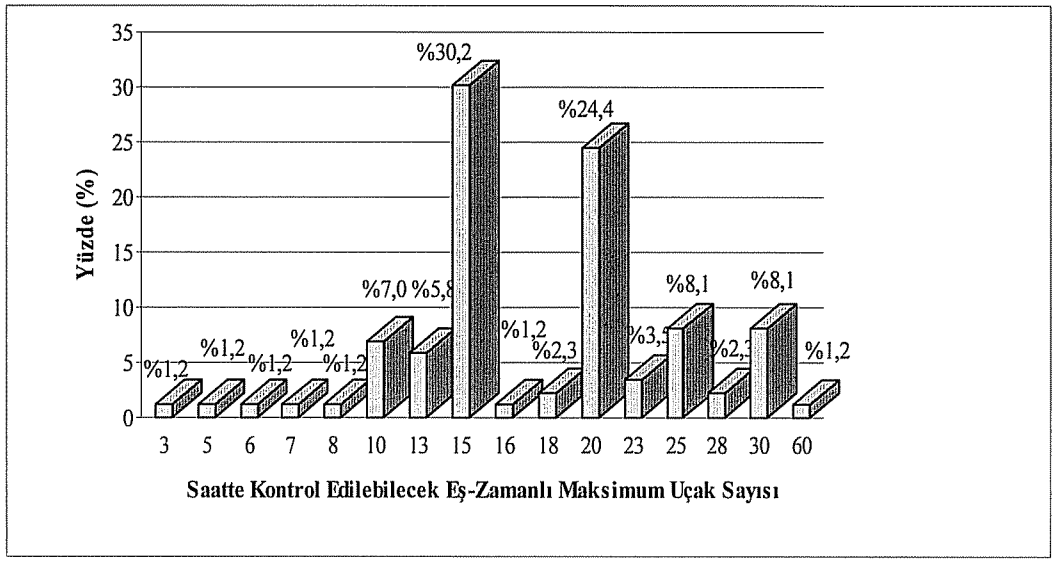
Şekil 3.18'de ankete katılan kontrolörlerin görüşlerinden elde edilen verilere göre saatte kontrol edilebilecek maksimum uçak sayısı grafiği verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi katılımcıların yaklaşık olarak % 82'si 20 ilâ 40 uçak arasında görüş bildirmiştir.



Şekil 3.18. Saatte kontrol edilebilecek maksimum uçak sayısı dağılımı.

3.6.7.11. Sizce bir ACC kontrolörünün eş zamanlı kontrol edebileceği uçak sayısı nedir?

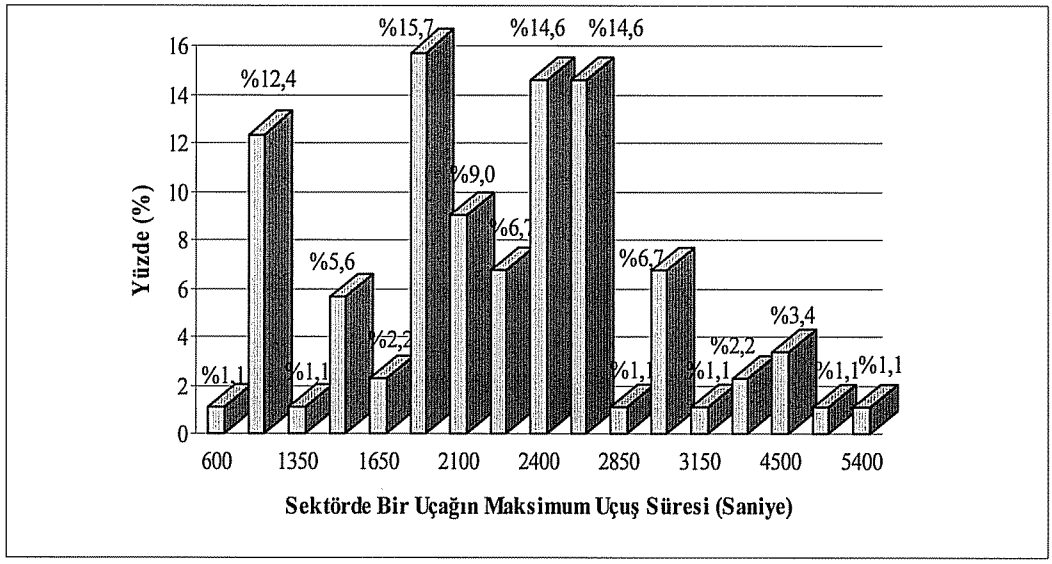
Şekil 3.19'da eş zamanlı kontrol edilebilecek uçak sayısı grafiği gösterilmiştir. Bu verilere göre kontrolörlerin % 60'a yakın bir bölümünün kontrol edilebilecek maksimum eş zamanlı uçak sayısı önerileri, 15 ile 20 uçak arasında olmuştur.



Şekil 3.19. Saatte kontrol edilebilecek eş-zamanlı maksimum uçak sayısı dağılımı.

3.6.7.12. Çalıştığınız sektörde bir uçak en fazla ne kadar süre uçmaktadır?

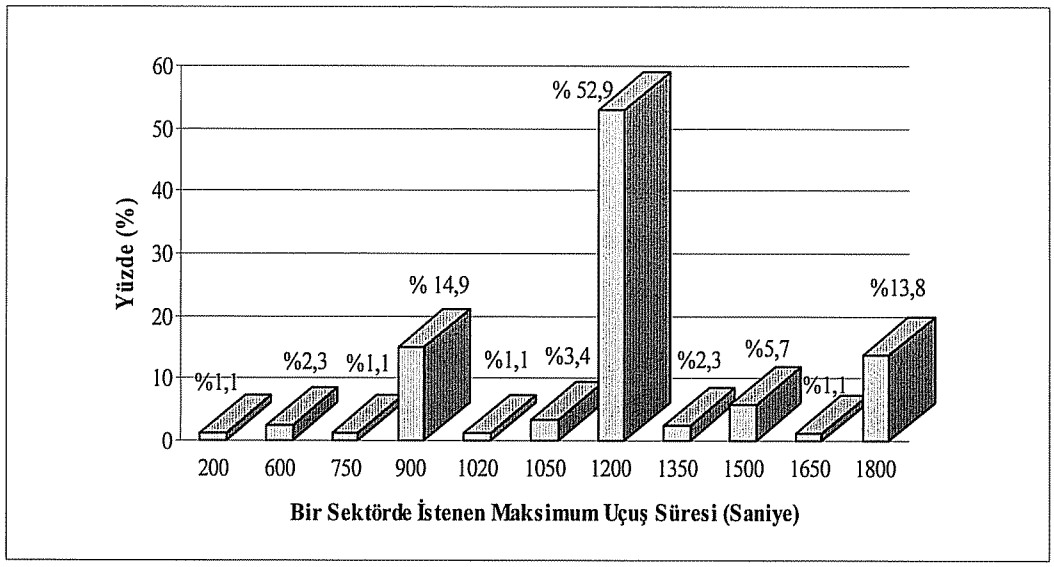
Şekil 3.20'de görüleceği üzere kontrolörlerin yaklaşık olarak % 83'ü, 1200 ilâ 2700 saniye arası meşguliyet süresi bildirmiştir.



Şekil 3.20. Bir uçağın sektörde en fazla uçuş süresi dağılımı.

3.6.7.13. Sizce bir uçağın bir sektörde maksimum uçuş süresi ne kadar olmalıdır?

Ankete katılan kontrolörler bir uçağın sektörde en fazla uçuş süresi için 200 ilâ 1800 saniye arasında değişen süre önerilerinde bulunmuşlardır (Şekil 3.21). Kontrolörlerden 46 (% 52.9)'sının görüşü, 1200 saniye şeklindedir.



Şekil 3.21. Bir uçağın sektörde uçması gereken en fazla uçuş süresi dağılımı.

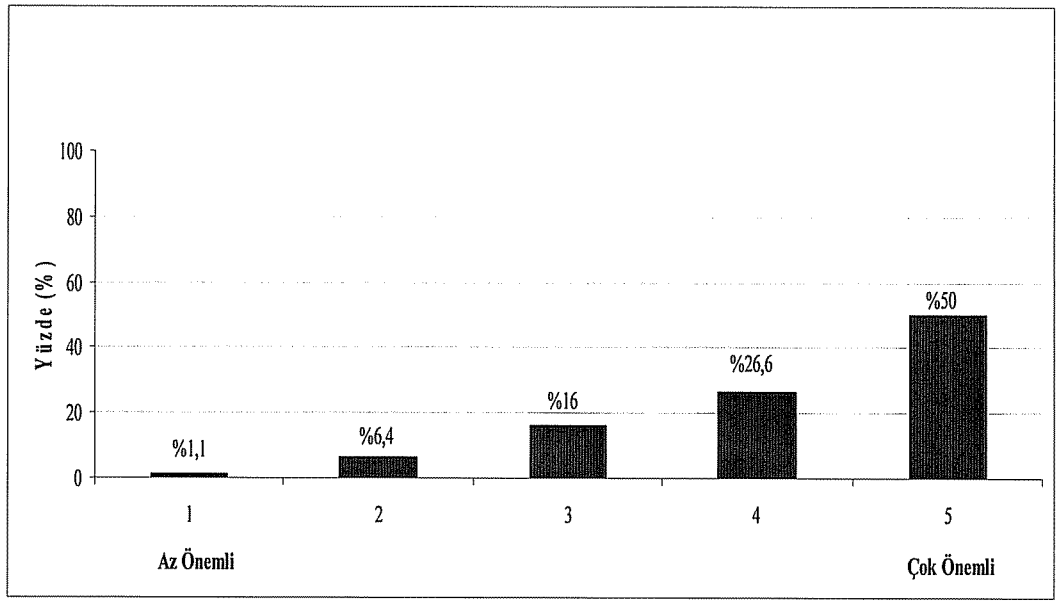
3.6.7.14. Kontrol faaliyetlerinin iş yükü önem derecesi

Ankete katılan kontrolörlerin çalışmaları sırasında meydana gelen iş yüklerine ilişkin olarak verdikleri yanıtların incelenmesiyle elde edilen veriler aşağıda değerlendirilmiştir.

a. İzleme faaliyetleri

"Az Önemli"den "Çok Önemli"ye doğru 5'li Likert tipi ölçek kullanılarak hazırlanan bu soru için ankete katılan kontrolörlerin verdikleri yanıtların frekans ve yüzdeleri incelenmiştir. Şekil 3.22'de kontrolörlerin izleme faaliyetine ilişkin olarak verdikleri yanıtların yüzdeleri görülmektedir.

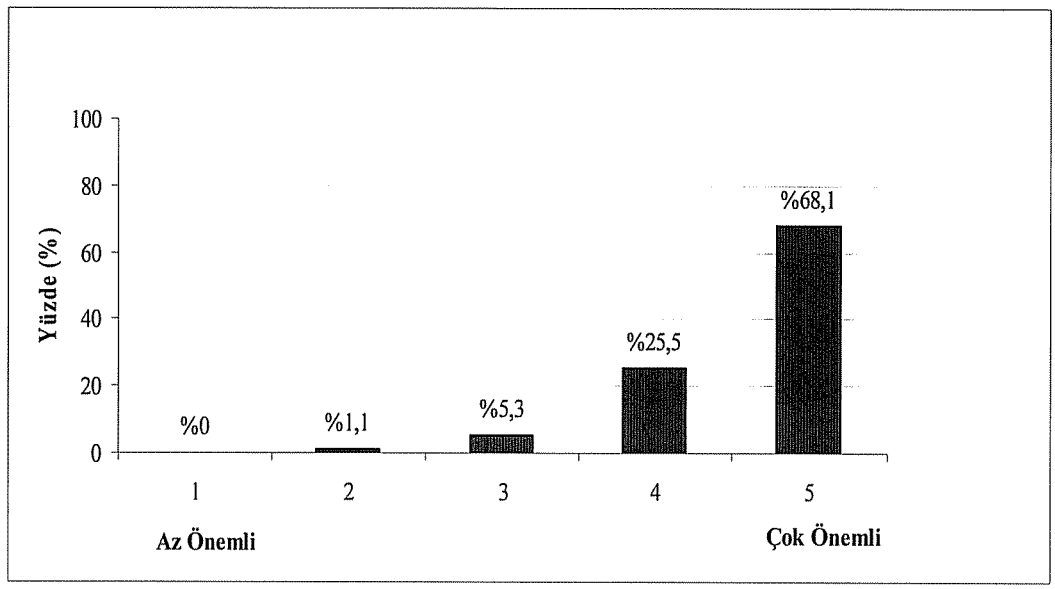
Bu verilere göre kontrolörlerin % 50'si, izleme faaliyetini çalışmalarında meydana getirdiği iş yükü bakımından çok önemli olarak nitelendirmişlerdir.



Şekil 3.22. İzleme faaliyeti önem derecesi.

b. Koordinasyon faaliyetleri

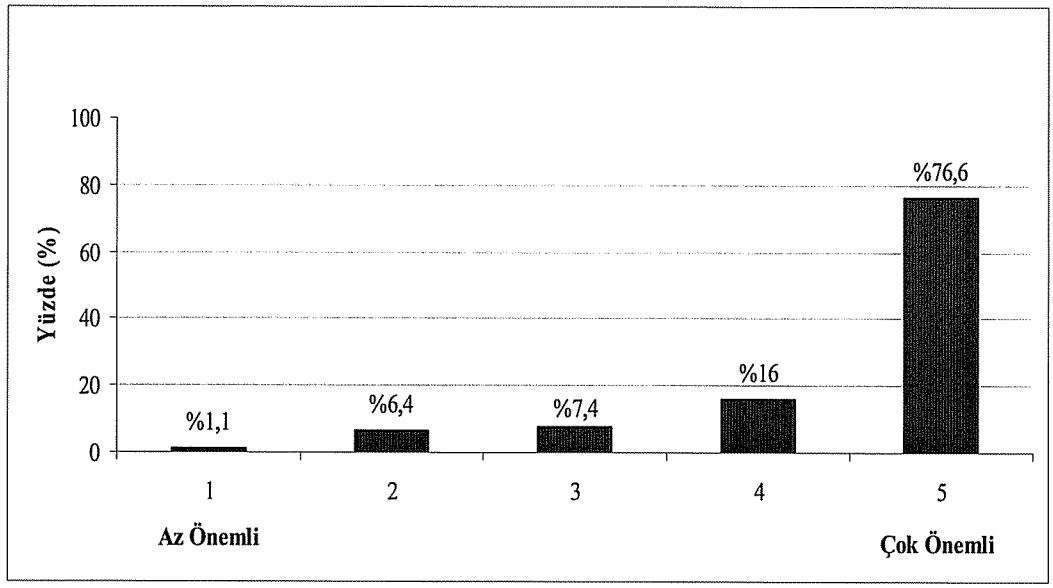
Şekil 3.23'de kontrolörlerin koordinasyon faaliyetine ilişkin olarak verdikleri yanıtların yüzdeleri görülmektedir. Kontrolörlerden % 68.1'i bu faaliyeti, meydana getirdiği iş yükü bakımından çok önemli olarak görmektedir.



Şekil 3.23. Koordinasyon faaliyeti önem derecesi.

c. Çakışma tespit ve çözüm faaliyetleri

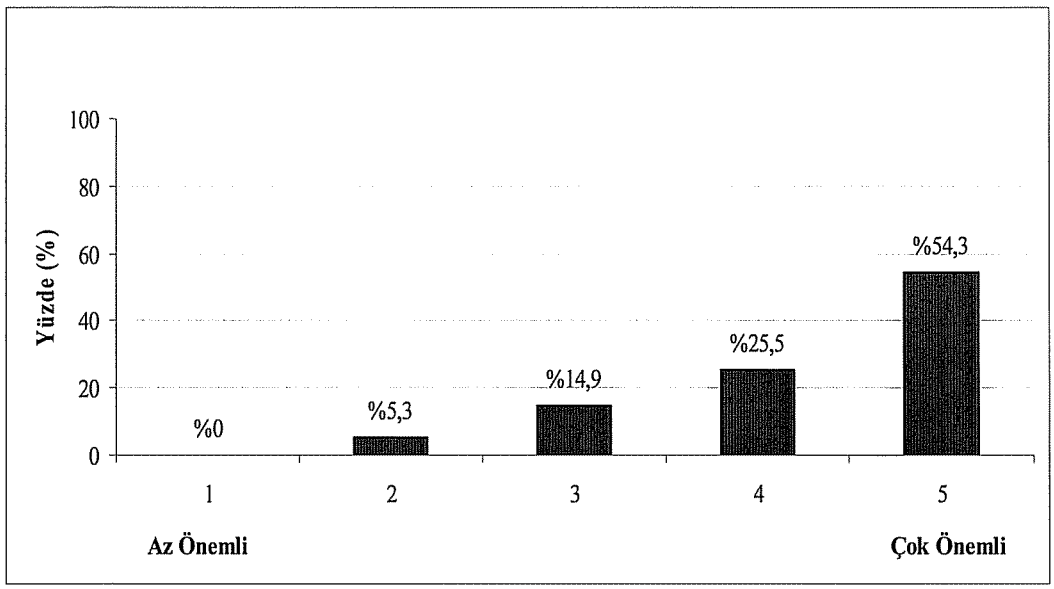
Şekil 3.24'de görüldüğü üzere uçaklar arasındaki çakışmaların tespit ve çözümü, iş yükü açısından kontrolörlerin yaklaşık % 77'si tarafından çok önemli olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.24. Çakışma tespit ve çözüm faaliyeti önem derecesi.

d. Uçak hareket değişim faaliyetleri

Şekil 3.25'de ankete katılan kontrolörlerin uçuş başı, hız, irtifa ve direkt rota gibi farklı uçak hareketleri için kontrol faaliyetlerinde meydana gelen iş yükü değerlendirme yüzdeleri verilmiştir. Bu verilere göre kontrolörlerden % 54.3'ü, bu faaliyeti meydana getirdiği iş yükü açısından çok önemli olarak değerlendirmiştir.



Şekil 3.25. Uçak hareket değişim faaliyeti önem derecesi.

Her biri ayrı ayrı değerlendirilen 4 farklı kontrol faaliyetinin genel ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanarak Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Çizelgede de görüldüğü üzere tüm kontrol faaliyetleri açısından önem derecesi puanlama ortalaması, 4 ve 5 arasında değişim göstermektedir. Bu verilere göre tanımlanan tüm kontrol faaliyetlerinin iş yükü açısından ankete katılan kontrolörler tarafından önemli olarak değerlendirildiği söylenebilir. Bu faaliyetleri kendi içerisinde sıralandırdığımızda özellikle kontrolörler açısından uçaklar arasında çakışma tespit ve çözüm faaliyetinin onu takiben de koordinasyonun önemli birer iş yükü etkeni olduğu söylenebilir.

Çizelge 3.1. Kontrol faaliyetlerinin iş yükü önem derecesi genel değerlendirmesi.

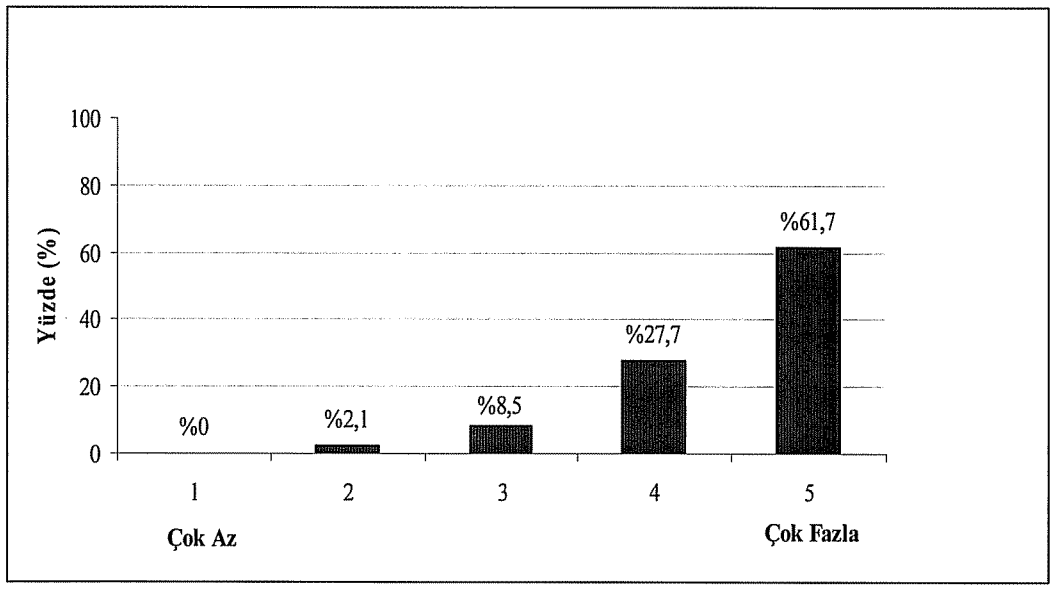
	Ortalama	**Standart Sapma**
Çakışma Tespit ve Çözüm Faaliyetleri	4,69	0,605
Koordinasyon Faaliyeti	4,61	0,643
Uçak Hareket Değişim Faaliyetleri	4,29	0,911
İzleme Faaliyetleri	4,18	0,944

3.6.7.15. Farklı uçak hareketlerinin iş yüküne etkisi

Ankete katılan kontrolörlerin sektörde çok sayıda uçağa seviye, baş, hız değişikliği ve direkt rota talimatı vermelerinin meydana getirdiği iş yükü ile ilgili yanıtları incelenerek, elde edilen veriler aşağıda değerlendirilmiştir.

a. Sektörde çok sayıda uçağın seviye değişikliği

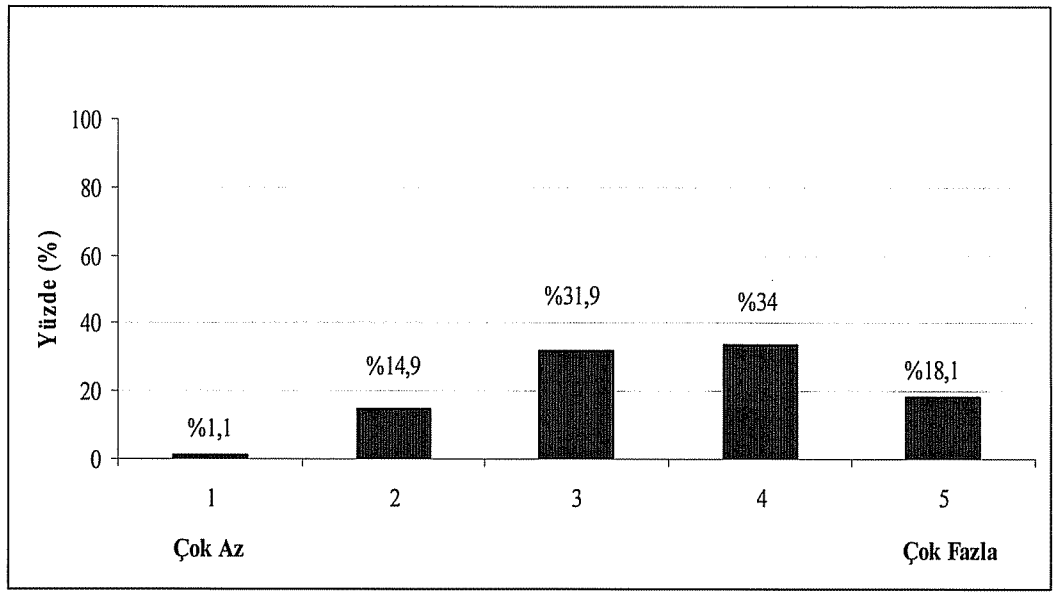
Şekil 3.26'da kontrolörlerin çok sayıda uçağın seviye değişikliği yapması faaliyetine ilişkin olarak verdikleri yanıtların frekansı ve yüzdesi görülmektedir. Kontrolörlerden % 61.7'si bu faaliyetin çok fazla iş yükü meydana getirdiğini belirtmiştir.



Şekil 3.26. Seviye değişikliğinin iş yüküne etkisi.

b. Sektörde çok sayıda uçağın hız değişikliği

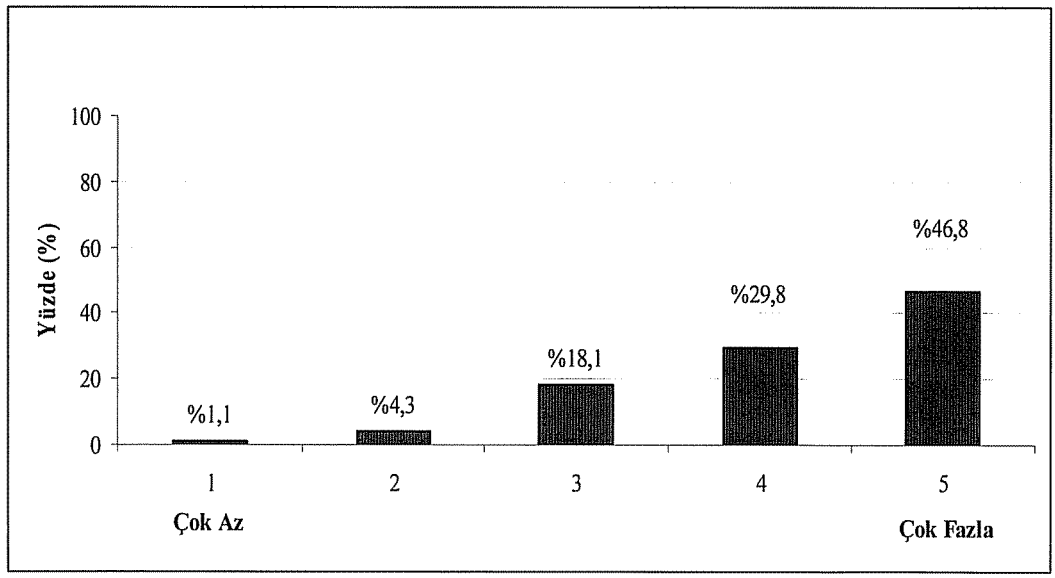
Sektörde çok sayıda uçağın hız değişikliği faaliyetinin meydana getirdiği iş yüküne ilişkin olarak kontrolörlerin % 34'ünün 4 puan, % 31.9'unun da 3 puan ile değerlendirme yaptığı görülmektedir (Şekil 3.27). Bu verilere göre bir sektörde çok sayıda uçağın hız değişikliği yapmasının kontrolörler açısından orta derecede bir iş yüküne neden olduğu söylenebilir.



Şekil 3.27. Hız değişikliğinin iş yüküne etkisi.

c. Sektörde çok sayıda uçağın uçuş başı değişikliği

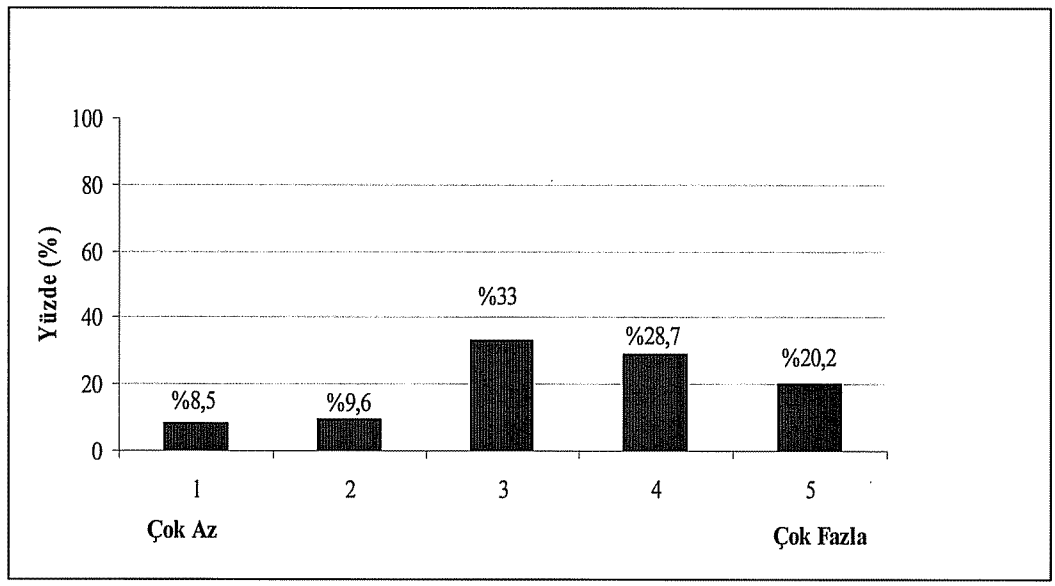
Sektörde çok sayıda uçağın uçuş başı değişikliği faaliyetinin iş yükü derecesi kontrolörlerin % 46.8'i tarafından çok fazla olarak nitelendirilmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. Uçuş başı değişikliğinin iş yüküne etkisi.

d. Sektörde çok sayıda uçağın direkt rotada uçması

Kontrolörlerin uçakların direkt rotada uçmasına ilişkin olarak verdikleri yanıtların frekans ve yüzdeleri Şekil 3.29'da verilmiştir. Katılımcı görüşleri farklılık göstermekle birlikte bu faaliyetin meydana getirdiği iş yükü derecesi, 31 kişi (% 33) tarafından 3 puan olarak değerlendirilmiştir. Bu verilere göre direkt rota talimatının kontrolörler açısından orta derecede iş yüküne neden olduğu söylenebilir.



Şekil 3.29. Direkt rotanın iş yüküne etkisi.

Ankete katılan kontrolörlerin farklı uçak hareketi faaliyetlerine vermiş oldukları puanlara göre her bir faaliyetin iş yükü değerlendirmesi ortalama ve standart sapmaları hesaplanarak Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Farklı uçak hareketlerine yönelik kontrol faaliyetleri göz önünde bulundurulduğunda kontrolörler açısından seviye veya uçuş başı değişikliği yapan uçakların iş yükü bakımından daha öncelikli olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.2. Farklı uçak hareketi faaliyetlerinin iş yükü derecesi genel değerlendirmesi.

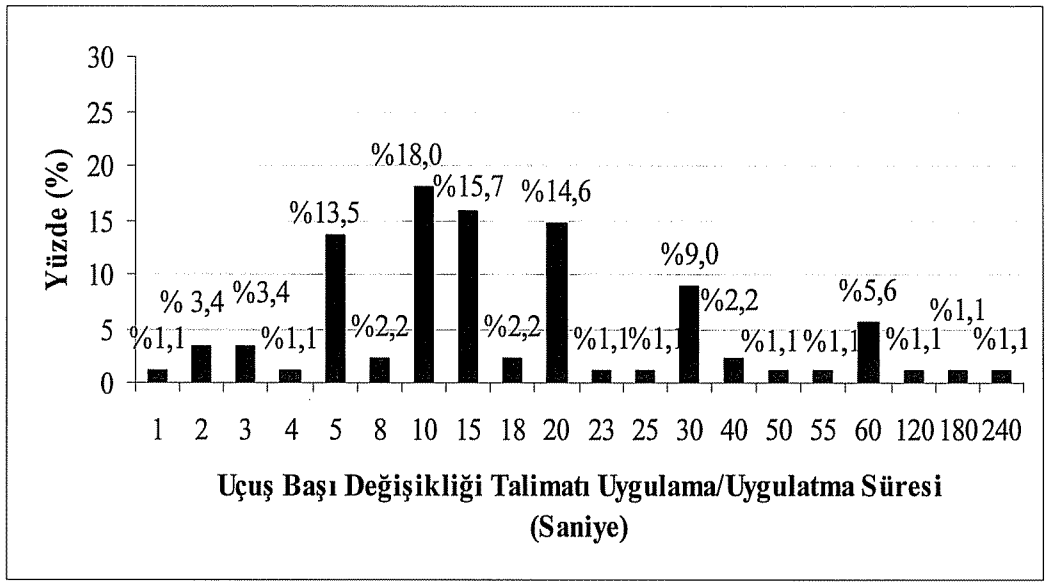
	Ortalama	Standart Sapma
Seviye değişikliği	4,49	0,744
Uçuş başı değişikliği	4,17	0,946
Hız değişikliği	3,53	0,991
Direkt rota	3,43	1,168

3.6.7.16. Farklı uçak hareketleri için talimatları uygulama/uygulatma süreleri

Kontrolörlerin farklı uçak hareketleri için verdikleri talimatları uygulama/uygulatma sürelerine ilişkin olarak vermiş oldukları yanıtlardan elde edilen veriler, Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Her bir faaliyet ayrı başlıklar altında aşağıda değerlendirilmiştir.

a. Uçuş başı değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süreleri

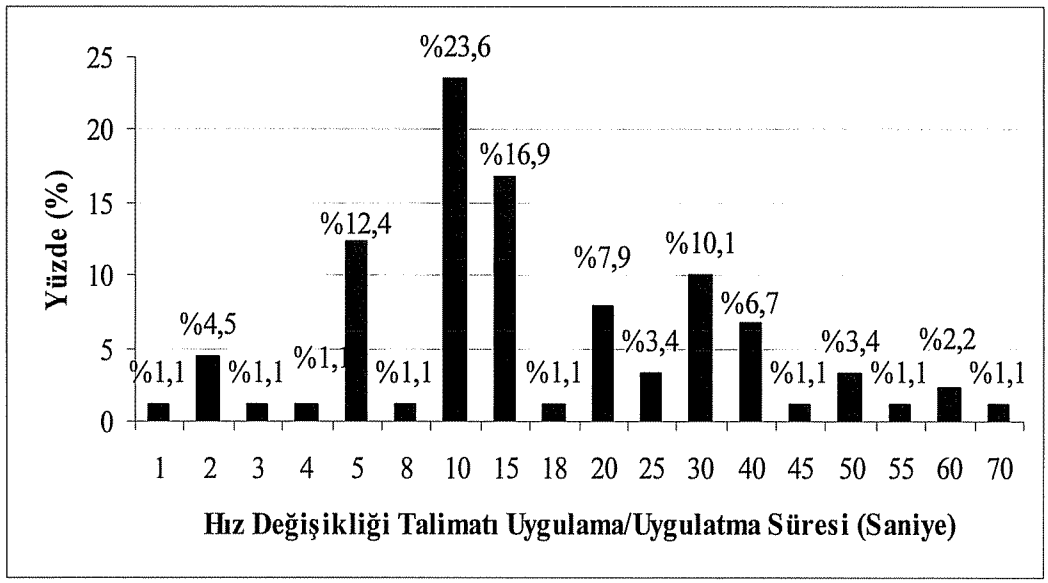
Şekil 3.30'da görüldüğü üzere uçuş başı değişikliği talimat süresi için kontrolörlerin % 66.2'si, 5 ilâ 20 saniye arasında görüş bildirmiştir.



Şekil 3.30. Uçuş başı değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süresi dağılımı.

b. Hız değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süreleri

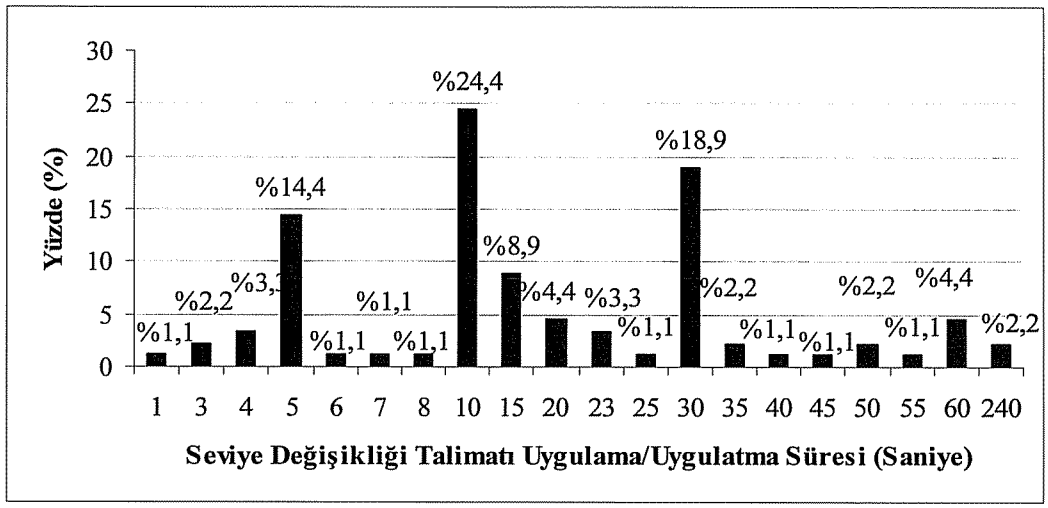
Şekil 3.31'de görüldüğü gibi hız değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süresinin % 76.5 oranı ile 5 ilâ 30 saniye arasında yoğunlaştığı söylenebilir.



Şekil 3.31. Hız değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süresi dağılımı.

c. Seviye değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süreleri

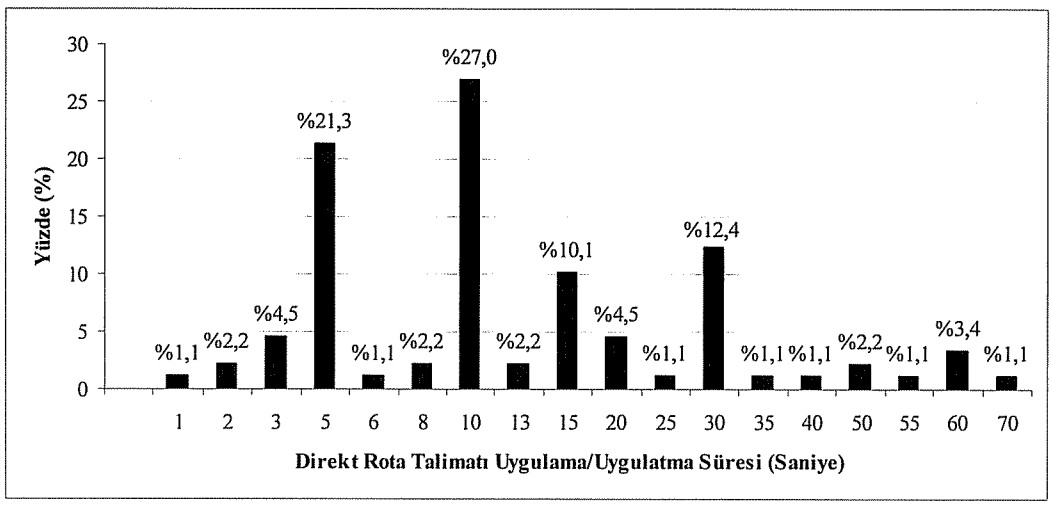
Şekil 3.32'de görüleceği üzere cevapların % 78.7'sinde seviye değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süresinin 5 ilâ 30 saniye arasında değişim gösterdiği söylenebilir.



Şekil 3.32. İrtifa değişikliği talimatı uygulama/uygulatma süresi dağılımı.

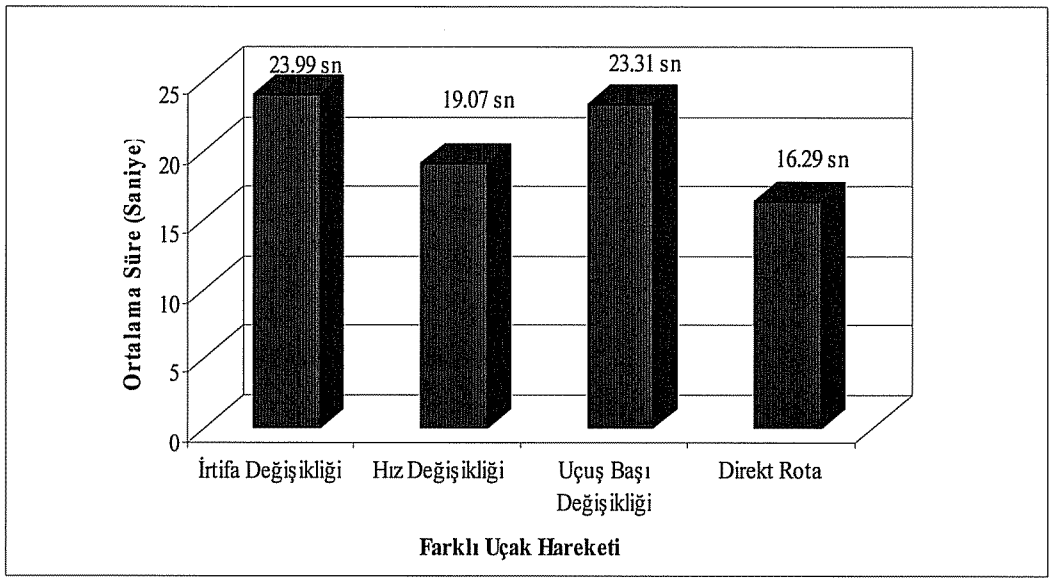
d. Direkt rota talimatı uygulama/uygulatma süreleri

Direkt rota talimatı süresi için kontrolörlerin verdikleri yanıtlardan elde edilen grafik Şekil 3.33'de gösterilmiştir. Bu verilere göre direkt rota talimatı uygulama/uygulatma süresinin yaklaşık % 52 oranında 5 ilâ 10 saniye arasında yoğunlaştığı saptanmıştır.



Şekil 3.33. Direkt rota talimatı uygulama/uygulatma süresi dağılımı.

Ankete katılan kontrolörlerin verdikleri yanıtlardan genel olarak elde edilen farklı uçak hareketi talimatı uygulama/uygulatma ortalama süreleri Şekil 3.34'de verilmiştir. Bu verilere göre kontrolörlerin çalışmaları esnasında farklı uçak hareketleri için verdikleri talimatlarda en fazla zamanı, seviye değişikliği ve onu takibende uçuş başı değişikliğine harcadıkları görülmektedir.



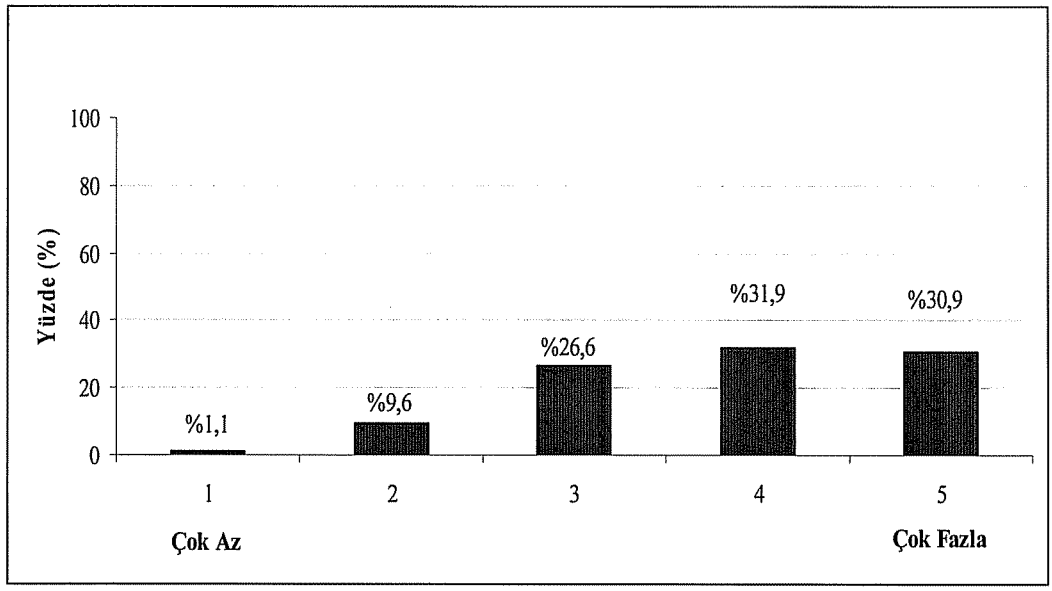
Şekil 3.34. Farklı uçak hareketi talimatlarını uygulama/uygulatma ortalama süreleri.

3.6.7.17. Koordinasyon faaliyetlerinin iş yüküne etkisi

Ankete katılan kontrolörlerin farklı koordinasyon faaliyetlerinin iş yüklerine etkisine ilişkin olarak verdikleri yanıtlar ayrı ayrı incelenerek, elde edilen veriler aşağıda değerlendirilmiştir.

a. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer sektörlerle koordinasyon

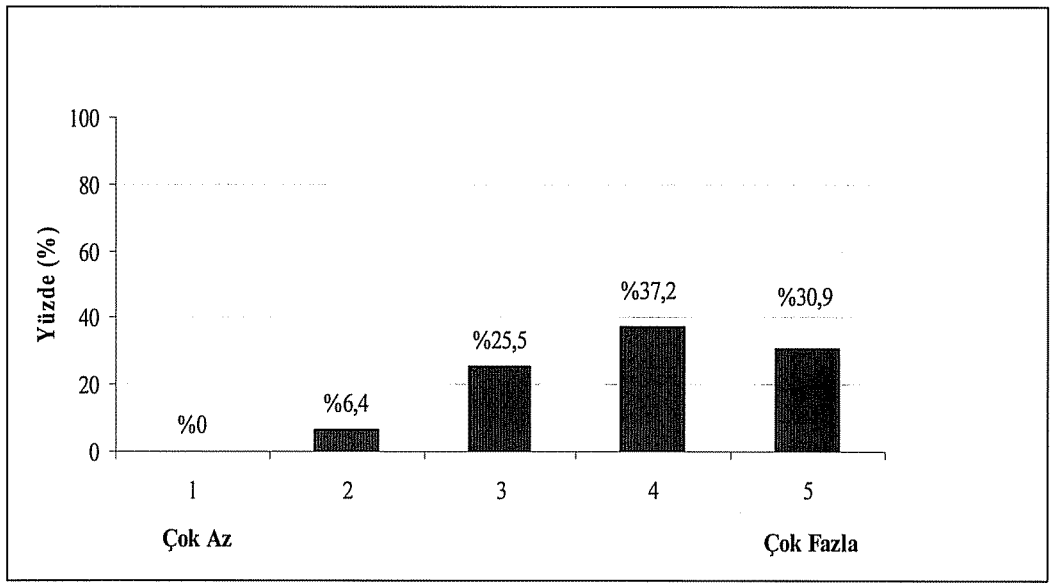
Şekil 3.35'de kontrolörlerin aynı ACC birimi içerisinde diğer sektörlerle koordinasyon faaliyeti için iş yüküne etki derecesi frekans ve yüzdeleri verilmiştir. Bu verilere göre kontrolörlerin 4 ve 5 olarak adlandırılan "Fazla" ve "Çok Fazla" seçeneklerini birbirine yakın yüzdelerle işaretlediği görülmektedir. Bu doğrultuda aynı ACC birimi içerisinde diğer sektörlerle koordinasyon faaliyetinin kontrolörlere önemli bir iş yükü getirdiği söylenebilir.



Şekil 3.35. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer sektörlerle koordinasyon faaliyetinin iş yüküne etki derecesi.

b. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon

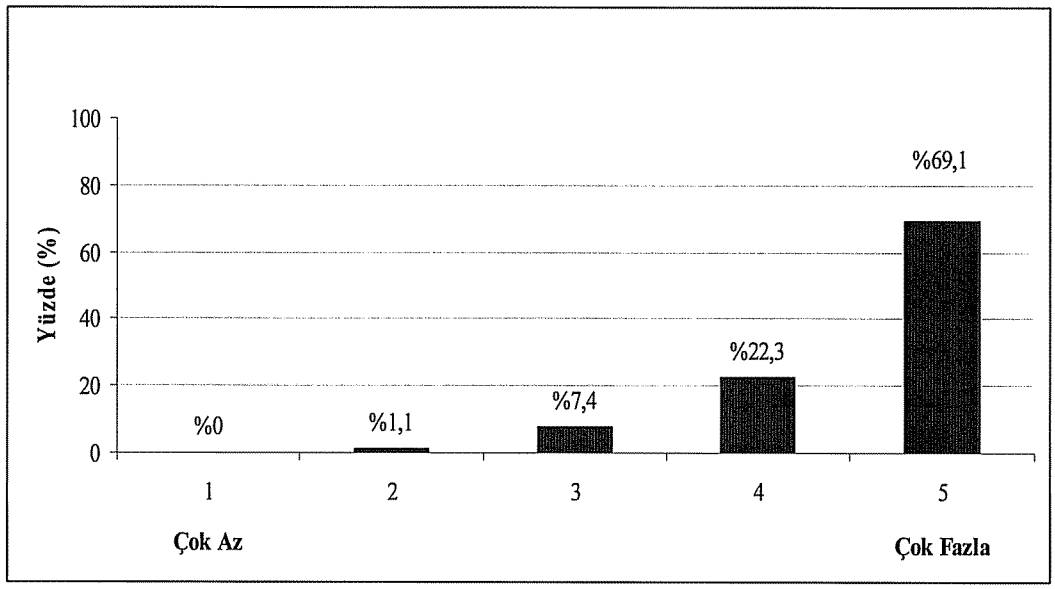
Ankete katılanların % 68.1'i "Fazla" ve "Çok Fazla" seçeneğini işaretleyerek, bu koordinasyon faaliyetini iş yükü açısından önemli bir etken olarak değerlendirmişlerdir (Şekil 3.36).



Şekil 3.36. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon faaliyetinin iş yüküne etki derecesi.

c. Askeri birimlerle koordinasyon

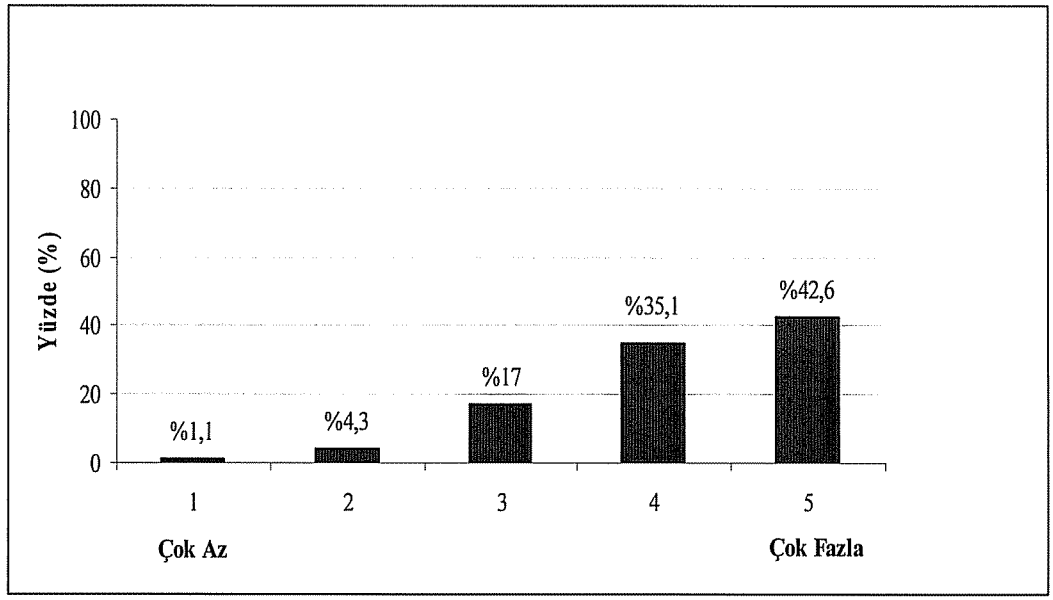
Şekil 3.37'de görüldüğü üzere ankete katılan kontrolörlerin oldukça önemli bir bölümü (% 69.1), "Çok Fazla" seçeneğini işaretleyerek askeri birimlerle koordinasyon faaliyetini çok önemli bir iş yükü etkeni olarak değerlendirmişlerdir.



Şekil 3.37. Askeri birimlerle koordinasyon faaliyetinin iş yüküne etki derecesi.

d. Farklı ACC birimleri ile koordinasyon

Ankete katılanların % 77.7'si bu faaliyeti, "Fazla" ve "Çok Fazla" seçeneğini işaretleyerek önemli bir iş yükü etkeni olarak değerlendirmiştir (Şekil 3.38).



Şekil 3.38. Farklı ACC birimleri ile koordinasyon faaliyetinin iş yüküne etki derecesi.

Ankete katılan kontrolörlerin farklı koordinasyon faaliyetlerine vermiş oldukları puanlara göre her bir faaliyetin iş yükü değerlendirmesi ortalama ve standart sapmaları hesaplanarak Çizelge 3.3'de gösterilmiştir. Elde edilen bu verilere göre kontrolörler açısından askeri ünitelerle koordinasyon faaliyetinin diğer koordinasyon faaliyetlerine göre çok daha fazla iş yüküne neden olduğu söylenebilir.

Çizelge 3.3. Farklı koordinasyon faaliyetlerinin iş yükü derecesi genel değerlendirmesi.

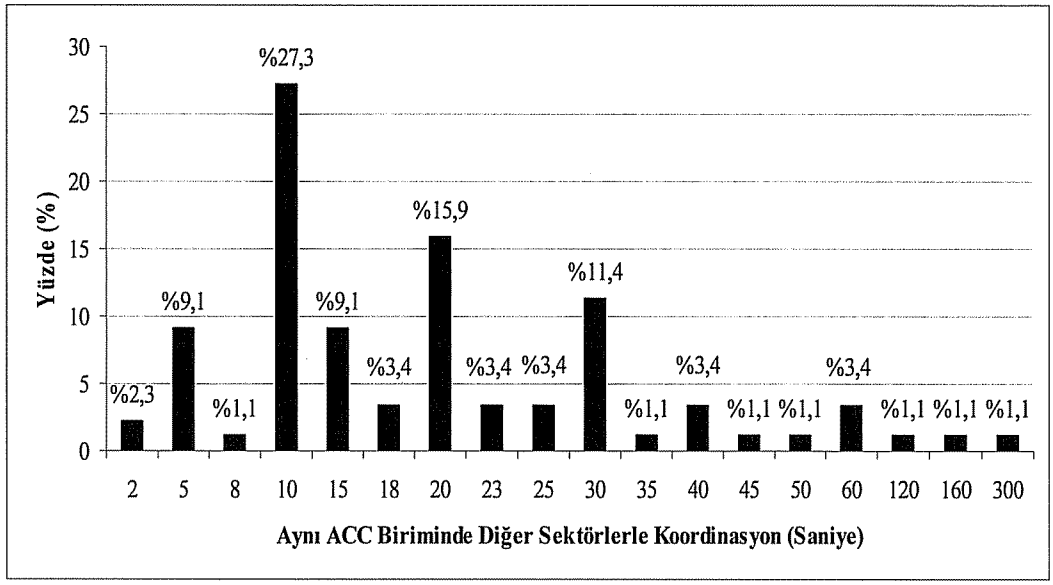
	Ortalama	**Standart Sapma**
Askeri ünitelerle koordinasyon	4,60	0,677
Komşu ACC birimleri ile koordinasyon	4,14	0,922
Aynı ACC içerisinde diğer ATC birimleri ile koordinasyon	3,93	0,907
Aynı ACC içerisindeki diğer sektörlerle koordinasyon	3,82	1,016

3.6.7.18. Koordinasyon faaliyetleri için ortalama süre

Şekil 3.39, Şekil 3.40, Şekil 3.41 ve Şekil 3.42'de farklı koordinasyon faaliyet sürelerine ilişkin olarak kontrolörlerin verdikleri yanıtlardan elde edilen veriler grafiksel olarak gösterilmiştir.

a. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer sektörlerle koordinasyon faaliyeti ortalama süresi

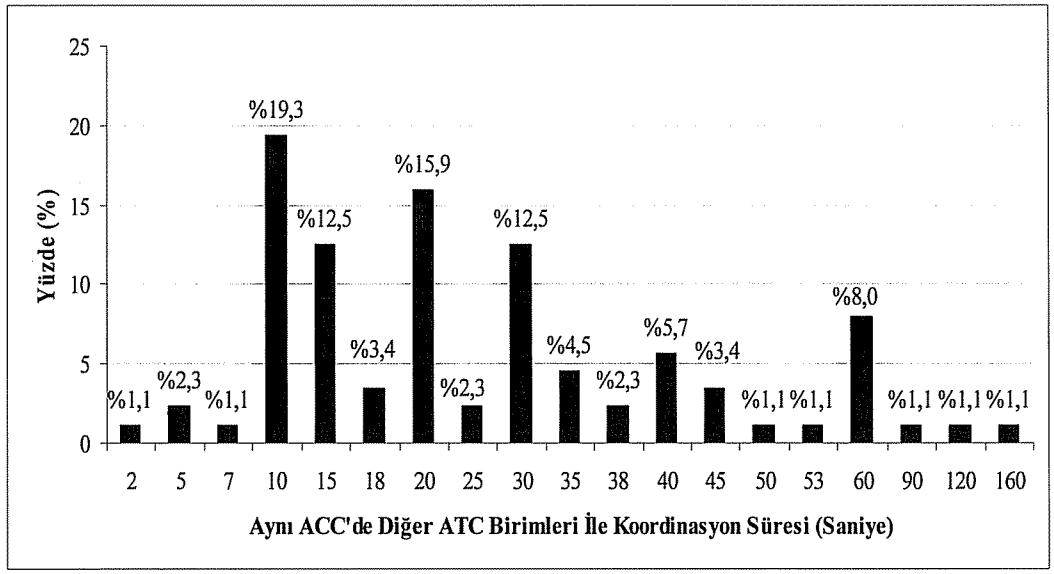
Şekil 3.39'dan aynı ACC birimindeki diğer sektörlerle koordinasyon için harcanan sürenin % 55.7 oranında 10 ile 20 saniye arasında yoğunlaştığı söylenebilir.



Şekil 3.39. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer sektörlerle koordinasyon süresi dağılımı.

b. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon faaliyeti ortalama süresi

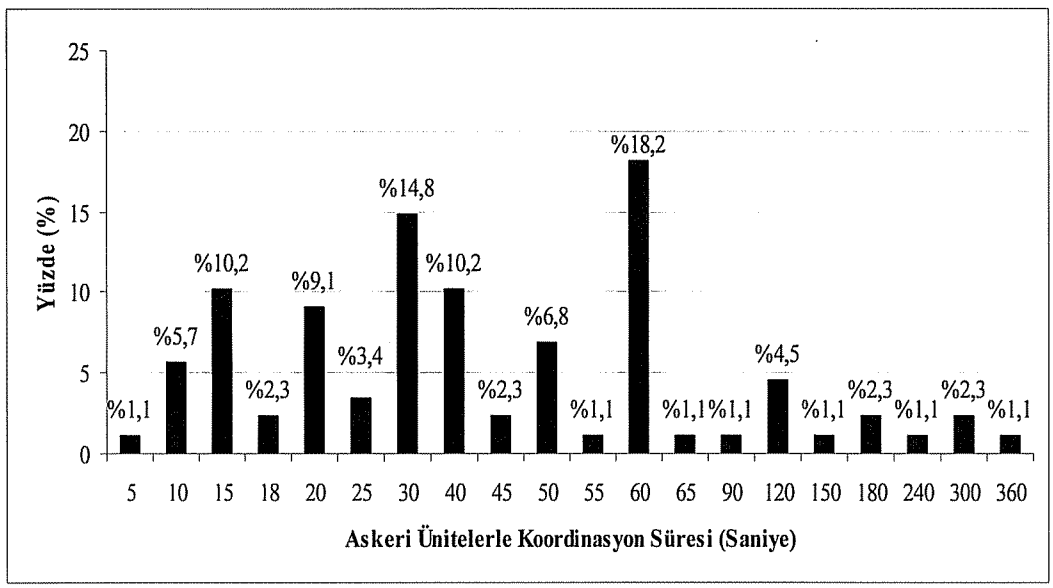
Şekil 3.40'da görüldüğü gibi ankete katılan kontrolörlerden % 66.1'nin bu koordinasyon faaliyetini 10 ilâ 30 saniye arasında değerlendirdiği saptanmıştır.



Şekil 3.40. Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon süresi dağılımı.

c. Askeri ünitelerle koordinasyon faaliyeti ortalama süresi

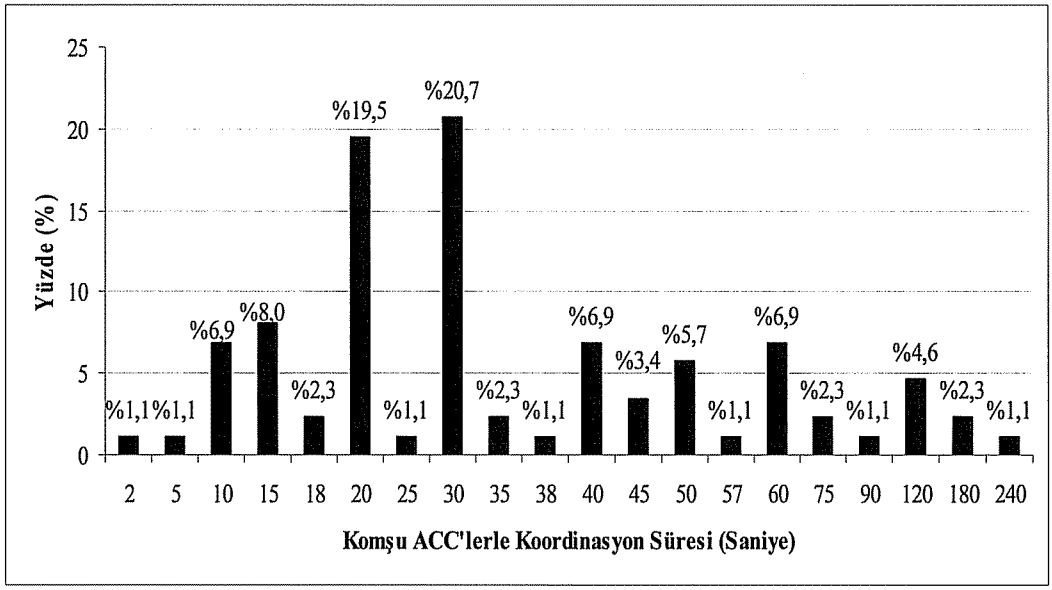
Şekil 3.41'de görüldüğü üzere bu tip bir koordinasyon faaliyetine harcanan sürenin yaklaşık % 50 oranında 30 ilâ 60 saniye arasında yoğunlaştığı söylenebilir (Şekil 3.41).



Şekil 3.41. Askeri ünitelerle koordinasyon süresi dağılımı.

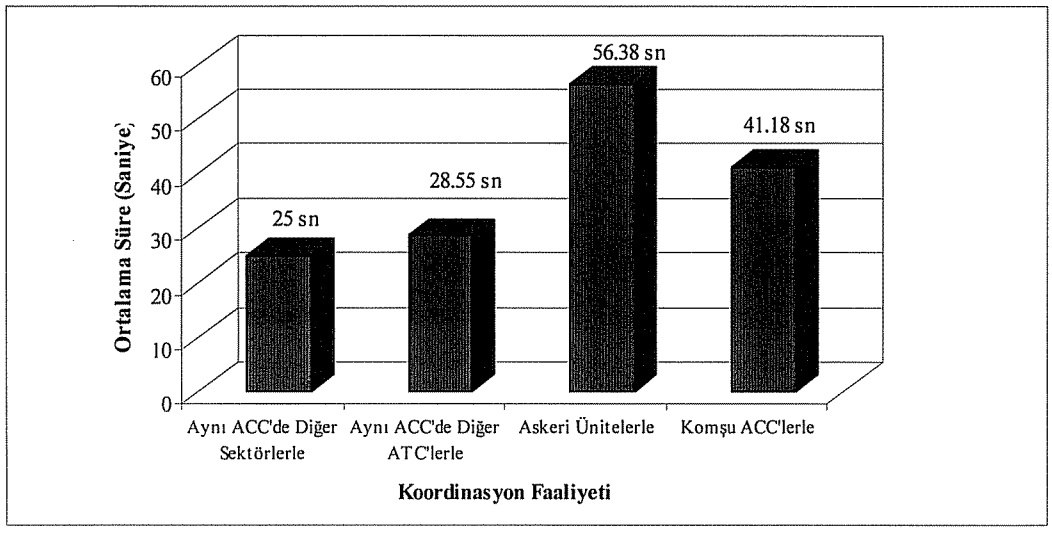
d. Komşu ACC birimleri ile koordinasyon faaliyeti ortalama süresi

Şekil 3.42'de komşu ACC birimleri ile koordinasyon süresine yönelik olarak kontrolör görüşleri yer almaktadır. Bu tip bir koordinasyon faaliyeti için kontrolörlerin yaklaşık % 40'ı, 20 ve 30 saniye görüşündedir.



Şekil 3.42. Komşu ACC birimleri ile koordinasyon süresi dağılımı.

Yukarıda ayrı ayrı değerlendirilen her bir koordinasyon faaliyeti, genel ortalama süreleri hesaplanarak Şekil 3.43'de verilmiştir. Bu verilere göre kontrolörlerin, askeri ünitelerle ve komşu ACC'lerle koordinasyona daha fazla zaman harcadıkları görülmektedir.



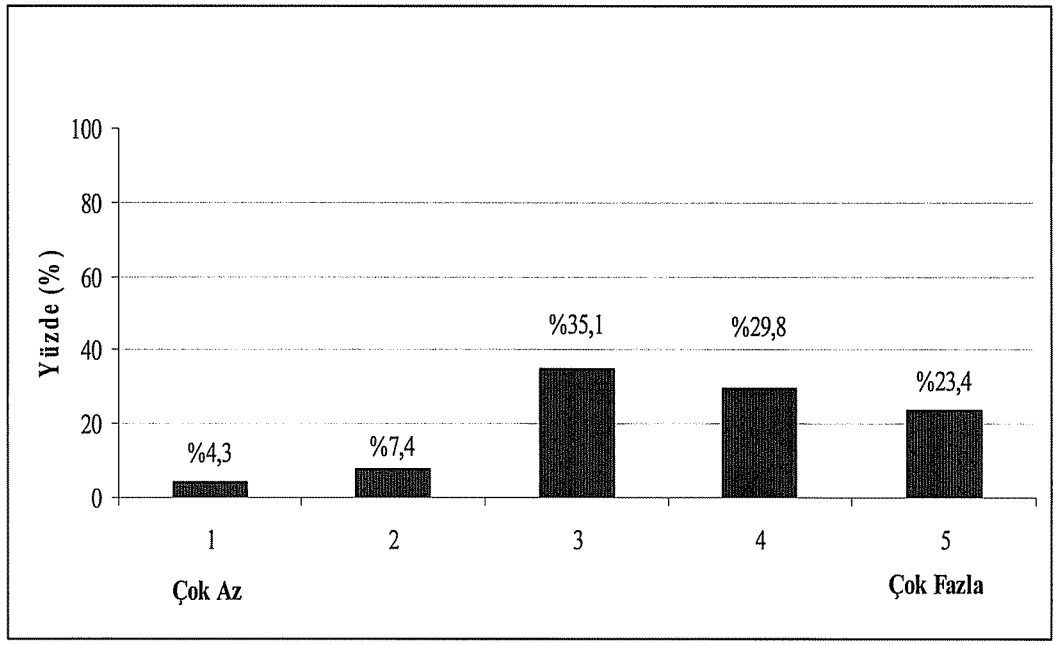
Şekil 3.43. Kontrolör yanıtlarına göre ortalama koordinasyon faaliyet süreleri.

3.6.7.19. Çakışma tespit ve çözüm faaliyetlerinin iş yüküne etkisi

Ankete katılan kontrolörlerin her bir çakışma tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etkisine ilişkin olarak verdikleri yanıtlar ayrı ayrı incelenerek, elde edilen veriler aşağıda değerlendirilmiştir.

a. Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde uçan trafikler arasında

Şekil 3.44'de kontrolörlerin aynı uçuş seviyesinde ve aynı yönde uçan trafikler arasındaki çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi değerlendirme yüzdeleri verilmiştir. Elde edilen verilere göre kontrolörlerin % 88.3'lük bir bölümü, bu tip bir çakışma tespit ve çözüm faaliyetini 3 ilâ 5 puan vererek değerlendirmiştir.

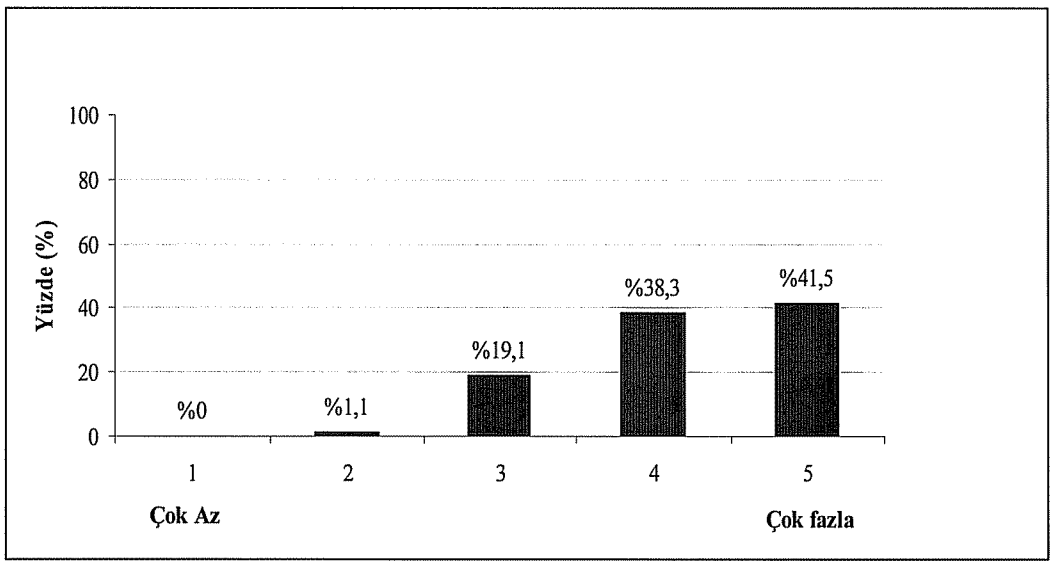


Şekil 3.44. Aynı uçuş seviyesinde aynı yöndeki trafikler arasındaki çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi.

b. Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerdeki trafikler arasında

Şekil 3.45'de görüldüğü üzere aynı uçuş seviyesinde ve kesişen yönlerdeki trafikler arasındaki çakışmalar, kontrolörlerin % 79.8'i tarafından "Fazla" ve "Çok

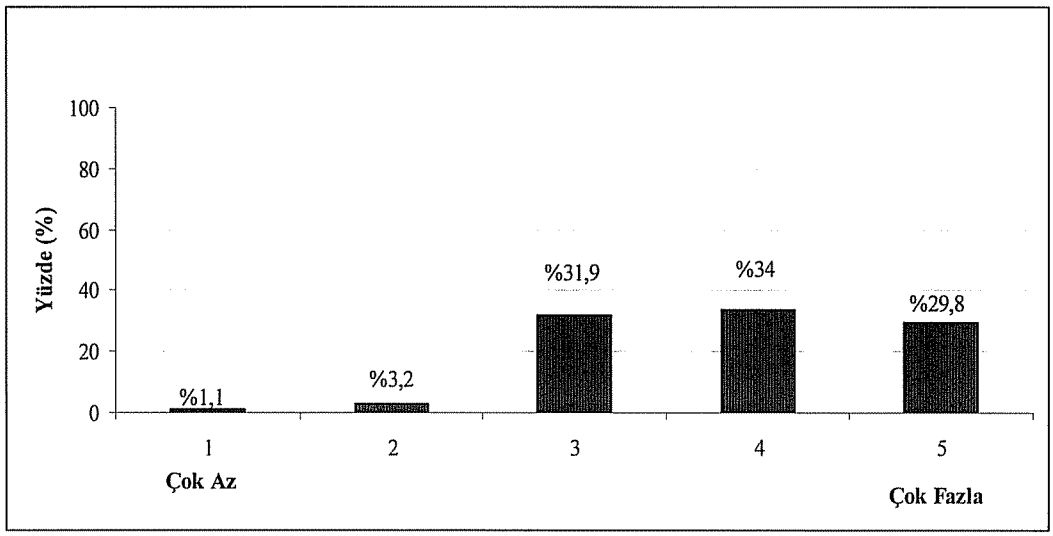
Fazla" seçeneği ile değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda bu tip bir faaliyetin kontrolörlere önemli bir iş yükü getirdiği söylenebilir.



Şekil 3.45. Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerdeki trafikler arasında çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi.

c. Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasında

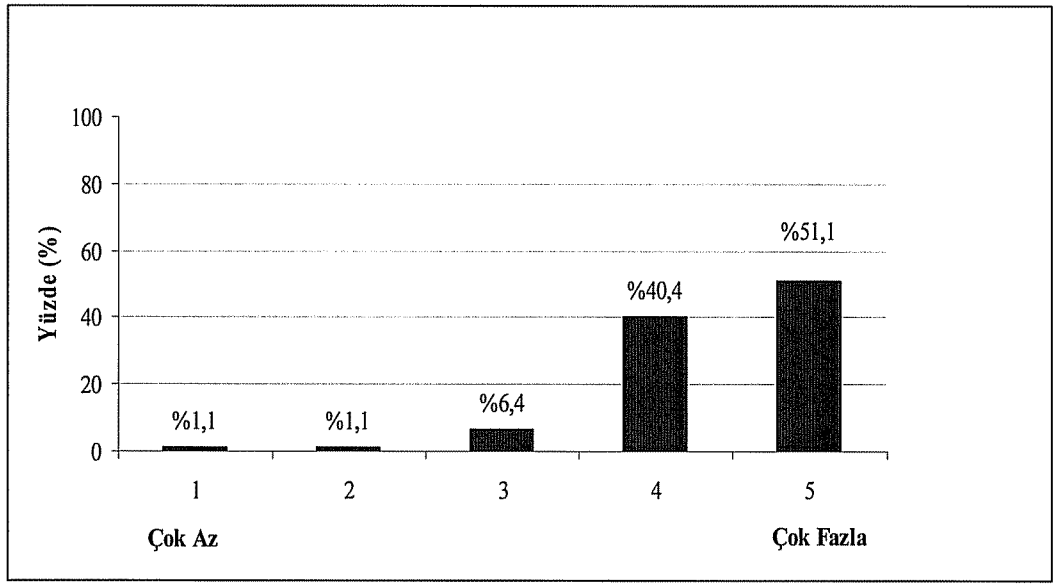
Şekil 3.46'da görüldüğü gibi aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmaları tespit ve çözüm faaliyeti, kontrolörlerin % 95,7'si tarafından 3 ilâ 5 seçenekleri arasında değerlendirilmiştir.



Şekil 3.46. Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasında çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi.

d. Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasında

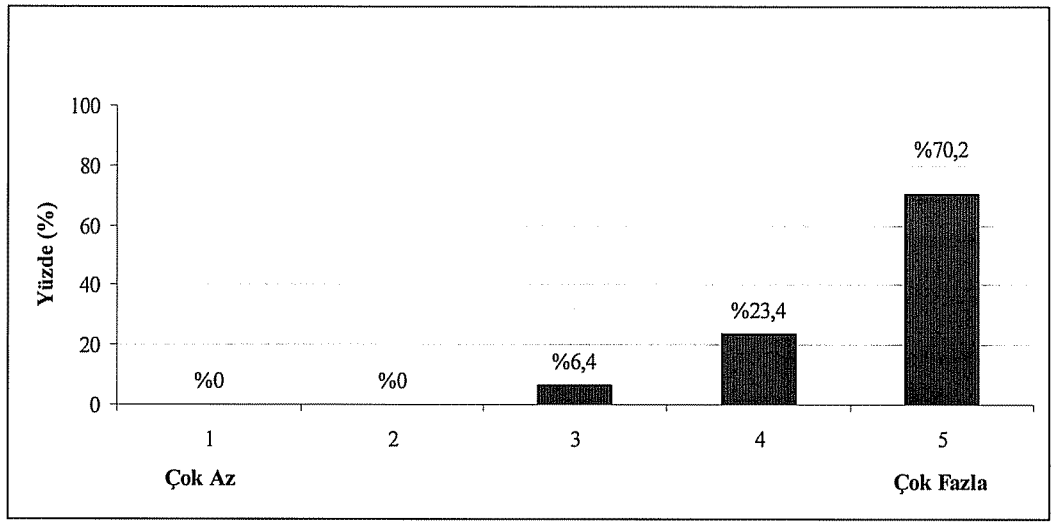
Bu tip bir faaliyet için % 91.5 ile "Fazla" ve "Çok Fazla" seçenekleri işaretlenmiş olup, bu sonuç ankete katılan kontrolörlerin kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma tespit ve çözüm faaliyetini önemli bir iş yükü faktörü olarak değerlendirdiğini göstermektedir (Şekil 3.47).



Şekil 3.47. Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasında çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi.

e. Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasında

Anketin bu sorusuna verilen yanıtlar % 70.2 ile "Çok Fazla" yönündedir (Şekil 3.48). Bu sonuca göre karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışma tespit ve çözüm faaliyetlerinin kontrolörlere çok fazla iş yükü getirdiği söylenebilir.



Şekil 3.48. Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasında çakışmaları tespit ve çözüm faaliyetinin iş yüküne etki derecesi.

Ankete katılan kontrolörlerin uçaklar arası çakışma tespit ve çözüm faaliyetlerine vermiş oldukları puanlara göre her bir faaliyetin iş yükü değerlendirmesi, ortalama ve standart sapmaları hesaplanarak Çizelge 3.4'de gösterilmiştir.

Farklı çakışma tespit ve çözüm faaliyetleri için "Çok Az" ve "Çok Fazla" seçenekleri ile 5'li Likert tipi ölçek kullanılarak yapılan bu değerlendirmelerin sonucuna göre karşı yönlü tırmanan veya alçalan, onu takiben de kesişen yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma tespitlerinin kontrolörler açısından daha fazla iş yüküne neden olduğu söylenebilir.

Çizelge 3.4. Çakışma tespit ve çözüm faaliyetlerinin iş yükü derecesi genel değerlendirmesi.

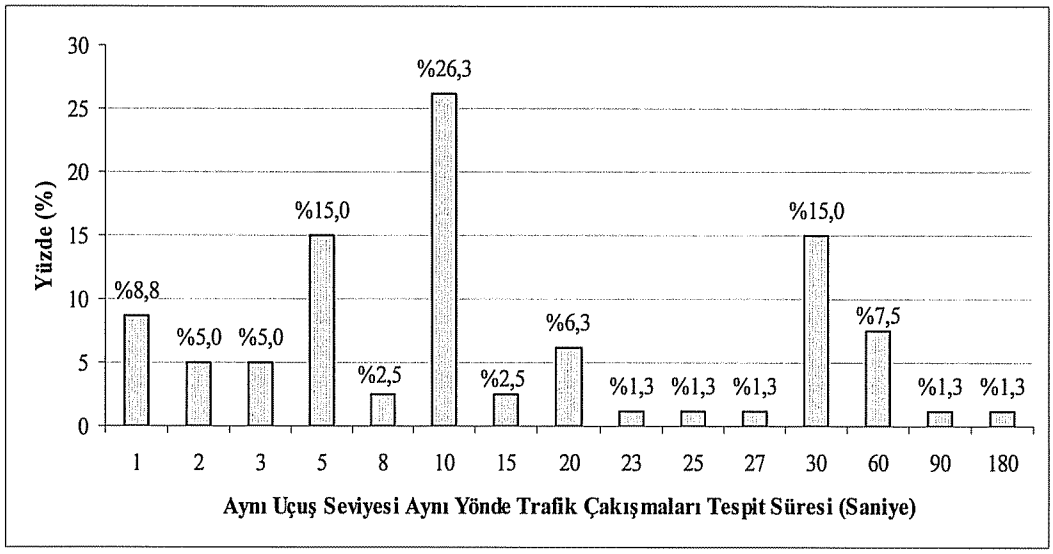
	Ortalama	**Standart Sapma**
Karşı Yönlü Tırmanan veya Alçalan Trafik Çakışmaları Tespit ve Çözüm Faaliyeti	4,64	0,601
Kesişen Yönde Tırmanan veya Alçalan Trafik Çakışmaları Tespit ve Çözüm Faaliyeti	4,39	0,75
Aynı Uçuş Seviyesinde Kesişen Yönlerdeki Trafik Çakışmaları Tespit ve Çözüm Faaliyeti	4,2	0,783
Aynı Yönde Tırmanan veya Alçalan Trafik Çakışmaları Tespit ve Çözüm Faaliyeti	3,88	0,914
Aynı Uçuş Seviyesinde Aynı Yönde Trafik Çakışmaları Tespit ve Çözüm Faaliyeti	3,61	1,059

3.6.7.20. Çakışma tespit ve çözüm faaliyetleri için ortalama süre

Anketin bu sorusuna gelen geçerli yanıtlara göre elde edilen veriler, tespit ve çözüm süreleri ile ayrı ayrı grafiksel olarak gösterilmiştir.

1a. Aynı uçuş seviyesi aynı yönde trafik çakışmaları tespit süresi

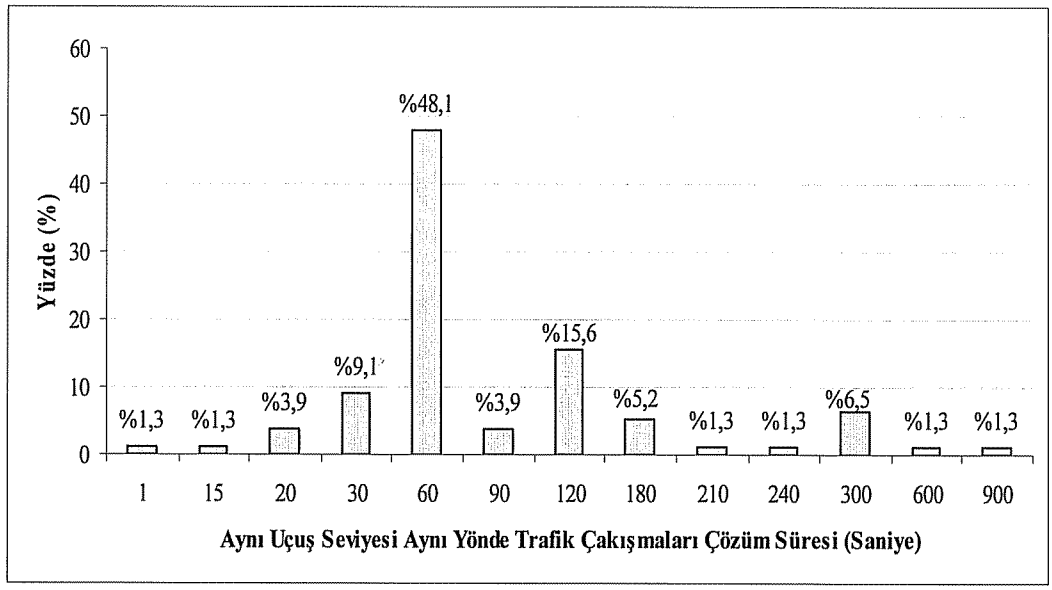
Şekil 3.49'da kontrolör görüşlerinden elde edilen verilere göre dağılımın özellikle 5 ilâ 10 saniye yanıtını verenlerle, 30-60 saniye yanıtını verenler arasında yoğunluk gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.49. Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı.

1b. Aynı uçuş seviyesi aynı yönde trafik çakışmaları çözüm süresi

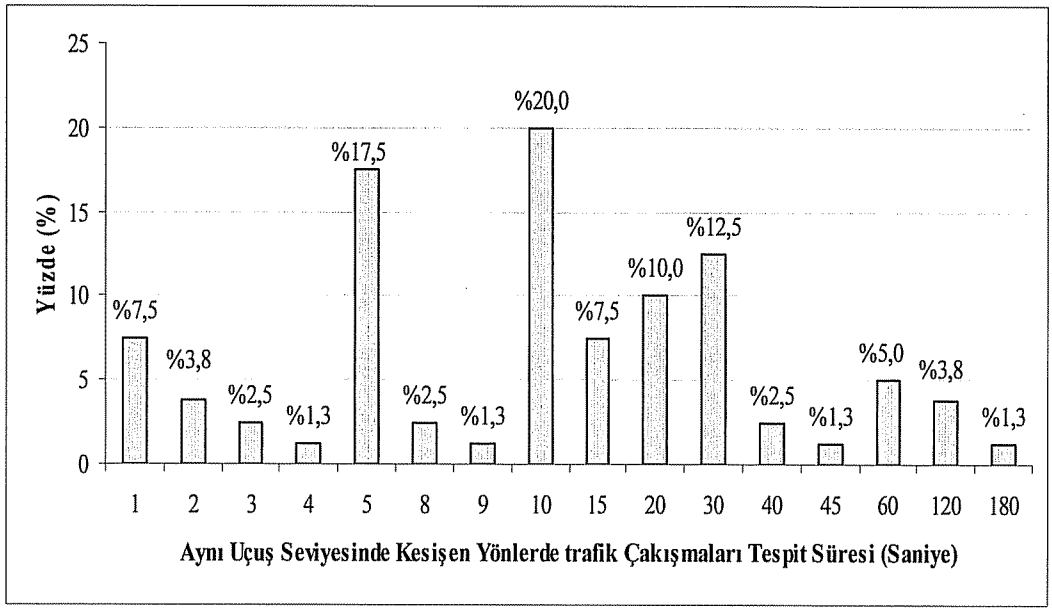
Aynı uçuş seviyesi aynı yönde trafikler arası çakışma çözüm faaliyeti grafiği Şekil 3.50'de verilmiştir. Kontrolörlerin % 48'inin çözüm faaliyetine ilişkin olarak bildirdikleri süre, 60 saniyedir.



Şekil 3.50. Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde trafikler arası çakışma çözüm süresi dağılımı.

2a. Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerde trafik çakışmaları tespit süresi

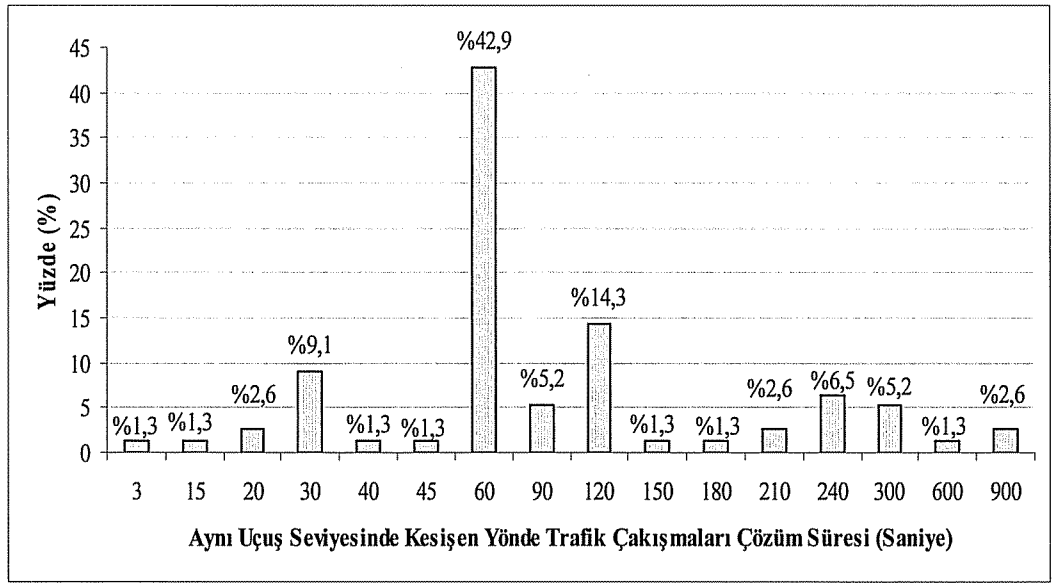
Şekil 3.51'de görüldüğü gibi katılımcıların % 50'si, bu soruya 10 ilâ 30 saniye arasında görüş bildirmişlerdir.



Şekil 3.51. Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerde trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı.

2b. Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerde trafik çakışmaları çözüm süresi

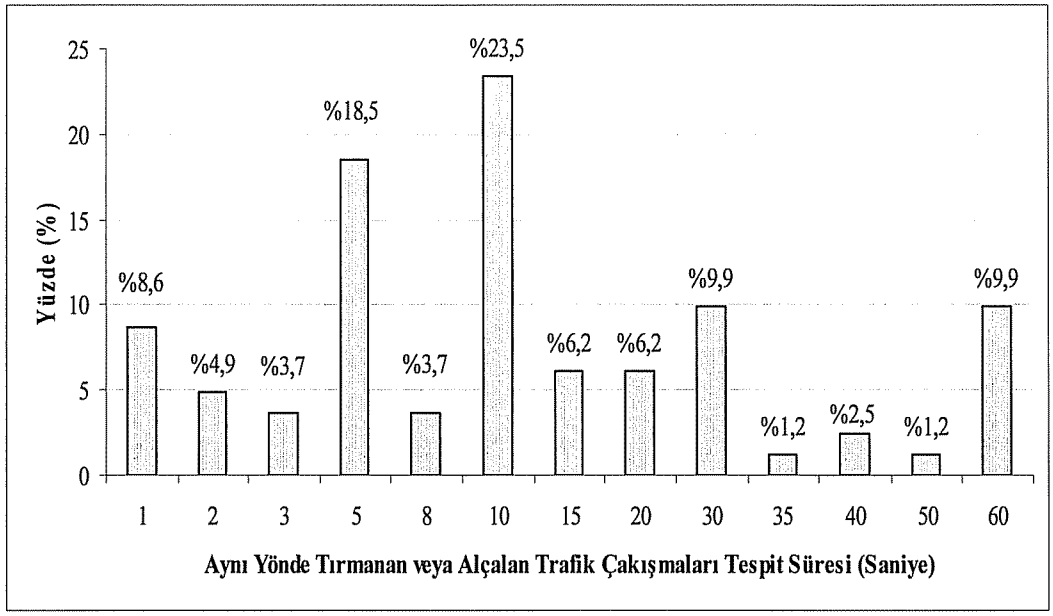
Ankete katılan kontrolörlerin % 42.9'u, bu tip bir çakışmanın 60 saniyede çözülebileceği görüşündedir (Şekil 3.52).



Şekil 3.52. Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerde trafikler arası çakışma çözüm süresi dağılımı.

3a. Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafik çakışmaları tespit süresi

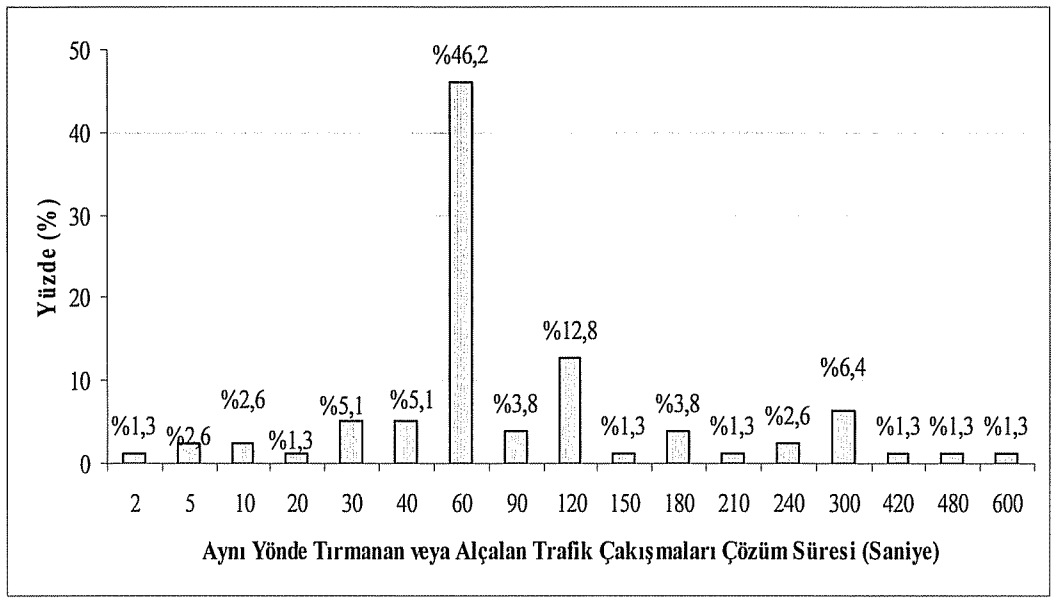
Şekil 3.53'e göre bu tip bir çakışma tespit süresi için kontrolörlerin yaklaşık % 46'sı, 5 ilâ 10 saniye cevabı üzerinde yoğunlaşmıştır.



Şekil 3.53. Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı.

3b. Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafik çakışmaları çözüm süresi

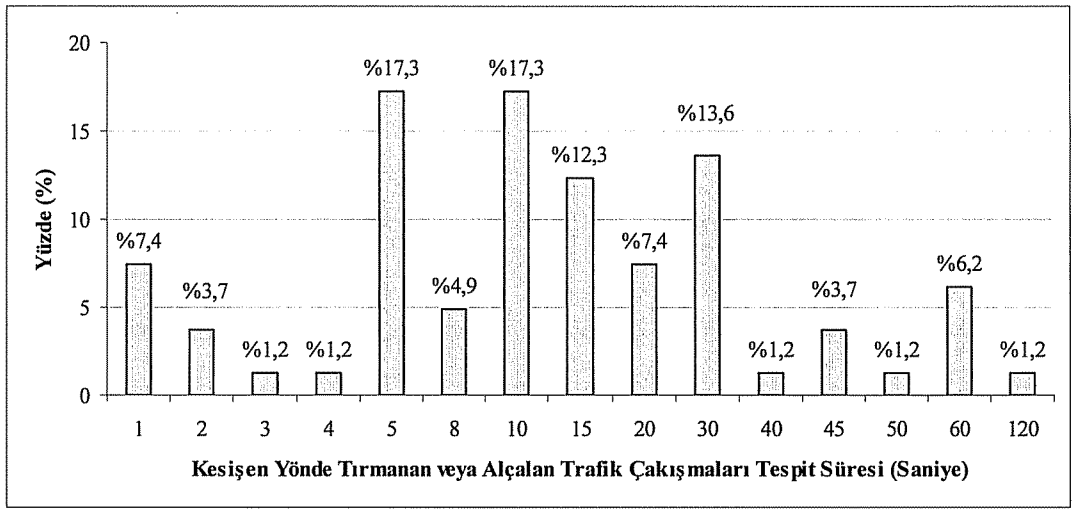
Şekil 3.54'de görüleceği üzere aynı yönde tırmanan veya alçalan trafik çakışmaları çözüm süresi, ankete katılan kontrolörlerin % 46.2'lik bir bölümü tarafından 60 saniye olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.54. Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma çözüm süresi dağılımı.

4a. Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafik çakışmaları tespit süresi

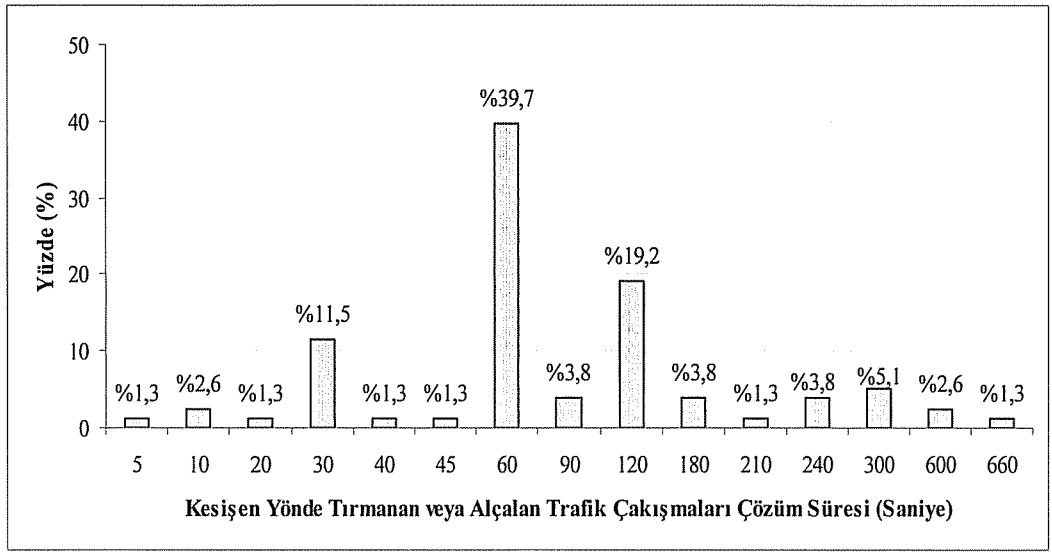
Şekil 3.55'de görüldüğü gibi kontrolörlerin yaklaşık olarak % 73'ü, bu tip bir çakışma çözüm faaliyeti için 5 ilâ 30 saniye arasında görüş bildirmişlerdir.



Şekil 3.55. Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı.

4b. Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafik çakışmaları çözüm süresi

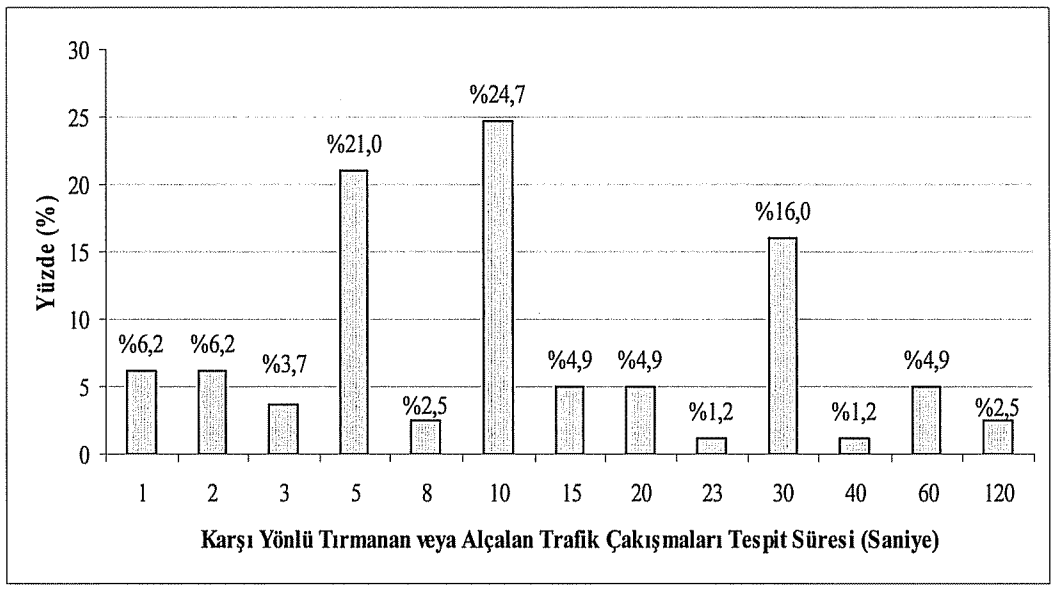
Şekil 3.56'dan da görüleceği üzere ankete katılan kontrolörlerin yaklaşık % 40'ı, bu tip bir çakışma çözüm süresinin 60 saniye olacağı görüşünde birleşmişlerdir.



Şekil 3.56. Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma çözüm süresi dağılımı.

5a. Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafik çakışmaları tespit süresi

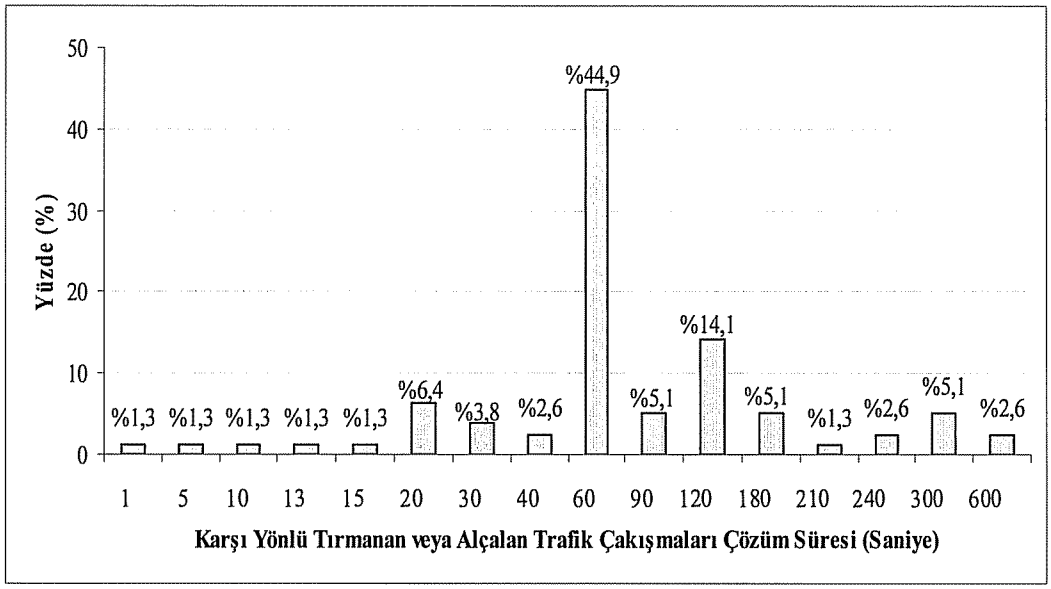
Ankete katılan kontrolörlerin verdikleri yanıtlara göre karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışmaları tespit süresi Şekil 3.57'de verilmiştir. Kontrolörlerin % 48.2'lik bir bölümünün görüşüne dayalı olarak bu tip bir çakışma tespit faaliyetinin 5 ilâ 10 saniye arasında değiştiği söylenebilir.



Şekil 3.57. Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma tespit süresi dağılımı.

5b. Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafik çakışmaları çözüm süresi

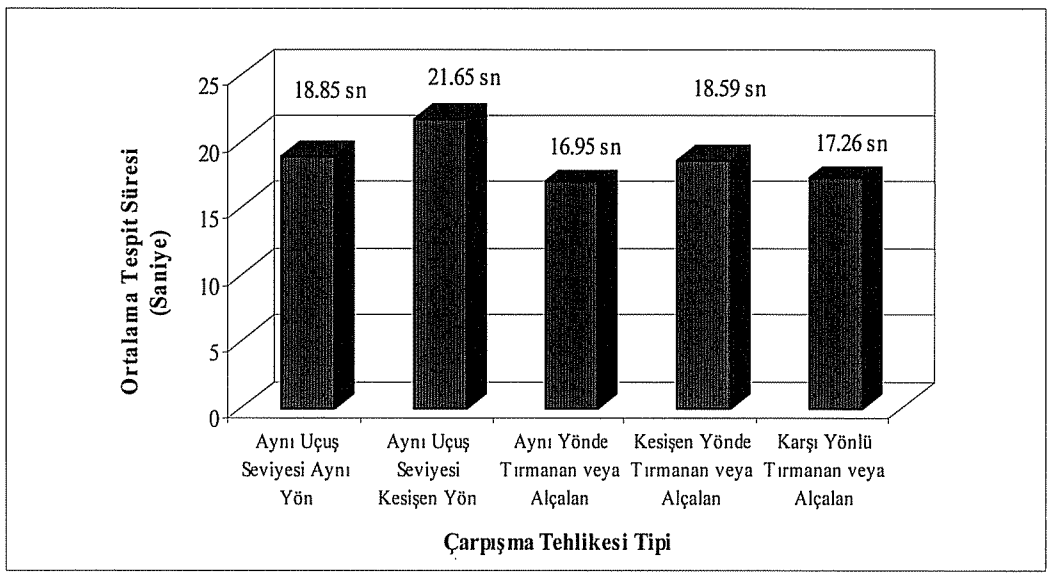
Bu tip bir çakışma çözüm süresi için kontrolörlerin yaklaşık olarak % 45'i, 60 saniye şeklinde görüş bildirmiştir (Şekil 3.58).



Şekil 3.58. Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arası çakışma çözüm süresi dağılımı.

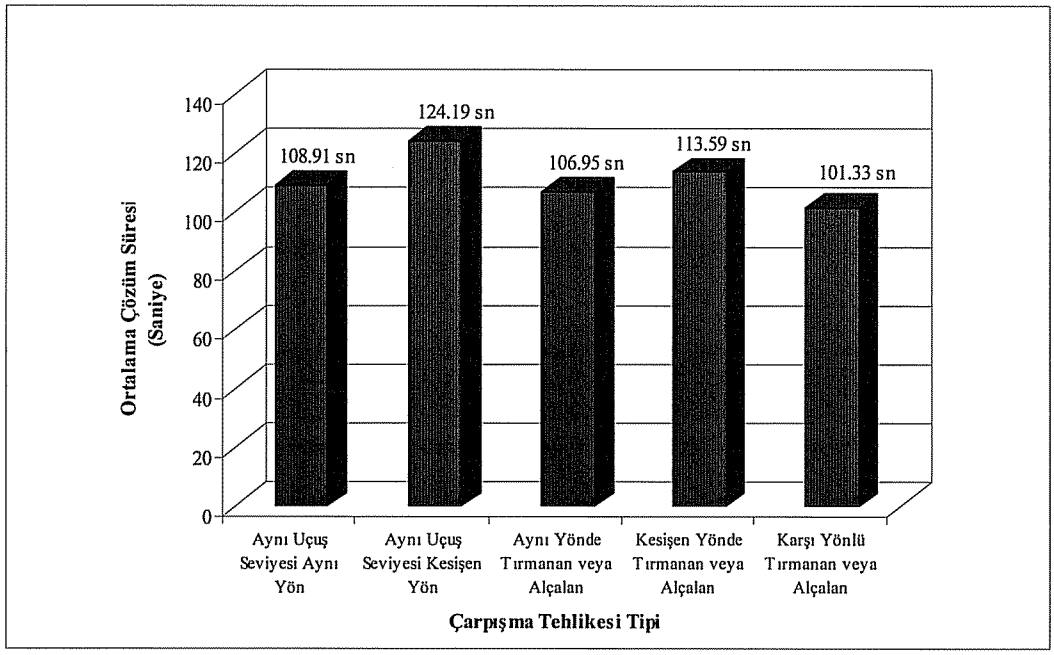
Ankete katılan kontrolör görüşlerinden elde edilen verilere göre 5 farklı tipteki çakışma tespit, çözüm ve toplam tespit-çözüm faaliyeti ortalama süreleri Şekil 3.59, Şekil 3.60 ve Şekil 3.61'de grafiksel olarak verilmiştir.

Bu verilere göre tanımlanan trafikler arası 5 farklı çakışma tipinin kontrolörler tarafından ortalama tespit edilme süresi, yaklaşık 17 saniye ile 22 saniye arasındadır (Şekil 3.59). Çözüm faaliyetleri için harcanan ortalama süre ise 101 saniye ila 125 saniye arasında değişmektedir (Şekil 3.60).

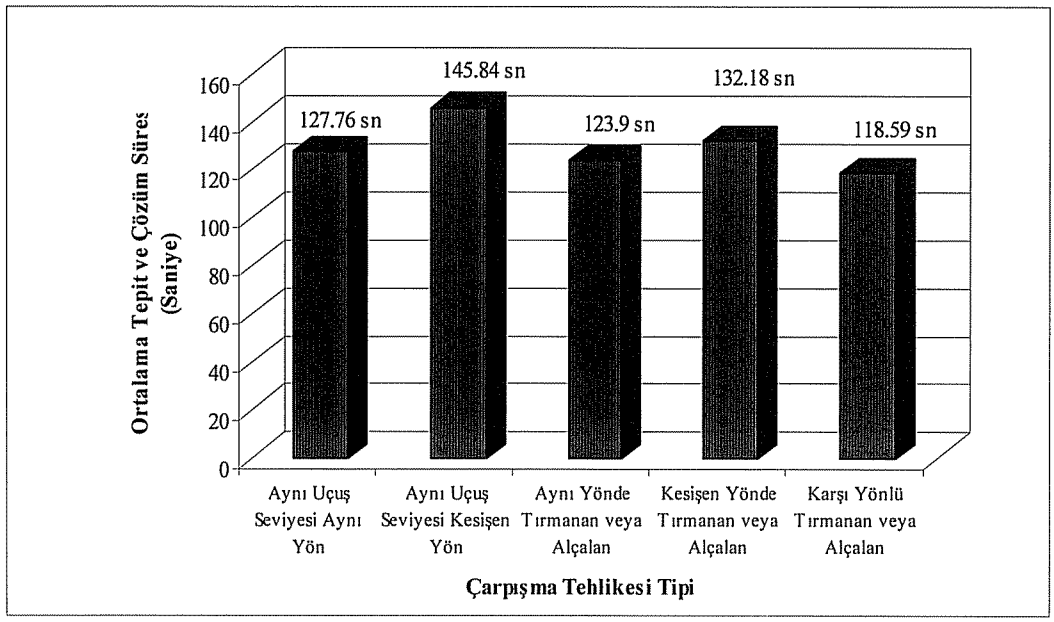


Şekil 3.59. Kontrolör yanıtlarına göre ortalama çakışma tespit süreleri.

Tespit ve çözüm sürelerinin toplamı ile elde edilen ortalama tespit ve çözüm faaliyet süreleri ise Şekil 3.61'de verilmiştir. Bu verilere göre toplam çakışma tespit ve çözüm faaliyeti ortalama süreleri, grafikte de görüldüğü gibi trafikler arası çakışma tipine göre 118 ilâ 146 saniye arasında değişim göstermektedir.



Şekil 3.60. Kontrolör yanıtlarına göre ortalama çakışma çözüm süreleri.



Şekil 3.61. Kontrolör yanıtlarına göre ortalama çakışma tespit ve çözüm süreleri.

3.6.8. Anket bulgularının genel değerlendirmesi

Ankara Yol Kontrol Merkezi'de operasyonel olarak çalışan yol kontrolörlerine uygulanan anketten elde edilen bulguların genel değerlendirmesi aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Ankete katılan kontrolörlerin yoğun trafik periyodunda saatte kontrol edilen maksimum uçak sayısı için verdikleri yanıtların genel ortalaması, 45 olarak bulunmuştur. Özellikle trafiğin en yoğun olduğu saatte kontrol edilebilecek uçak sayısı için kontrolörlerin tercihleri ise bu sayının 28 olması gerektiğini göstermektedir. Bu verilere dayalı olarak gerçekte kontrolörler tarafından yönetilen trafiğin ağır bir iş yükü getirmesi nedeniyle azaltılmasının tercih edildiği sonucuna varılabilir. Ancak Eurocontrol verileri, saatte bir kontrolör tarafından idare edilebilecek trafik miktarının 40 ila 60 uçak arasında olabileceğini yönündedir.
- Ankete katılan kontrolörlerin verdikleri yanıtlardan elde edilen verilere göre, bir sektörde uçağın en fazla kalma süresi 38 dakika olarak belirlenmiş ancak bu sürenin kontrolörler tarafından 20 dakika olarak önerildiği saptanmıştır.
- Ankete katılan kontrolörlerin büyük bir çoğunluğunun, tanımlanan 4 kontrol faaliyetini iş yükü açısından "Çok Önemli" olarak nitelendirdiği belirlenmiş olmakla birlikte çakışma tespit ve çözüm faaliyetleri ile koordinasyon faaliyetlerinin iş yüküne daha fazla etki ettikleri saptanmıştır.
- Ankete katılan kontrolörlerin büyük çoğunluğunun verdiği yanıtlardan elde edilen verilere göre, farklı uçak hareketi kontrol faaliyetlerinden irtifa ve uçuş başı değişikliğinin diğer faaliyetlere göre daha fazla iş yüküne neden olduğu belirlenmiştir. Yine bu faaliyetler için hesaplanan gerekli talimatları uygulama/uygulatma süreleri de bu iki faaliyetin kontrolörlerin meşguliyet süresini artırdığını göstermektedir.
- Türk hava sahası eş zamanlı sivil ve askeri kullanıma açık olması, askeri otoritelerin sivil hava trafiğinin daha uygun rota takiplerine izin

vermemesi ve havayolunun uçuş minimalarını yüksek tutmaları nedeniyle kontrolörlerin verdiği hizmeti kısıtlamaktadır [55]. Anketten elde edilen bulgular, kontrolörler açısından en fazla iş yükünün askeri ünitelerle yapılan koordinasyonlar olduğunu doğrulamaktadır. Yine bu faaliyete ilişkin ortalama süreler, kontrolörler açısından meşguliyet süresindeki artışı yansıtmaktadır.

- Genel kontrol faaliyetleri içerisinde en fazla iş yükü nedeni olarak değerlendirilen çakışma tespit ve çözüm faaliyetleri, meydana gelen çakışma tipine göre kendi içerisinde farklı bir dağılım göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, en fazla iş yükünün karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmalarının tespit ve çözümü ile meydana geldiğini göstermektedir. Ortalama tespit ve çözüm süreleri açısından ise aynı uçuş seviyesi ve kesişen yönlerdeki trafik çakışmalarının, kontrolörleri daha fazla meşgul ettiği söylenebilir.

Toplam hava sahası iş yükü modelinde kullanılan ilgili faaliyet katsayıları ve ortalama kontrol faaliyet süreleri, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da özet olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5. İlgili kontrol faaliyeti ağırlık katsayıları.

Kontrol Faaliyetleri	Sembol	Ortalama Değeri
İzleme Faaliyeti	$\mathbf{F_i}$	4,18
Koordinasyon Faaliyeti	$\mathbf{F_K}$	4,61
Aynı ACC birimi içerisinde sektörler arası koordinasyon	C_{K1}	3,82
Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon	C_{K2}	3,93
Askeri ünitelerle koordinasyon	C_{K3}	4,60
Komşu ACC birimleri ile koordinasyon	C_{K4}	4,14
Çakışma Tespit-Çözüm Faaliyeti	$\mathbf{F_C}$	4,69
Aynı uçuş seviyesinde aynı yöndeki trafikler arasında	C_{C1}	3,61
Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerdeki trafikler arasında	C_{C2}	4,20
Aynı yönde tırmanan ve alçalan trafikler arasında	C_{C3}	3,88
Kesişen yönde tırmanan ve alçalan trafikler arasında	C_{C4}	4,39
Karşı yönlü tırmanan ve alçalan trafikler arasında	C_{C5}	4,64
Uçak Hareket Değişim Faaliyeti	$\mathbf{F_H}$	4,29
Uçuş Seviyesi Değişikliği	C_{H1}	4,49
Hız Değişikliği	C_{H2}	3,53
Uçuş Başı Değişikliği	C_{H3}	4,17
Direkt Rota Verme	C_{H4}	3,43

Çizelge 3.6. İlgili ortalama faaliyet süreleri.

Kontrol Faaliyetleri	Sembol	Ortalama Süre (Saat)
Koordinasyon Faaliyetleri		
Aynı ACC birimi içerisinde sektörler arası koordinasyon	T_{KS1}	0,007
Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon	T_{KS2}	0,008
Askeri ünitelerle koordinasyon	T_{KS3}	0,016
Komşu ACC birimleri ile koordinasyon	T_{KS4}	0,011
Uçak Hareket Değişim Faaliyetleri		
Uçuş Seviyesi Değişikliği	T_{HS1}	0,007
Hız Değişikliği	T_{HS2}	0,005
Uçuş Başı Değişikliği	T_{HS3}	0,006
Direkt Rota Verme	T_{HS4}	0,005
Çakışma Tespit ve Çözüm Faaliyetleri		
Aynı uçuş seviyesinde aynı yöndeki trafikler arasında	T_{CS1}	0,035
Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerdeki trafikler arasında	T_{CS2}	0,041
Aynı yönde tırmanan ve alçalan trafikler arasında	T_{CS3}	0,034
Kesişen yönde tırmanan ve alçalan trafikler arasında	T_{CS4}	0,037
Karşı yönlü tırmanan ve alçalan trafikler arasında	T_{CS5}	0,033

3.7. Hava Sahası Sektör Tasarımı Matematiksel Modeli

Bu bölümde hava sahasının kare ızgaralara nasıl ayrıştırıldığı ve kontrolör iş yükünün toplam hava sahası iş yükü modeli ile nasıl tanımlandığı ayrı başlıklar altında detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Çalışmanın bu aşamasında her biri bir hizmet bölgesi olarak adlandırılan kare ızgaralar aracılığıyla hava sahası optimum sektör sınırlarının oluşturulması problemi tanımlanmaktadır. Hava sahası sektör tasarım modeli, çalışmanın 2. bölümünde detaylı bir şekilde anlatılan Yousefi [49]'nin modelinden yola çıkılarak tesis yerleşim problemi olarak ele alınmıştır. Model, gerek ızgara temelli bölme yaklaşımındaki farklılıklar, gerekse iş yükü matematiksel modelindeki değişikliklerle birlikte yeni bir amaç ve kısıt fonksiyonu ilavesi ile yeniden düzenlenmiştir.

Çalışmada temel olarak mevcut sektör sınırlarından bağımsız bir yaklaşım uygulanmıştır. Bu doğrultuda noktasal olarak yapılan trafik analizi ile sektör merkez noktaları için aday kaynak noktalar belirlenmiştir. Seçilen bu noktalar göz önünde bulundurularak, kaç sektör açılmalı ve açılan sektörlerin optimum sınırları ne olmalı sorularına yanıt aranmaktadır.

Bu bölümde öncelikle kümele kavramının temel mantığı hakkında genel bilgi verildikten sonra hava sahası sektörizasyon problemi matematiksel modeli ortaya koyulmuştur.

3.7.1. Kümeleme algoritması

Küme kavramı açıklanırken üzerinde durulması gereken en önemli konu, topluluğu oluşturan nesnelerin belirlenmiş olmasıdır. Kümeyi oluşturan nesneleri bir araya getiren ortak özellik; benzerlik, yakınlık, uzaklık gibi değişik kavramlarla tanımlandığından küme kavramı için tek bir açıklama yapmak oldukça güçtür. Bu güçlüğe rağmen küme kavramı, belirlenmiş nesneler topluluğu olarak açıklanabileceği gibi, ortak özelliklere sahip birlikte ele alınan nesneler topluluğu olarak da tanımlanabilir.

Yığını meydana getiren nesnelerin birden fazla özelliği itibariyle gözlemlenmesi sonucu elde edilen verilerin yorumlama bakımından karmaşık bir yapıya sahip olması ya da birimlerin yapısı hakkında kesin bilgi sahibi olunmaması durumunda sınıflandırma yapmak oldukça güç bir iştir. Bu durumda birimlerin doğal sınıflamasını bulma gereksinimi ortaya çıkmaktadır. İşte kümeleme çözümlemesinin en temel amacı, karmaşık yapılara sahip ya da hakkında kesin bilgi sahibi olunmayan veri setlerinden nesnelerin doğal sınıflamasını bulmak ve benzer birimleri aynı kümede toplamaktır [74].

Birbirine benzer olan birimlerin ya da değişkenlerin saptanması ve kümelerde toplanması amacıyla uygulanan çok değişkenli çözümleme tekniklerine genel olarak kümeleme çözümlemesi adı verilmektedir [75].

Kümeleme veri madenciliği, istatistik, biyoloji vb. gibi pek çok alanda kullanılır. Marketlerde farklı müşteri gruplarının keşfedilmesi ve bu grupların alışveriş örüntülerinin ortaya konması, biyolojide bitki ve hayvan sınıflandırmaları ve işlevlerine göre benzer genlerin sınıflandırılması, şehir planlanmasında evlerin tiplerine, değerlerine ve coğrafik konumlarına göre gruplara ayrılması gibi uygulamalar tipik kümeleme uygulamalarıdır. Kümeleme aynı zamanda Web üzerinde bilgi keşfi için dokümanların sınıflanması amacıyla da kullanılabilir.

Literatürde pek çok kümeleme algoritması bulunmaktadır. Kullanılacak olan kümeleme algoritmasının seçimi, veri tipine ve amaca bağlıdır. Genel olarak baslıca kümeleme yöntemleri şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Bölme yöntemleri
- Hiyerarşik yöntemler
- Yoğunluk tabanlı yöntemler
- Izgara tabanlı yöntemler
- Model tabanlı yöntemler [76].

Kümelemede p sayıda değişkene göre birimler ya da değişkenler arasındaki uzaklıkları hesaplamak için en sık kullanılan uzaklık ölçüleri şu şekilde verilmektedir:

- Minkowski Uzaklığı,
- Öklid (Euclide) Uzaklığı,
    a. Ölçekli Öklid Uzaklığı,
    b. Binary Öklid Uzaklığı,
- Pearson Uzaklığı,
- Manhattan (City-Blok) Uzaklığı,
- Mahalanobis Uzaklığı,
- Hotelling T^2 Uzaklığı,
- Canberra Uzaklığı [77].

3.7.2. Geliştirilen modelde kullanılan parametreler

3.7.2.1. Kare birim iş yükü

Hizmet bölgesi olarak tanımlanan her bir kare ızgara birim içerisinde meydana gelen kontrolör iş yükünün hesaplanması oldukça büyük boyutlu bir veri analizi gerektirmektedir. Uçak performanslarındaki farklılıklara, takip edilen yolların uzunluğuna bağlı olarak uçakların bir hizmet bölgesi içerisinde kalma süresi değişim göstermektedir. Bunun yanı sıra farklı uçak hareketleri de her bir hizmet bölgesinde uçaklara verilen hizmetlerdeki farklılıkları ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda her bir uçuş profili ayrı ayrı incelenerek tüm kare

ızgara birimler için toplam hava sahası iş yükü modelinde yer alan ve modelde girdi olarak kullanılan veriler hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarla ilgili detaylı bilgi bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

3.7.2.2. Sektör kapasitesi

Kontrolör iş yükü, sektör kapasitesinin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Uçak sayısının kontrolör iş yükünün hesaplanmasında tek başına yeterli bir gösterge olmadığı önceki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Gerçek trafik verileri kullanılarak hava sahası üzerinde yapılan incelemelerde bazı noktalarda uçak sayısı aynı olsa bile uçaklara verilen hizmetlerdeki farklılıklar nedeniyle iş yüklerinin değişebileceği saptanmıştır. Bu çalışmada sektörler için kapasite değerinin hesaplanmasında anket uygulaması kullanılmıştır. Bu doğrultuda çalışmada tahmini referans kapasite değeri, trafik miktarı ve bu trafiklere verilen kontrol hizmetleri göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Bu verilere dayalı olarak yapılan hesaplamalar, çalışmanın uygulama bölümünde verilmiştir.

3.7.2.3. Aday sektör merkez noktaları ve sektör sayısı

Hava sahası sektör tasarım modeli, mevcut sektör sınırlarından bağımsız olarak ele alınmaktadır. Gerçekte her bir sektör, kapalı şekilde bir çokgensel bölgedir. Açılacak sektörler, oluşturulan ızgara birimlerden her birinin tanımlanan sabit bir noktaya atanması ile oluşturulacaktır. Bu nedenle sabit ve yeri coğrafik olarak tanımlanmış noktaların belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Uçaklar, havadaki hareketleri esnasında radyo seyrüsefer yardımcıları ile tanımlanmış hava yolları üzerinde seyretmektedir. Buradan hareketle yerleşim yeri sabit olan bu noktalar, trafik yoğunluklarına göre analiz edilmiş ve aday merkezler belirlenmiştir.

Çalışmada sektör sayısı, bir parametre olarak yer almaktadır. Burada sektör sayısının belirlenmesinde en önemli faktör, anket çalışması sonucunda elde

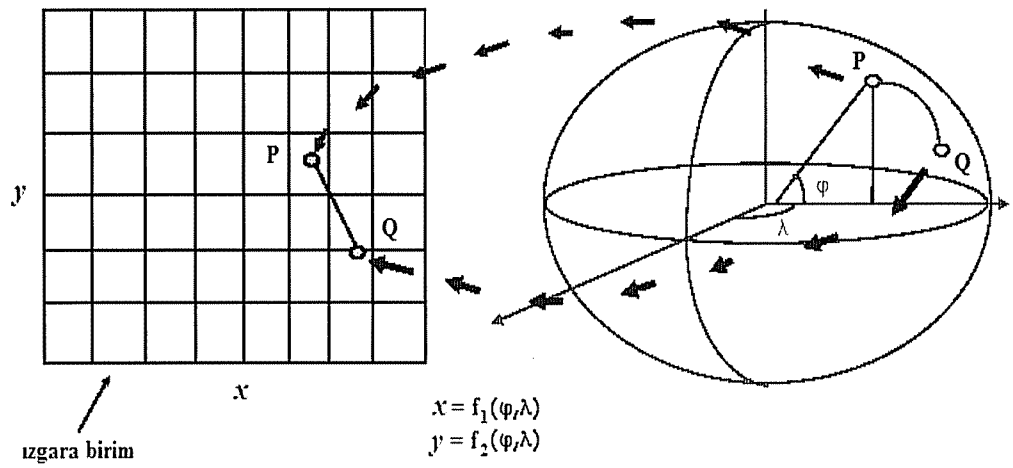
edilen verilere dayalı olarak hesaplanan kapasite miktarıdır. Optimal sektör sayısı aşağıda verilen 3.6 denklemi ile hesaplanmıştır.

$$S = \frac{Toplam\ hava\ sahası\ iş\ yükü}{Sektör\ kapasitesi} \tag{3.6}$$

3.7.2.4. Mesafe

Kare birimler ve her bir *j* sektörü arasındaki mesafe, kümeleme algoritmasının amaç ve kısıt fonksiyonlarında yer almaktadır. Harita üzerinde her bir kare birim, merkez noktasının enlem ve boylam değerleriyle tanımlanmaktadır. Benzer şekilde her bir aday sektör merkez noktasının yeri de bulundukları noktanın enlem ve boylam değerleriyle tanımlanmıştır. Bu çalışmada her bir *i* kare birimi ve *j* sektör yeri arasındaki mesafenin hesaplanabilmesi amacıyla harita projeksiyon koordinat sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.62). Hava sahası analiz aracı ile temin edilen projeksiyon koordinat değerleri kullanılarak her bir *i* kare birimi ve *j* sektör yeri arasındaki mesafe 3.7 denkleminde görüldüğü üzere Öklid mesafesi kullanılarak hesaplanmıştır.

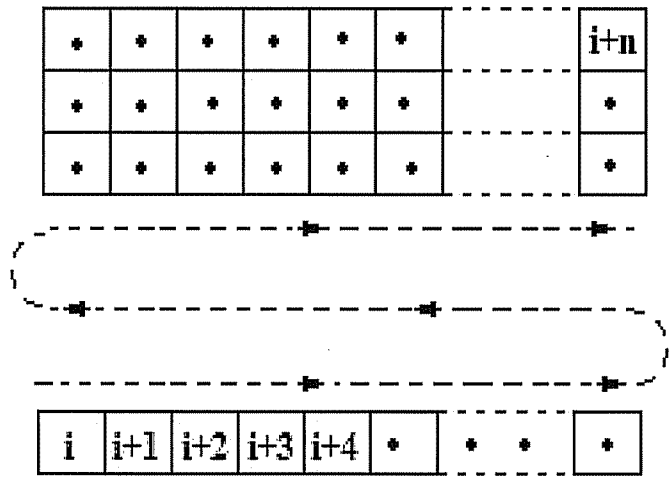
$$d_i^j = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (y_{i1} - y_{j1})^2} \tag{3.7}$$



Şekil 3.62. Coğrafik koordinatların düzlemsel koordinatlara dönüşümü [78].

3.7.3. Kümeleme algoritması ile kare birimlerin gösteriminde uygulanan geometrik yaklaşım

Harita üzerinde enlem değerleri yukarıya, boylam değerleri ise sağa doğru gidildikçe artmaktadır. Buradan hareketle hesaplama karmaşıklığını azaltmak üzere her bir kare birim, en düşük enlem ve boylam değerinden başlayarak tek bir harf kodu ile tanımlanmıştır (Şekil 3.63).



Şekil 3.63. Kare ızgara birimlerin gösterimi.

3.7.4. Kümeleme algoritması ile sektör tasarımı matematiksel modeli

Hava sahası sektör tasarım probleminin matematiksel modelinde kullanılan semboller, karar değişkenleri, parametreler, amaç ve kısıt fonksiyonları aşağıda tanımlanmıştır.

Semboller

N_i : Kare birimler için komşuluk kümesi

i : Kare birim indisi $i \in \{1,.....n\}$

j : Sektör indisi $j \in \{1,.....m\}$

n : Kare birim sayısı

m : Potansiyel sektör sayısı

S : Açılacak sektör sayısı

Parametreler

$wl(i)$: Her bir kare birim iş yükü (Birim iş yükü/saat)

d_i^j : Her bir kare birim ve aday sektör merkez noktası arasındaki mesafe (km)

Karar değişkenleri

$x_i^j = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ Eğer i kare birimi j sektörüne atanmışsa 1, Diğer durumda 0. (3.8)

$y_j = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ Eğer j sektörü açılmışsa 1, Diğer durumda 0. (3.9)

WLT : Sektör iş yükü

D_j : Sektör mesafesi

Amaç fonksiyonları

Birinci amaç; Maksimum sektör iş yükünün en küçüklenmesidir. Bir sektör için toplam iş yükü, (3.10) eşitliği ile tanımlanmıştır. Bu eşitlikte wl_i, her bir kare birim iş yükü wl^j ise toplam sektör iş yüküdür. Maksimum sektör iş yükünün en küçüklenmesi ifadesi de (3.11) eşitliği ile gösterilmiştir.

$$wl^j = \sum_{i=1}^{n} wl_i \cdot x_i^j \qquad \forall j \in \{1,.....,m\} \tag{3.10}$$

$$F_1(x) = \underset{j \in J}{Enb} \sum_{i=1}^{n} wl_i \cdot x_i^j \tag{3.11}$$

Maksimum iş yükünü göstermek üzere yeni bir değişken tanımlanarak WLT ile gösterilmiş ve (3.12) eşitliği ile tanımlanmıştır.

$$WLT = \underset{j \in J}{Enb} \sum_{i=1}^{n} wl_i \cdot x_i^j \tag{3.12}$$

Bu ilişkiyi göstermek üzere bir kısıt ilave edilerek eşitlik (3.13) ile tanımlanmıştır.

$$\sum_{i=1}^{n} wl_i \cdot x_i^j \le WLT \qquad \forall j \in J \tag{3.13}$$

Bu şekilde WLT en küçüklendiğinde bu kısıt, *WLT*'nin tüm *j*'ler için $\sum_{i=1}^{n} wl_i \cdot x_i^j$ 'den büyük olmasını garantileyecektir. Bunun yanı sıra *WLT*'nin optimal değeri, $\sum_{i=1}^{n} wl_i \cdot x_i^j$ 'nin maksimum değerinden daha büyük olmayacaktır. Bu sayede WLT'nin hem olabildiğince küçük, hem de *j* üzerinden maksimum iş yüküne eşit değeri alması sağlanmaktadır.

İkinci amaç; Her bir *i* kare birimi ile *j* sektör yeri arasındaki mesafenin en küçüklenmesidir. (3.14) ile ifade edilen bu amaç, tüm *i* ve *j* 'ler için toplam mesafenin en küçüklenmesiyle sağlanmaktadır.

$$F_2(x) = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{m} d_i^j \cdot x_i^j \tag{3.14}$$

Üçüncü amaç; Her bir *i* kare birimi ve *j* sektörü arasındaki maksimum mesafenin en küçüklenmesidir.

$$F_3(x) = \sum_{j}^{m} D_j \tag{3.15}$$

Bu tanımlar ışığında 3 amaçlı doğrusal karma tam sayılı hava sahası sektör tasarım modeli amaç ve kısıt fonksiyonları aşağıda verilmiştir:

$$\text{Enk } [F_1(x), F_2(x), F_3(x)] \tag{3.16}$$

Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^{m} x_i^j = 1 \qquad \forall i \in \{1,.....n\} \tag{3.17}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i^j \le n \times y_j \qquad \forall j \in \{1,.....m\} \tag{3.18}$$

$$x_i^j \le \sum_{k \in N_i} x_k^j \quad \forall i, j \text{ ve } N_i = \{a | a \text{ i' ye komsudur}\} \tag{3.19}$$

$$\sum_{j=1}^{m} y_j = S \tag{3.20}$$

$$D_j \ge d_i^j \cdot x_i^j \qquad \forall i \in \{1,....n\} \quad \forall j \in \{1,.....m\} \tag{3.21}$$

$$WLT \ge \sum_{i}^{n} wl_i \cdot x_i^j \quad \forall j \in \{1,.....m\} \tag{3.22}$$

$$x_i^j = \{0,1\} \quad \forall i \in \{1,.....n\} \quad \forall j \in \{1,.....m\} \tag{3.23}$$

$$y_j = \{0,1\} \quad \forall j \in \{1,.....m\} \tag{3.24}$$

(3.17) ve (3.18) atama kısıtlarıdır. Her bir kare birimin sadece 1 sektöre atanmasını garantilemektedir. (3.19), kare birimler arası bağlantı kısıtıdır. N_i, her bir kare birime komşu olan birimlerin kümesidir. Bu sayede her bir kare birim, en az bir komşuluğu olmadıkçı bir sektöre atanmayacaktır. m sayıda potansiyel sektör tanımlanmıştır. Bunlardan en az S tane sektörün açılması, (3.20) kısıtı ile sağlanmaktadır. (3.21) ve (3.22), (3.11) ve (3.15) ile tanımlanan amaç fonksiyonlarının kısıtlardır. Bu kısıtlarla maksimum olan iş yükünün en küçüklenmesi ve uzak noktalara atanabilecek olası kare birimlerin en yakın sektörlere atanması garantilenmektedir.

3.7.5. Çok amaçlı optimizasyon yöntemleri ve çözüm yaklaşımları

Amaç fonksiyonu sayısının artırılması, dolayısıyla pratikteki problemleri daha gerçekçi şekilde ele alma gayretleri "Çok Amaçlı Karar Verme" bilimini ortaya çıkarmıştır. Genelde çok amaçlı karar verme problemi matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

Amaç fonksiyonları

$$\text{Enb } [F_1(x), F_2(x), ...F_m(x)] \tag{3.25}$$

Kısıtlar

$$G_k(x) \leq 0 \quad k = 1,2,.....p \tag{3.26}$$

$$x \geq 0$$

Burada x, n boyutlu karar değişkenleri vektörüdür. Bu problem *Vektör Maksimizasyonu Problemi* olarak bilinmektedir. Görüldüğü gibi bir amaç fonksiyonu yerine m tane amaç fonksiyonu ihtiva eden bir vektörün maksimize edilmesi söz konusudur. Problemin optimum çözümü, tüm amaç fonksiyonlarını eş zamanlı olarak en büyükleyen (minimizasyon problemleri için de en küçükleyen) çözümdür. Böyle bir çözüme ulaşmak çok zordur. Genellikle göz önüne alınan amaçlar, diğer bir ifadeyle değerlendirme ölçütleri birbiri ile çelişkili ve negatif yönde etkileşimlidir [79]. Uygulamada genel olarak Pareto optimal

(uzlaşık) çözümler önem kazanır. Pareto optimalite felsefesinde, bir amacı iyileştirme ancak diğer amaçlardan fedakârlık etme yoluyla sağlanmaktadır. Matematiksel olarak her pareto optimal çözüm, çok amaçlı optimizasyon probleminin aynı derecede kabul edilebilir bir çözümüdür. Bu çözümler içinden ideale en yakın olanlar seçilmeye çalışılır. Dolayısıyla çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü ile pareto optimal olan ve karar vericinin gereksinimlerini yerine getirecek, uygun bir çözümün bulunması anlaşılmaktadır.

Karar vericinin tercihleri problemin çözümü sırasında değişik şekillerde göz önüne alınabilir. Bu kapsamda tercihleri problemin çözümü sırasında farklı şekillerde ele alan birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler şu şekilde sınıflandırılabilir:

1. Tercih bilgisinin kullanılmadığı yöntemler (No-Preference method),
2. Sonsal tercih bilgisini kullanan yöntemler (A Posteriori Methods)
   - Epsilon kısıt, Ağırlıklandırma yöntemi vb.
3. Önsel tercih bilgisini kullanan yöntemler (A Priori Methods)
   - Hedef programlama, Ağırlıklandırılmış toplam yöntemi vb.
4. Adımsal geliştirimli tercih bilgisini kullanan yöntemler (Interactive Methods).
   - STEM, GDF, Z-W, NIMBUS, GUESS, LBS vb [80].

3.7.5.1. Skalerleştirme

Çok amaçlı eniyileme problemlerinin pareto çözümlerini elde etmek için geleneksel yaklaşım skalerleştirmedir. Skalerleştirme, Denklem 3.27'deki gibi p amaçtan oluşan çok amaçlı problemleri tek amaçlı probleme dönüştürmeyi sağlar [62].

$$Enk \ (f_1(x),.....f_p(x)) \tag{3.27}$$

Bu çalışmada en çok kullanılan skalerleştirme yöntemlerinden *Ağırlıklı Toplam Yöntemi* ile Gasimov tarafından önerilen ve çeşitli çalışmalarda uygulanan [62,63] *Konik Skalerleştirme Yöntemi* kullanılmıştır.

3.7.5.2. Ağırlıklı toplam yöntemi

Bu yönteme göre amaçlar pozitif w_i ağırlıkları ile çarpılarak tek amaç haline dönüştürülürler.

$$\underset{x \in X}{Enk} \sum_{i=1}^{p} w_i \cdot f_i(x) \tag{3.28}$$

Teorem 1: k =1,.....p için $w_k > 0$, $\sum_{k=1}^{p} w_k = 1$ şartını sağlayan pozitif ağırlıklar olsun. Eğer $\hat{x}$, 3.28 probleminin en iyi çözümü ise o zaman 3.27 probleminin de en iyi çözümüdür [62].

Kümeleme esaslı sektör tasarım modeli için geliştirilen tamsayılı modeldeki $F_1(x), F_2(x)$ ve $F_3(x)$ amaç fonksiyonları sırasıyla w_1, w_2 ve w_3 ağırlıkları ile çarpılarak birleştirilmiş ve 3.29'da verilen amaç fonksiyonu elde edilmiştir.

$$Enk\ f(x) = w_1 \cdot WLT + w_2 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} d_i^j \cdot x_i^j + w_3 \cdot \sum_{j=1}^{m} D_j \tag{3.29}$$

3.7.5.3. Konik skalerleştirme yöntemi

Konik skalerleştirme yöntemi, Gasimov tarafından genel çok amaçlı programlama problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. Ağırlıklı toplam yöntemi, görüntü kümesini hiperdüzlemler ile desteklediğinden sadece amaç fonksiyonları ve değer kümesi dışbükey olduğunda tüm pareto çözümleri verebilmektedir. Konik skalerleştirme yönteminde temel düşünce efektif noktaların koniler ile desteklenmesidir. Bu sayede dışbükey olmayan görüntü kümelerindeki pareto çözümlerin desteklenmesi mümkün olmaktadır.

Gasimov tarafından geliştirilen yöntemin çok ölçütlü problemlere uygulanması için bazı tanımların verilmesi gerekmektedir. $Y = f(x)$ ve $R_+^p = \{(y_1,.....y_p) \in R^p | y_1 > 0,....., y_p > 0\}$ olsun. Herhangi bir $a, b \in R^p$ için izleyen notasyon kullanılmaktadır.

$$a \underset{=}{<} b \quad \text{Eğer} \quad b-a \in R_+^p$$

$$a \leq b \quad \text{Eğer} \quad b-a \in R_+^p$$

$$a < b \quad \text{Eğer} \quad b-a \in \operatorname{int} R_+^p$$

Tanım: Y kümesi R^p'nin boş olmayan bir alt kümesi olsun.

a. $y \in Y$ elemanı eğer $(\{y\}-R_+^p) \cap Y = \{y\}$ şartını sağlıyor ise Y kümesinin Pareto etkin noktası olarak isimlendirilir.

b. Bir kümenin kapanış noktaları cl ile gösterilsin ve $cone(Y): \{\alpha y | \alpha \geq 0 \text{ ve } y \in Y\}$ olsun. Eğer $y \in Y$ noktası Y kümesinde bir Pareto etkin nokta ve R^p'nin sıfır elemanı, $cl\, cone\ (Y + R_+^p - \{y\})$ kümesinin bir Pareto etkin noktası ise has Pareto etkin noktası olarak isimlendirilir.

W kümesi, $W := \{(\alpha, \omega) \in R \times R_+^p | 0 < \alpha < enk\{\omega_1, ..., \omega_p\}\}$ biçiminde tanımlansın.

Teorem 2: $\hat{x} \in X$ elemanının bazı $(\alpha, w) \in W$ için Denklem 3.30 ile verilen skaler en küçükleme probleminin en iyi çözümü olduğunu varsayalım.

$$\underset{x \in X}{Enk}\ \alpha \sum_{k=1}^{p} |f_k(x)| + \sum_{k=1}^{p} w_k \cdot f_k(x) \tag{3.30}$$

Bu durumda $\hat{x} \in X$, 3.27 probleminin bir Benson has etkin çözümüdür.

Teorem 3: $\hat{x} \in X$, 3.27 probleminin bir Benson has etkin çözümü olsun. O zaman $\hat{x} \in X$'in Denklem 3.31 skaler enküçükleme probleminin en iyi çözümü olduğu $(\alpha, w) \in W$ vektörü vardır.

$$\underset{x \in X}{Enk}\ \alpha \sum_{k=1}^{p} |f_k(x) - f_k(\hat{x})| + \sum_{k=1}^{p} w_k \cdot (f_k(x) - f_k(\hat{x})) \tag{3.31}$$

Bu durumda $\hat{x} \in X$, 3.27 probleminin bir Pareto etkin çözümü ise izleyen 3.32 "kaydırılmış problemin"in de Pareto etkin çözümüdür [62].

$$\underset{x \in X}{Enk}\ (f_1(x) - c_1 ..... f_p(x) - a_p) \tag{3.32}$$

Hava sahası sektör sınır tasarım probleminin çözümü için önerilen üç amaçlı tamsayılı matematiksel modelin çözümünde konik skalerleştirme yöntemi için kullanılan parametreler ve amaç fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

Parametreler:

B_1 : Birinci amaç için referans noktası

B_2 : İkinci amaç için referans noktası

B_3 : Üçüncü amaç için referans noktası

α : Koni parametresi $\{0 \le \alpha \le enk\ w_1, w_2, w_3\}$

Amaç fonksiyonu:

$$Enk\ f(x) = w_1 \cdot (WLT - B_1) + w_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} d_i^j \cdot x_i^j - B_2 \right) + w_3 \cdot \left(\sum_{j=1}^{m} D_j - B_3 \right) + \alpha \cdot \left(|WLT - B_1| + \left| \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} d_i^j \cdot x_i^j - B_2 \right| + \left| \sum_{j=1}^{m} D_j - B_3 \right| \right) \quad (3.33)$$

4. MODELİN TÜRK HAVA SAHASINDA UYGULANMASI

Bu bölümde öncelikle Türkiye hava sahası ve hava trafik sistemi mevcut yapısı hakkında genel bilgi verilerek, hava sahası sektör tasarım modelinde kullanılan parametrelerin gerçek uçuş verilerine dayalı olarak hesaplanması konusuna değinilmiştir, daha sonra da geliştirilen matematiksel modelin sayısal çözüm ve analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

4.1. Türkiye Hava Sahası Mevcut Durumu

Türkiye'nin dışa açılma politikası, gelişen ihracat, turizm ve coğrafi konumu itibariyle yoğunlaşan uluslararası ilişkilerin gerçekleşmesini sağlayan en önemli unsurlardan biri hava taşımacılığıdır. Türkiye uluslararası hava taşımacılığında stratejik bir öneme sahiptir. Ülkenin kıtalararası bir kavşak noktasında bulunması, uluslararası hava taşımacılığında önemli ve stratejik bir yer işgal etmesine olanak sağlamıştır [81].

Türkiye'de sivil havacılığın gelişimi, 2. Dünya Savaşı'ndan sonra başlamıştır. Bu dönemde hem uçakların modernleştirilmesine hem de yeni havalimanlarının yapımına ağırlık verilmiştir. 1949 yılında, Bayındırlık Bakanlığı'na bağlı Hava Meydanları Bürosu kurulmuştur. 1956 yılında çıkarılan bir yasa ile Devlet Hava Meydanları İşletmesi kurularak havalimanlarının işletilmesi ve uçuş güvenliğinin sağlanması bu kuruluşa bırakılmıştır [81].

Türkiye genelinde halen 64 adet havaalanı bulunmaktadır. Bunlardan on beşi uluslararası, yirmi biri iç hat, yirmi biri askeri ve yedisi de askeri havaalanına sivil tesis ilaveli olarak kullanılmaktadır [82].

Hava trafiğinin düzenlenmesi, hava araçlarının güvenli bir şekilde iniş kalkış ve transit uçuş yapabilmelerinin sağlanması amacıyla 2 Yol Kontrol Merkezi (ACC), 16 Yaklaşma Kontrol Merkezi (APP), 34 Meydan Kontrol Kulesi (TWR), 2 Uçuş Bilgi Merkezi (FIC), 19 Havacılık Bilgi Servisi (AIS) ve 25 Arama - Kurtarma Ünitesi (SAR) faaliyet göstermektedir [82,83].

Türkiye hava sahası ve toprakları üzerinde 1.206.000 km^2'lik hava sahası ve 49.639 km'lik uçuş yolu bulunmakta [83] olup, İstanbul Uçuş Bilgi Bölgesi (FIR) ve Ankara Uçuş Bilgi Bölgesi olmak üzere iki bölgeye ayrılmıştır [82].

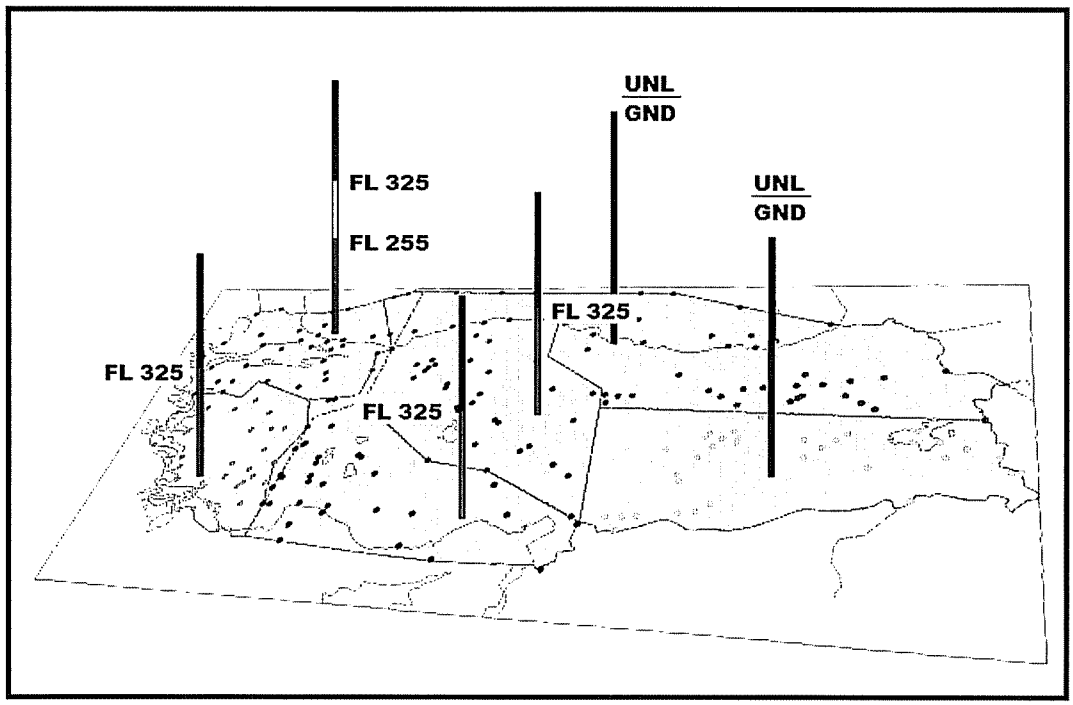
İstanbul FIR, İstanbul Yol Kontrol ve Menderes Yaklaşma Kontrol olarak hizmet vermektedir.

- İstanbul Yol Kontrol gelen, kalkan ve transit geçen tüm uçaklara radar kontrol hizmeti vermektedir. Üst, ara ve alt olmak üzere üç sektör halinde çalışmaktadır.

Ankara FIR, Ankara Yol Kontrol ve Esenboğa Yaklaşma Kontrol olarak hizmet vermektedir.

- Ankara Yol Kontrol gelen, kalkan ve transit geçen tüm uçaklara radar kontrol hizmeti sağlamaktadır. Doğu (Doğu1 ve Doğu 2), Batı (Üst ve Alt) ve Güney (Üst ve Alt), olmak üzere üç sektör halinde çalışmaktadır [82].

Şekil 4.1'de 2007-2008 AIP güncellemeleri dikkate alınarak 2006 tarihli yol haritası doğrultusunda CBS ile hazırlanan Türkiye hava sahası yol sektörleri ve uçuş seviye ayrımları görülmektedir. Türkiye'de ATS hava sahası sınıflandırılması henüz yapılmamıştır [82].



Şekil 4.1. Türkiye hava sahası yol sektörleri.

4.2. Geliştirilen Modelde Kullanılan Parametrelerin Hesaplanması

Çalışmada gerçek uçuş verilerine dayalı olarak bazı parametrelerin hesaplanabilmesi amacıyla büyük boyutlu bir veri analizi işlemi gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda kolaylık sağlayabilmek amacı ile tüm uçuş verileri Excel tablolarına işlenmiştir. Bu kapsamda yapılan işlemler ayrı başlıklar altında incelenmiştir.

4.2.1. Sektör tasarım modelinde uçuş seviyelerinin belirlenmesi

Bir havaalanından kalkıp, bir havaalanına doğru gidecek olan bir uçağın uçuşu ilk tırmanma, seyahat tırmanması, seyahat safhası, ilk alçalma, ilk yaklaşma, bekleme, son yaklaşma gibi çeşitli aşamalardan meydana gelmektedir. Uçaklar belirli seyahat irtifalarına ulaştıklarında sabit hızlarla düz uçuş yaparak yollarına devam ederler. Bu safhada uçaklara yol kontrol hizmeti verilmektedir. Bu çalışma, seyahat safhasında seyreden uçuşları kapsamaktadır.

Günümüzde Avrupa hava sahası içerisindeki kontrol sektörleri, "Avrupa Hava Sahası İçin Tek Bir Gökyüzü Projesi" çerçevesinde uçuş seviyelerine göre üç kategoride tanımlanmaktadır.

- FL 195 < Düşük irtifa sektörleri (İniş, kalkış trafikleri)
- FL 195-FL 245 Geçiş sektörleri
- FL 245 > Yüksek irtifa sektörleri [84].

Çalışmada uygulama alanı olarak tüm Türkiye hava sahası seçilmiş olup, mevcut uygulamada kullanılan dikey irtifa ayrımları dikkate alınmaksızın *Avrupa Hava Sahası İçin Tek Bir Gökyüzü Projesi* kapsamında yüksek irtifa sektörleri için tanımlanmış olan FL 245 üzeri uçuş seviyeleri göz önünde bulundurulmuştur.

4.2.2. Kare ızgara birim iş yükünün hesaplanmasında ilgili parametrelerin belirlenmesi

Havayolu işletmeleri yapacakları uçuştan önce, bu uçuşa ait çeşitli bilgileri uçuş planı olarak ilgili hava trafik ünitesine bildirirler. Bu planlarda uçakların

hava sahasına giriş zamanları, ilgili hava sahasındaki çeşitli noktalardan geçiş zamanları ve uçuş seviyeleri vb. bilgiler mevcuttur.

Çalışma kapsamında daha önce belirtildiği üzere DHMİ'den 2007 yılında trafiğin en yoğun olduğu gündeki iki pik saat diliminde gerçekleşmiş Merkezi Akış Yönetim Birimi-CFMU uçuş verileri temin edilmiştir. Bu verilerde uçakların çağrı kodu, uçak tipi, kalkış ve varış noktaları, takip ettikleri fiksler, bu fiksler üzerindeki zaman ve uçuş seviyeleri bilgileri mevcuttur. İlgili uçuş verilerinin 2 dakikalık bölümü Ek 7'de verilmiştir. 3. bölümde detaylı bir şekilde anlatılan toplam hava sahası iş yükü modelinde bazı hesaplamalarda kullanılmak üzere ilâve bir takım verilere gerek duyulmaktadır. Bu doğrultuda ilgili verilerin temini için öncelikle ayrıntılı bir uçuş profili analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Modelde tanımlanan dört iş yükü değişkeni için diğer ilgili parametreler aşağıdaki alt başlıklar altında incelenmiştir.

4.2.2.1. İzleme iş yükü parametrelerinin hesaplanması

İzleme iş yükü, her bir ızgara birim içerisindeki uçak sayısı ve bu uçaklar için maksimum izleme süresi ile hesaplanır. Maksimum izleme süresinin belirlenebilmesi için uçak hızlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmalar aşağıda açıklanmıştır.

a. Uçak hızlarının belirlenmesi

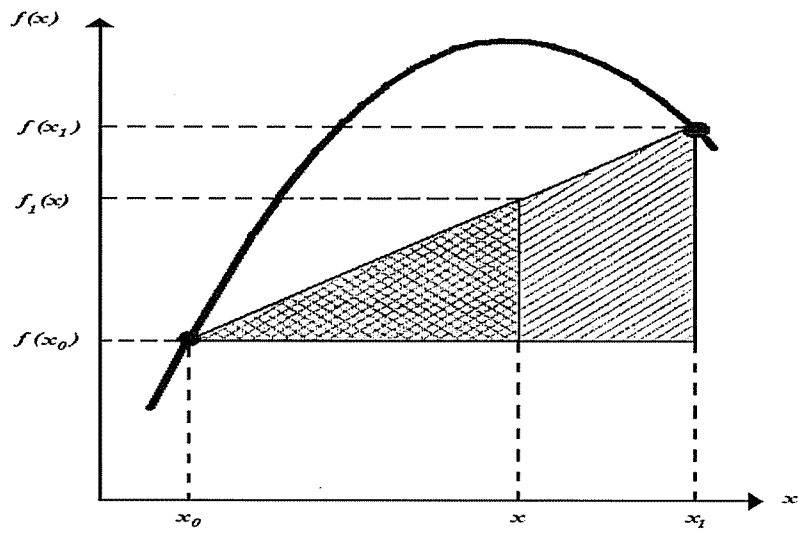
Çalışmada kullanılan hız değerleri, uçak tiplerinin uçuş seviyeleri göz önünde bulundurularak uçak performansları dökümanı-BADA (Base of Aircraft Data)'dan [85] alınmıştır. Dökümanda yer almayan ara uçuş seviye değerleri ise interpolasyon yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

İnterpolasyon bir fonksiyonun verilmiş değerlerinden hareketle bu fonksiyonun bu aralıkta bilinmeyen değerlerinin hesaplanması işlemidir. Diğer bir ifade ile ara değer bulma olarak da isimlendirilmektedir. İnterpolasyon, eldeki verilerin kapsadığı aralık içinde olan değerleri için hesaplanmaktadır (Şekil 4.2).

$$\frac{f_1(x)-f(x_0)}{x-x_0}=\frac{f(x_1)-f(x_0)}{x_1-x_0} \tag{4.1}$$

İnterpolasyon, 4.1 eşitliğinde görüldüğü şekilde ifade edilmektedir. Bu eşitlik düzenlenerek (4.2)'de verilen 1. dereceden doğrusal interpolasyon formülü elde edilir [86].

$$f_1(x)=f(x_0)+\frac{f(x_1)-f(x_0)}{x_1-x_0}\cdot(x-x_0) \tag{4.2}$$



Şekil 4.2. Doğrusal interpolasyonun grafiksel gösterimi [86].

Bu yaklaşımdan yola çıkılarak ara irtifa değerlerindeki uçak hızlarının hesaplanması amacıyla Şekil 4.2'de görülen grafik, irtifa-hız (h-V) grafiği olarak ele alınmıştır. Farklı uçak tipleri için hesaplanan hız değerleri Ek 8'de verilmiştir.

b. Izgara birim içerisindeki izleme süresinin belirlenmesi

Her bir kare ızgara birim içerisindeki izleme süresi, uçakların takip ettiği yol ve hıza göre belirlenir. Bu doğrultuda her bir uçuş profili için kare ızgara birim içerisindeki izleme süresinin hesaplanmasında 4.3 denklemi kullanılmıştır.

$$T_i=\frac{D_i}{V_u} \tag{4.3}$$

Burada

T_i : İzleme süresi (saat)

D_i : Yol uzunluğu (km)

V_u : Uçak hızı (km/saat)

Izgara birimler içerisindeki yol uzunluklarının belirlenmesinde hava sahası analiz aracından yararlanılmıştır. FL 245 üzerinde pik 2 saatlik zaman dilimi içerisinde hava sahasında toplam 255 uçuş olduğu saptanmıştır. Bu doğrultuda tüm uçakların takip ettikleri yolların uzunlukları CBS'nin mesafe hesaplama aracı vasıtasıyla her bir ızgara birim için ayrı ayrı belirlenmiş ve bulundukları irtifalardaki hız verileri kullanılarak her bir kare birim içerisindeki uçuş süreleri (4.3) denklemi ile hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1'de AUA842Q ve HMS893 çağrı kodları ile tanımlanan 2 farklı uçuş profili için hesaplanan kare ızgara birim izleme süresi $-T_i$ değerleri örnek olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. Uçuş profiline göre kare ızgara birim içerisinde izleme süresinin hesaplanması örneği.

Kare Birim	Çağrı Kodu	Uçak Tipi	Nokta	FL	Yol	TAS (km/saat)	D_i (km)	T_i (saat)
A5	AUA842Q	A320	VESAR	280	N/UN 135	858,59	3,1	0,004
A21	AUA842Q	A320	NEKES	321	N/UN 135	843,41	50,1	0,059
A37	AUA842Q	A320	ADASU	340	N/UN 135	836,38	49,4	0,059
A36	AUA842Q	A320	AYT	340	N/UN 135	836,38	41,2	0,049
A63	AUA842Q	A320	ERGIN	340	N/UN 135	836,38	49,8	0,060
A62	AUA842Q	A320	NESIL	352	N/UN 135	832,12	50,4	0,061
A61	AUA842Q	A320	BALSU	360	N/UN 135	829,90	31,2	0,038
A98	AUA842Q	A320	LAVTA	360	N/UN 135	829,90	51,2	0,062
A133	AUA842Q	A320	IMR	360	N/UN 128	829,90	49	0,059
A168	AUA842Q	A320	RIKSO	360	N/UN 128	829,90	8,6	0,010
A431	HMS893	B733	RIXEN	328	L/UL 620	796,41	9,4	0,012
A390	HMS893	B733	UNSAL	350	L/UL 620	790,12	54,8	0,069
A362	HMS893	B733	FATIH	350	L/UL 620	790,12	54,5	0,069
A326	HMS893	B733	IST	350	L/UL 620	790,12	25,3	0,032
A327	HMS893	B733	YAA	350	L/UL 620	790,12	50,9	0,064
A214	HMS893	B733	KARGI	350	L/UL 620	790,12	61,7	0,078
A177	HMS893	B733	KFK	350	L/UL 620	790,12	63,7	0,081
A142	HMS893	B733	OKLAM	350	L/UL 620	790,12	26,1	0,033
A41	HMS893	B733	MUT	350	L/UL 620	790,12	58,5	0,074
A5	HMS893	B733	VESAR	350	L/UL 620	790,12	7,3	0,009

Her bir kare birim için maksimum izleme süresi ise tüm uçuş profilleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Bu hesaplamanın nasıl yapıldığı Çizelge 4.2'de örnek olarak seçilen A133 kare birimi ile gösterilmiştir. Çizelgede de görüldüğü üzere 2 pik saatlik zaman dilimi içerisinde bu kare ızgara birimde toplam 28 uçuş gerçekleşmiştir. Uçakların hızlarına ve takip ettikleri yolların uzunluğuna bağlı olarak bu birim içerisindeki izlenme süreleri, T_i sütununda görülmektedir. Bu doğrultuda bu kare ızgara birim için maksimum izleme süresi, 0.074 saat (4.44 dakika) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Kare ızgara birimler için maksimum izleme süresinin hesaplanması örneği.

Kare Birim	Çağrı Kodu	Uçak Tipi	Nokta Zamanı	Yol	FL	TAS (km/sa)	Di (km)	Ti (sa)
A133	XLA2194	B763	13:07:00	N/UN 127	370	849,33	50,7	0,060
A133	ELY224	B752	13:20:00	N/UN 128	370	849,33	40,6	0,048
A133	OHY954	A321	13:22:00	G/UG 80	287	845,45	40,6	0,048
A133	AFL4296	T154	13:30:00	G/UG 80	330	860,44	21,1	0,025
A133	TCX108K	B752	13:32:00	W/UW 89	370	849,33	53	0,062
A133	TSO9218	B734	13:41:00	G/UG 80	323	798,26	21,1	0,026
A133	BBT9732	B752	13:54:00	G/UG 80	332	859,70	58,8	0,068
A133	KJC7718	B733	13:55:00	G/UG 80	320	799,37	58,8	**0,074**
A133	KKK044	B752	14:01:00	N/UN 618	274	803,26	58,8	0,073
A133	TOM5748	B752	14:03:00	N/UN 127	340	856,74	48,4	0,056
A133	KKK4041	A319	14:13:00	G/UG 80	299	848,50	58,8	0,069
A133	TTH533	MD82	14:17:00	N/UN 127	255	780,41	40,6	0,052
A133	N485LT	H25B	14:17:00	N/UN 128	341	802,70	48,4	0,060
A133	BLE1740	MD83	14:20:00	N/UN 128	267	794,84	39,9	0,050
A133	THY291	B738	14:22:00	G/UG 80	300	809,55	58,8	0,073
A133	FHY613	A320	14:23:00	N/UN 127	300	851,18	48,4	0,057
A133	PGT175	B734	14:27:00	G/UG 80	293	798,36	58,8	0,074
A133	TCX236L	B752	14:29:00	N/UN 128	360	851,18	48,4	0,057
A133	OHY098	MD83	14:34:00	G/UG 80	290	823,43	58,8	0,071
A133	AUA842Q	A320	14:34:00	N/UN 128	360	829,90	49	0,059
A133	OHY028	MD88	14:37:00	G/UG 80	267	794,84	58,8	**0,074**
A133	GBL6827	A320	14:37:00	N/UN 128	340	836,38	48,4	0,058
A133	ELY343	B738	14:40:00	N/UN 128	360	829,90	40,6	0,049
A133	OHY587	A321	14:52:00	N/UN 128	260	810,48	40,6	0,050
A133	HMS855	B734	14:52:00	N/UN 127	330	795,67	48,4	0,061
A133	TOM1604	B763	14:55:00	N/UN 127	360	851,18	48,4	0,057
A133	PGT2132	A319	14:43:00	KULAR 1E	293	849,06	39,1	0,046
A133	SXS9116	B738	14:53:00	KULAR 1E	350	832,68	38,9	0,047

4.2.2.2. Uçak hareket değişim iş yükü parametrelerinin hesaplanması

Uçak hareket değişiklikleri, uçakların uçuş seviyesi, hız, baş (yörünge) değişimleri ile direkt rotada uçmalarını kapsamaktadır. Çalışmada 3.Bölümde bahsedildiği üzere uçak hareket değişimleri; uçuş seviyesi değişikliği için 750 feet'ten fazla tırmanma veya alçalma, hız değişikliği için 10 knot veya daha fazla, uçuş başı değişikliği için 15°'den fazla ve direkt rota için de tanımlanmış Standart Aletli Kalkış (SID -Standard Instrument Departure) ve Standart Terminal Gelişlerin (STAR-Standard Terminal Arrival) dışındaki rotalarda uçulması olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın bu aşamasında yörünge değişikliklerinin saptanması amacıyla uçuş verilerine her bir yolun harita üzerindeki açısal değerleri eklenmiştir. Farklı uçak hareketlerinin belirlenebilmesi için öncelikle her bir uçuş profili ayrı ayrı incelenmiş ve her bir uçak için seyrüsefer noktaları/fiksler arası uçuş seviyesi, hız, uçuş yörüngesi (baş) verileri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Hava sahası üzerinde 2 pik saatlik zaman diliminde gerçekleşen toplam 255 uçuş için yapılan bu inceleme Çizelge 4.3'de örnek olarak seçilen INX7119, SDM6630 ve SDM6769 çağrı kodlu 3 farklı uçuş profili için gösterilmiştir. Çizelgede de görüldüğü üzere yukarıda tanımlanan farklı uçak hareketleri kapsamında her bir uçuş profili için iki seyrüsefer noktası/fiks arasındaki uçuş seviyeleri, hız değişimleri, yolların açısal farklarına bakılarak yörünge değişimleri hesaplanmış ve her bir değişim 1 olarak belirtilmiştir.

Her bir kare birim için farklı uçak hareketleri ise tüm uçuş profilleri dikkate alınarak belirlenmektedir. Çizelge 4.4'de örnek olarak seçilen A218 kare birimi için farklı uçak hareketleri gösterilmiştir. Toplam 18 uçuşun gerçekleştiği bu kare ızgara birimde iki saatlik pik zaman diliminde 1 baş, 1 hız ve 4 seviye değişikliği olduğu saptanmıştır.

Çizelge 4.3. Farklı uçuş profilleri için uçak hareket değişimlerinin hesaplanması örneği.

Kare Birim	Çağrı kodu	Uçak Tipi	Nokta	Nokta Zamanı	FL	Yol	Radyal (°)	TAS (knot)	Yörünge Değişimi (°)	Hız Değişimi (knot)	Tırmanma/ Alçalma (feet)	Bas Değ.	Hız Değ.	Seviye Değ.	Direkt Rota
A102	INX7119	A321	EKSEN	13:47:00	245	A/UA 16	351	428,25		6,5	T(1000ft)			1	
A140	INX7119	A321	LEMDA	13:48:00	255	A/UA 16	351	434,75		21,45	T(6400ft)		1	1	
A177	INX7119	A321	KFK	13:56:00	319	L/UL 610	324	456,2	-27	-0,2	T(100ft)	1			
A214	INX7119	A321	KARGI	14:03:00	320	L/UL 610	324	456							
A327	INX7119	A321	YAA	14:14:00	320	L/UL 610	324	456							
A326	INX7119	A321	IST	14:20:00	320	L/UL 610	309	456	-15			1			
A361	INX7119	A321	FENER	14:24:00	320	L/UL 610	309	456							
A420	INX7119	A321	VADEN	14:35:00	320	L/UL 610	309	456							
A61	SDM6630	T154	BALSU	13:47:00	263	W/UW 78	30	436,1		32,2	T(4600ft)		1	1	
A100	SDM6630	T154	CRD	13:50:00	309	W/UW 78	30	468,3		-4,7	T(2800ft)			1	
A139	SDM6630	T154	DESEM	13:53:00	337	W/UW 78	30	463,6		-2	T(1000ft)			1	
A139	SDM6630	T154	RESLI	13:54:00	347	W/UW 78	30	461,6		-2,6	T(2300ft)			1	
A177	SDM6630	T154	KFK	13:58:00	370	R/UR 32	64	459	34			1			
A219	SDM6630	T154	HAY	14:10:00	370	R/UR 32	17	459	-47			1			
A296	SDM6630	T154	BAG	14:15:00	370	UT 61	37	459	20	1	A(1000ft)	1		1	
A444	SDM6630	T154	SIN	14:34:00	360	W/UW 96	60	460	23	-1	T(1000ft)	1		1	
A468	SDM6630	T154	ODIRA	14:45:00	370	W/UW 96	60	459							
A431	SDM6769	T154	RIXEN	13:20:00	370	L/UL 620	174	459							
A390	SDM6769	T154	UNSAL	13:24:00	370	DIREKT	Direkt	459							1
A361	SDM6769	T154	GOTAN	13:28:00	370	G/UG 8	219	459	45			1			
A325	SDM6769	T154	DENIZ	13:31:00	370	G/UG 8	219	459							
A285	SDM6769	T154	*BIG	13:36:00	370	G/UG 80	184	459	-35			1			
A246	SDM6769	T154	KONEN	13:40:00	370	G/UG 80	184	459							
A246	SDM6769	T154	DUGLA	13:42:00	370	G/UG 80	184	459							
A208	SDM6769	T154	BERGO	13:46:00	370	G/UG 80	184	459							

Çizelge 4.4. Kare ızgara birimler için farklı uçak hareketlerinin hesaplanması örneği.

Kare Birim	Çağrı Kodu	Uçak Tipi	Nokta	Nokta Zamanı	FL	Yol	Radyal (°)	TAS (knot)	Yörünge Değişimi (°)	Hız Değişimi	Tırmanma/ Alçalma (ft)	Bas Değ.	Hız Değ.	Seviye Değ.	Direkt Rota
A218	KHO7742	MD82	HALIL	13:35:00	330	W/UW 77	24	442							
A218	SDM2276	IL86	HALIL	13:36:00	300	W/UW 77	24	464		-3					
A218	AUI8807	B733	HALIL	13:45:00	350	W/UW 77	197	427							
A218	SDM6614	T154	HALIL	13:50:00	370	W/UW 77	197	457,8							
A218	DNV7519	IL86	HALIL	13:56:00	330	P/UP 29	204	465		-4	A(3600ft)			1	
A218	TAK1108	IL86	HALIL	13:57:00	300	W/UW 77	24	464							
A218	PGT2207	A319	HALIL	14:09:00	330	R/UR 32	244	454	47	-2	T(1000ft)	1		1	
A218	AEW5572	B734	HALIL	14:11:00	320	W/UW 77	24	432							
A218	SXS9113	B738	HALIL	14:11:00	340	R/UR 32	244	452							
A218	THY1412	B738	HALIL	14:16:00	350	P/UP 29	204	450			A(2800ft)			1	
A218	AUI2116	B734	HALIL	14:17:00	320	W/UW 77	24	432							
A218	SBI1826	IL86	HALIL	14:19:00	280	W/UW 77	24	452		15	T(4000ft)		1	1	
A218	THY386	B734	HALIL	14:24:00	250	R/UR 32	244	404,5							
A218	AYZ9541	IL86	HALIL	14:27:00	310	P/UP 29	204	469							
A218	AEW628	A320	HALIL	14:43:00	320	W/UW 77	24	456							
A218	KJC5504	IL86	HALIL	14:47:00	310	R/UR 32	64	469							
A218	AFL4221	T134	HALIL	14:49:00	270	W/UW 77	204	403,5	7						
A218	ORB9530	B734	HALIL	14:56:00	320	W/UW 77	24	432							

4.2.2.3. Koordinasyon iş yükü parametrelerinin hesaplanması

Çalışmada koordinasyon iş yükü FIR içi ve FIR dışı olarak tanımlanmış olup, bu kapsamda toplam hava sahası iş yükü modelinde anlatıldığı üzere 4 farklı koordinasyon faaliyeti dikkate alınmıştır. Koordinasyon iş yükünün hesaplanmasında uçakların rotaları boyunca takip ettikleri noktalardan (Seyrüsefer/Fiks) yararlanılmıştır. Öncelikle bu noktalar, hava sahası giriş-çıkış noktası, seyrüsefer noktası, fiks vb. olma özelliklerine bakılarak tanımlanmıştır. Daha sonra her bir uçuş profili ayrı ayrı incelenerek, kontrolörler tarafından uçaklara verilecek hizmetler belirlenmiştir.

Çizelge 4.5'de 3 farklı uçuş profili için kontrolörler açısından meydana gelen koordinasyon faaliyetleri belirlenmiş ve örnek olarak gösterilmiştir. Koordinasyon faaliyetlerinin belirlenmesinde uçakların bulundukları kare birim içerisindeki noktanın özelliğinden yararlanılmıştır. Meydana gelen her bir koordinasyon faaliyeti 1 ile gösterilmiştir.

Her bir kare ızgara birim içerisindeki koordinasyon faaliyetleri ise ızgara birimler içerisindeki tüm uçuş profilleri ile belirlenmektedir. Çizelge 4.6'da örnek olarak seçilen A292 ve A463 kare birimleri için gerçekleşen koordinasyon faaliyetleri verilmiştir. Buna göre iki pik saatlik zaman diliminde A292 kare ızgara biriminden geçen 5 uçak için sektörler arası koordinasyon faaliyeti gerçekleşirken, A463 kare ızgara biriminin hava sahası üzerinde bir giriş-çıkış noktası olması nedeniyle farklı zamanlarda bu noktadan geçen 15 uçak için komşu ACC koordinasyon faaliyetinin gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 4.5. Farklı uçuş profilleri için koordinasyon faaliyetlerinin hesaplanması örneği.

Kare Birim	Çağrı Kodu	Uçak Tipi	Yol	Nokta	Nokta Özelliği	FL	Nokta Zamanı	TMA Devir Noktası	Sektörler Arası Koord.	ATC Koord.	Askeri Ünite Koord.	Komşu ACC Koord.
A142	AEW5572	B734	W/UW 77	HISAR	Fix	280	13:57:00	1 (Konya)	1			
A218	AEW5572	B734	W/UW 77	HALIL	Fix	320	14:11:00					
A296	AEW5572	B734	A/UA 28	BAG	S/S	320	14:19:00					
A335	AEW5572	B734	A/UA 28	ASTAL	Fiks	320	14:25:00	1 (Ankara)				
A371	AEW5572	B734	A/UA 28	ORMAN	Fix	320	14:31:00					
A408	AEW5572	B734	M/UM 853	INB	S/S (Sektör sınır)	320	14:38:00		1			
A463	AEW5572	B734	M/UM 853	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	320	14:46:00					1
A431	AFL4235	T154	G/UG1	RIXEN	Giriş noktası	360	13:02:00					1
A390	AFL4235	T154	G/UG1	UNSAL	Fix	370	13:07:00	1 (İstanbul)				
A362	AFL4235	T154	G/UG1	FATIH	Fix	370	13:09:00					
A326	AFL4235	T154	M/UM 603	IST	S/S	370	13:11:00					
A323	AFL4235	T154	G/UG 80	EKI	S/S	360	13:19:00					
A285	AFL4235	T154	G/UG 80	*BIG	S/S	370	13:24:00					
A246	AFL4235	T154	G/UG 80	KONEN	Fiks	370	13:27:00					
A246	AFL4235	T154	G/UG 80	DUGLA	Fiks (Sektör sınır)	370	13:29:00	1 (Balıkesir)	1			
A208	AFL4235	T154	G/UG 80	BERGO	Fiks	370	13:33:00	1 (İzmir)				
A320	SHY754	B734	N/UN 131	BELGI	Giriş noktası	350	14:13:00					1
A283	SHY754	B734	N/UN 131	CNK	S/S	350	14:17:00					
A245	SHY754	B734	N/UN 131	SUDES	Fix	350	14:21:00					
A246	SHY754	B734	N/UN 131	DUGLA	Fiks (Sektör sınır)	350	14:24:00	1 (Balıkesir)	1			
A209	SHY754	B734	N/UN 131	NILER	Fix	350	14:29:00					
A173	SHY754	B734	N/UN 131	KULAR	Fix	350	14:35:00					
A137	SHY754	B734	N/UN 131	BAGLU	Fiks	337	14:41:00	1 (Çanakkale)				
A100	SHY754	B734	R/UR 55	CRD	S/S	283	14:44:00			1		

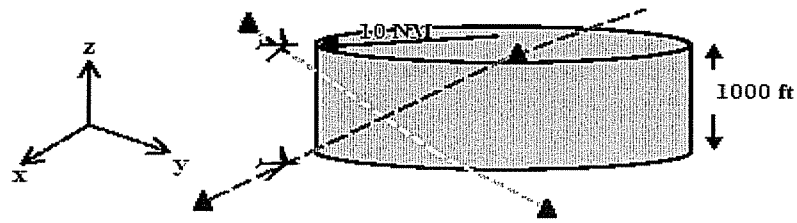
Çizelge 4.6. Kare ızgara birimler için koordinasyon faaliyetlerinin hesaplanması örneği.

Kare Birim	Çağrı kodu	Ucak Tipi	Yol	Nokta	Nokta Özelliği	FL	Nokta Zamanı	Sektörler arası Koordinasyon	ATC Koord.	Askeri ünite Koordinasyonu	Komşu ACC Koord.
A292	THY133	B738	G/UG 8	TOKER	Fiks (Sektör sınır)	280	13:24:00	1			
A292	THY130	B734	G/UG 8	TOKER	Fiks (Sektör sınır)	290	13:38:00	1			
A292	QTR076G	A333	G/UG 8	TOKER	Fiks (Sektör sınır)	370	13:45:00	1			
A292	THA945	B744	G/UG 8	TOKER	Fiks (Sektör sınır)	330	14:46:00	1			
A292	THY136	A320	G/UG 8	TOKER	Fiks (Sektör sınır)	290	14:57:00	1			
A463	QTR042	A332	T/UT 33	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	390	13:08:00				1
A463	JAI227	B773	T/UT 33	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	350	13:17:00				1
A463	SWR242	A332	T/UT 33	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	390	13:38:00				1
A463	MYT085	B763	W/UW 704	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	370	13:55:00				1
A463	CPA065	B742	L/UL 851	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	320	14:09:00				1
A463	KHO7742	MD82	M/UM 853	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	330	14:09:00				1
A463	QFA7585	B744	W/UW 704	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	350	14:17:00				1
A463	TAK1108	IL86	M/UM 853	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	300	14:26:00				1
A463	KLM455	A332	T/UT 33	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	390	14:36:00				1
A463	SDM6802	T154	M/UM 853	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	360	14:40:00				1
A463	CLX792	B744	L/UL 851	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	350	14:43:00				1
A463	KLM427	B772	T/UT 33	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	370	14:43:00				1
A463	AEW5572	B734	M/UM 853	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	320	14:46:00				1
A463	SBI1826	IL86	M/UM 853	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	320	14:48:00				1
A463	AIC150	B744	L/UL 851	KUGOS	Giriş-Çıkış noktası	350	14:59:00				1

4.2.2.4. Uçaklar arası çakışma tespit ve çözüm iş yükü parametrelerinin hesaplanması

Uçaklar arası çakışma riski, iki veya daha fazla uçağın aralarındaki hava trafik otoritelerince belirlenmiş olan minimum emniyetli ayırma mesafesini ihlâli olarak tanımlanmaktadır. Uçakların etrafında bu minimum emniyetli ayırma mesafeleriyle karakterize edilen hava sahasına *koruma alanı* adı verilir. Bu koruma alanının bir başka uçak tarafından ihlâli doğrudan bir çarpışma riski oluşturmasa da teknik olarak uçuş emniyetini tehlikeye sokan bir durumdur. Koruma alanını oluşturan minimum emniyetli ayırma mesafeleri uçuşun gerçekleştiği hava sahalarına göre farklılık göstermektedir [87].

Bu çalışmada FL 245 üzeri uçuşlar için uçaklar arası mesafeler, AIP ENR 1.6'da tanımlanan ayırma kuralları çerçevesinde Şekil 4.3'de görüldüğü üzere yatayda 10 NM dikeyde 1000 feet olarak dikkate alınmıştır [82]. Hava trafik kontrol pratik uygulamalarında 1 dakika 8 mil olarak kabul edilmektedir. Buradan hareketle zaman parametresi olarak 1 dakika seçilmiştir.



Şekil 4.3. Uçak çiftleri arası yakınlaşmaların hesaplanması için seçilen koruma alanı boyutları.

Uçak çiftleri arasında yakınlaşma ve çakışma tiplerinin belirlenmesi amacıyla öncelikle her bir kare birim içerisindeki uçaklar arası zaman farkı hesaplanmıştır. Daha sonra aralarındaki zaman farkı, en az 1 dakika olan uçak çiftleri tespit edilerek, 3. Bölümde detaylı bir şekilde anlatılan 5 farklı çakışma riski tipi için uçuş seviyeleri, tırmanma/alçalma durumları ve takip ettikleri yollar karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.7'de verilen A175, A431 ve A455 kare ızgara birimleri içerisinde koyu renkle gösterilen uçuşlar, aynı uçuş seviyesinde aynı yönde uçan trafikler arasındaki çakışmaların tespitine örnek olarak verilmiştir.

Çizelge 4.7. Uçaklar arası çakışma riskinin belirlenmesi örneği.

Kare Birim	Çağrı Kodu	Uçak Tipi	Nokta	Yol	Radyal	FL	TAS (knot)	Nokta Zamanı	Zaman Farkı	Tırmanma/ Alçalma (ft)
A175	**PGT2207**	A319	KINIK	**R/UR 32**	257	**340**	452,000	**14:25:00**	**00:01:00**	
A175	**SXS9113**	B738	KINIK	**R/UR 32**	257	**340**	452,000	**14:26:00**	00:17:00	
A175	THY386	B734	KINIK	R/UR 32	257	250	404,500	14:43:00		
A431	AFL4235	T154	RIXEN	G/UG1	174	360	460,000	13:02:00	00:03:00	T(1000ft)
A431	AEW229	B734	RIXEN	N/UN 616	174	330	430,000	13:05:00	00:03:00	
A431	HMS893	B733	RIXEN	L/UL 620	174	328	430,400	13:08:00	00:12:00	T(2200ft)
A431	SDM6769	T154	RIXEN	L/UL 620	174	370	459,000	13:20:00	00:02:00	
A431	THY5661	A320	RIXEN	DIREKT	direkt	245	441,500	13:22:00	00:12:00	
A431	BUC7667	MD83	RIXEN	L/UL 620	174	330	442,000	13:34:00	00:06:00	A(1000ft)
A431	**THY1890**	B738	RIXEN	**L/UL 605**	122	**390**	447,000	**13:40:00**	**00:01:00**	
A431	**KAC102**	B772	RIXEN	**A/UA 17**	122	**390**	482,000	**13:41:00**	00:08:00	
A431	AFR1790	A318	RIXEN	N/UN 616	174	350	450,000	13:49:00	00:12:00	A(15800ft)
A431	QTR010	A333	RIXEN	A/UA 17	122	390	470,000	14:01:00	00:06:00	
A431	AUI7789	B734	RIXEN	N/UN 616	174	330	430,000	14:07:00	00:24:00	
A431	LSK661	B733	RIXEN	L/UL 620	174	350	427,000	14:31:00	00:18:00	
A431	ROT263	A318	RIXEN	G/UG 1	174	290	459,000	14:49:00	00:04:00	A(9800ft)
A431	SDM6773	T154	RIXEN	L/UL 620	174	370	459,000	14:53:00	00:04:00	
A431	UKM3249	DC95	RIXEN	N/UN 616	174	330	465,000	14:57:00		
A455	**RCH479**	L101	ODERO	**UP 975**	117	**370**	470,000	**13:04:00**	**00:01:00**	
A455	**BAW125**	B744	ODERO	**UP 975**	117	**370**	482,000	**13:05:00**	00:32:00	
A455	DLH622	A343	ODERO	UP 975	117	370	459,000	13:37:00	00:01:00	
A455	BAW139	B744	ODERO	UP 975	117	350	484,000	13:38:00	00:44:00	
A455	DLH756	B744	ODERO	UP 975	117	370	482,000	14:22:00	00:17:00	
A455	AFR526	B772	ODERO	UP 975	117	370	482,000	14:39:00	00:08:00	
A455	DLH630	B744	ODERO	UP 975	117	370	482,000	14:47:00		

4.2.3. Sektör kapasitesinin belirlenmesi

Çalışmada tahmini referans sektör kapasitesinin hesaplanmasında kontrolörlere uygulanan anket çalışması dikkate alınmıştır. Uçaklar arası çakışma ve çözüm faaliyetleri göz ardı edilerek yapılan kapasite hesaplaması izleme, koordinasyon ve farklı uçak hareketi için meydana gelebilecek iş yüklerini kapsamaktadır. Farklı uçak sayıları için hesaplanan referans sektör kapasitesi değerleri, Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8'de görülen ve 3. Bölümde (3.2), (3.4) ve (3.5) eşitliği ile tanımlanan ilgili iş yükü ağırlık katsayıları (Fi, Fh ve Fk), anket çalışması ile belirlenmiştir. Bu katsayılar, çalışmanın 3. Bölümünde Çizelge 3.5'de görülmektedir. Toplam hava sahası iş yükü modelinde tanımlandığı üzere her bir kontrol faaliyeti kendi içerisinde alt faaliyetlerden oluşmaktadır. Referans kapasite hesaplanırken kaç uçağa hangi tip hizmet verileceğinin belirli olmaması nedeniyle ilgili faaliyet ağırlık katsayıları kendi içerisindeki faaliyetlerin genel ortalaması ile hesaplanmaktadır. Benzer şekilde ilgili faaliyet süreleri de alt faaliyet sürelerinin genel ortalaması ile belirlenir. Bu doğrultuda C_k ve C_h olarak belirtilen ilgili faaliyet iş yükü ağırlık katsayıları ve ilgili faaliyet süreleri T_{ks} ve T_{hs}'nin belirlenmesinde Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verilen değerlerin genel ortalamaları kullanılmıştır. İzleme süresi-T_i için de kontrolörler tarafından önerilen 20 dakikalık zaman (0.34 saat) esas alınmıştır. Yapılan hesaplamalarda iki pik saatlik uçuş verileri kullanılması nedeniyle 2 saatlik kapasite değerleri dikkate alınmaktadır.

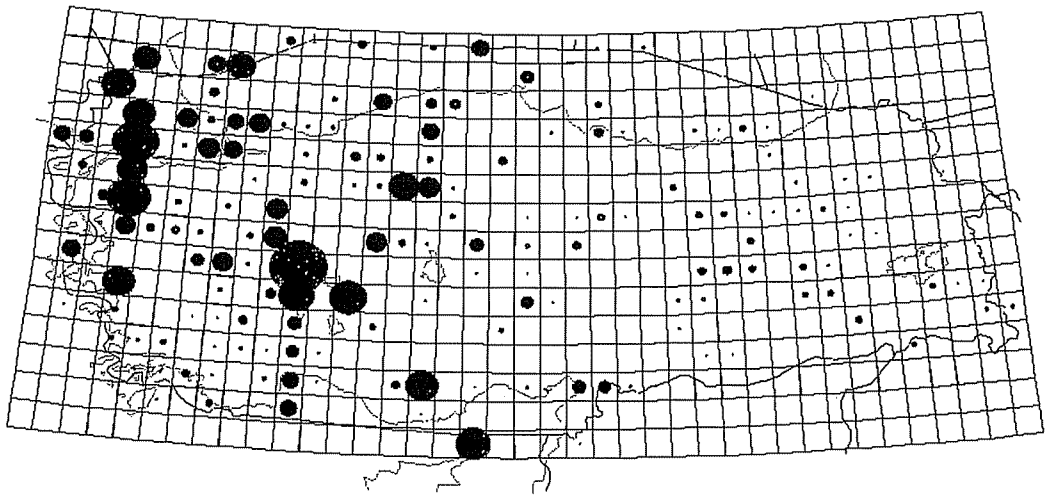
Çizelge 4.8. Sektör referans kapasitesinin hesaplanması.

Uçak Sayısı	F_i	T_i (saat)	WL_i	F_k	C_k	T_{ks}(saat)	WL_k	F_h	C_h	T_{hs}(saat)	WL_h	Saatlik Kapasite	2 Saatlik Kapasite
5	4,18	0,34	7,11	4,61	4,12	0,01	0,95	4,29	3,9	0,006	0,50	8,56	17,12
10	4,18	0,34	14,21	4,61	4,12	0,01	1,90	4,29	3,9	0,006	1,00	17,12	34,23
15	4,18	0,34	21,32	4,61	4,12	0,01	2,85	4,29	3,9	0,006	1,51	25,67	51,35
20	4,18	0,34	28,42	4,61	4,12	0,01	3,80	4,29	3,9	0,006	2,01	34,23	68,46
25	4,18	0,34	35,53	4,61	4,12	0,01	4,75	4,29	3,9	0,006	2,51	42,79	85,58
28	4,18	0,34	39,79	4,61	4,12	0,01	5,32	4,29	3,9	0,006	2,81	47,92	95,85
30	4,18	0,34	42,64	4,61	4,12	0,01	5,70	4,29	3,9	0,006	3,01	51,35	102,69
31	4,18	0,34	44,06	4,61	4,12	0,01	5,89	4,29	3,9	0,006	3,11	53,06	106,11
32	4,18	0,34	45,48	4,61	4,12	0,01	6,08	4,29	3,9	0,006	3,21	54,77	109,54
33	4,18	0,34	46,90	4,61	4,12	0,01	6,27	4,29	3,9	0,006	3,31	56,48	112,96
34	4,18	0,34	48,32	4,61	4,12	0,01	6,46	4,29	3,9	0,006	3,41	58,19	116,38
35	4,18	0,34	49,74	4,61	4,12	0,01	6,65	4,29	3,9	0,006	3,51	59,90	119,81
36	4,18	0,34	51,16	4,61	4,12	0,01	6,84	4,29	3,9	0,006	3,61	61,61	123,23
37	4,18	0,34	52,58	4,61	4,12	0,01	7,03	4,29	3,9	0,006	3,71	63,33	126,65
38	4,18	0,34	54,01	4,61	4,12	0,01	7,22	4,29	3,9	0,006	3,81	65,04	130,08
39	4,18	0,34	55,43	4,61	4,12	0,01	7,41	4,29	3,9	0,006	3,92	66,75	133,50
40	4,18	0,34	56,85	4,61	4,12	0,01	7,60	4,29	3,9	0,006	4,02	68,46	136,92
41	4,18	0,34	58,27	4,61	4,12	0,01	7,79	4,29	3,9	0,006	4,12	70,17	140,34
42	4,18	0,34	59,69	4,61	4,12	0,01	7,98	4,29	3,9	0,006	4,22	71,88	143,77
43	4,18	0,34	61,11	4,61	4,12	0,01	8,17	4,29	3,9	0,006	4,32	73,60	147,19
44	4,18	0,34	62,53	4,61	4,12	0,01	8,36	4,29	3,9	0,006	4,42	75,31	150,61
45	4,18	0,34	63,95	4,61	4,12	0,01	8,55	4,29	3,9	0,006	4,52	77,02	154,04
50	4,18	0,34	71,06	4,61	4,12	0,01	9,50	4,29	3,9	0,006	5,02	85,58	171,15
55	4,18	0,34	78,17	4,61	4,12	0,01	10,45	4,29	3,9	0,006	5,52	94,13	188,27
60	4,18	0,34	85,27	4,61	4,12	0,01	11,40	4,29	3,9	0,006	6,02	102,69	205,38

4.2.4. Aday sektör merkez noktalarının ve sektör sayısının belirlenmesi

Olası sektör merkezleri için aday noktaların belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmada aday sektör merkez noktalarının belirlenmesinde hava yollarının oluşturulmasında kullanılan ve hava sahası üzerinde yerleri coğrafik olarak tanımlanmış VOR, DME gibi seyrüsefer yardımcıları kullanılmıştır.

Çalışmada öncelikle FL 245 ve üzeri olarak belirlenen hava sahası katmanı için trafik yoğunluğu analizi gerçekleştirilmiştir. Buna göre hava sahası üzerinde en yoğun iki pik saatlik zaman diliminde gerçekleşen uçuşlar Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

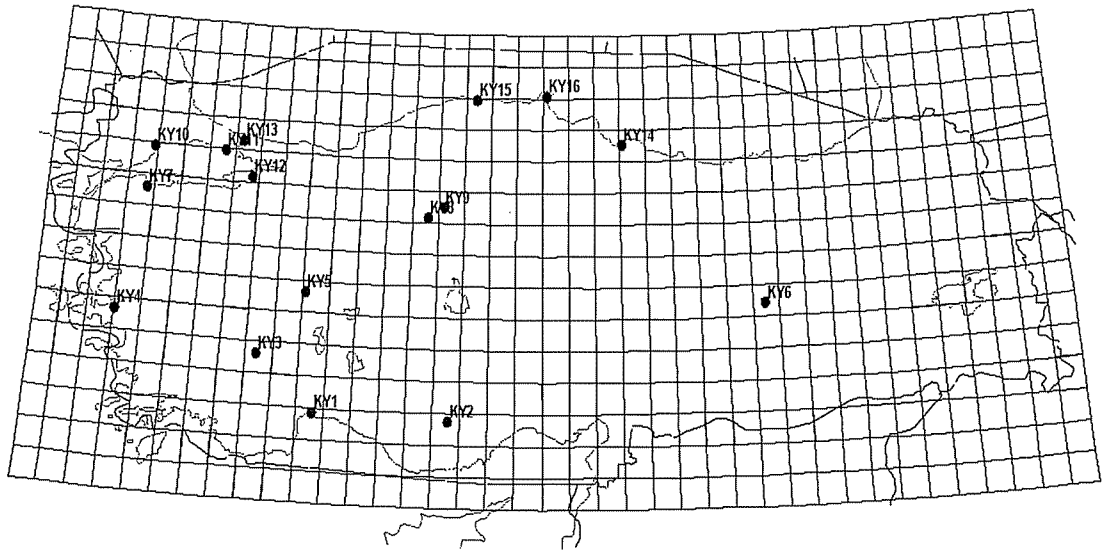


Şekil 4.4. Hava sahası trafik yoğunluğu.

İki pik saatlik zaman diliminde belirlenen hava sahası katmanı için 255 uçuşun gerçekleştiği saptanmıştır. Bu doğrultuda seyrüsefer noktaları üzerindeki trafik yüzdeleri Çizelge 4.9'da verilmiştir. Çalışmada trafik yoğunluğu % 3'ün üzerinde olan 16 seyrüsefer noktası, aday merkez nokta olarak göz önünde bulundurulmuştur. Her bir aday sektör merkezi, bulunduğu noktanın enlem ve boylam değerleri ile tanımlanmıştır. Enlem ve boylam değerleri en küçük olan merkezlerden başlamak üzere her bir aday sektör merkezi bir harf kodu ile gösterilmiştir (Şekil 4.5). Uygulamada kullanılan aday sektör merkezlerine karşı gelen ilgili harf kodları Ek 9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Trafik analizi ve aday sektör merkezlerinin belirlenmesi.

Kare Birim	Seyrüsefer Sistemi Tanıtım Kodu	S/S Sistemi Enlemi (x koordinatı)	S/S Sistemi Boylamı (y koordinatı)	Uçuş Sayısı	Yüzde (%)
A177	KFK	3420	4287	50	19,6
A323	EKI	3058	4531	39	15,3
A41	MUT	3692	4056	29	11,4
A133	IMR	3020	4259	28	11,0
A284	BIG	3050	4477	26	10,2
A296	BAG	3652	4444	26	10,2
A297	BUK	3706	4443	19	7,5
A326	IST	3221	4519	19	7,5
A327	YAA	3275	4516	16	6,3
A36	AYT	3402	4067	15	5,9
A363	BKZ	3281	4570	11	4,3
A444	SIN	3924	4659	11	4,3
A408	INB	3765	4606	9	3,5
A100	CRD	3297	4183	8	3,1
A194	EZS	4368	4283	8	3,1
A378	CRM	4084	4551	8	3,1
A32	DAL	3170	4080	7	2,7
A226	GEM	4034	4330	7	2,7
A283	CNK	2940	4486	7	2,7
A124	SRT	4658	4188	6	2,4
A265	SIV	4088	4386	6	2,4
A384	TBN	4402	4560	6	2,4
A219	HAY	3647	4334	4	1,6
A274	ERZ	4579	4403	4	1,6
A45	ADA	3924	4053	3	1,2
A155	ERH	4261	4224	3	1,2
A49	GAZ	4155	4056	2	0,8
A290	BRY	3323	4458	2	0,8
A80	URF	4323	4116	1	0,4
A121	DYB	4489	4178	1	0,4
A117	KHD	4263	4169	1	0,4
A165	VAN	4820	4254	1	0,4



Şekil 4.5. Seçilen aday sektör merkez noktaları.

Sektör sayısı, parametre olarak kullanılmaktadır. Sektör sayısı, 3. Bölümde verilen (3.6) denklemi ile hesaplanmaktadır. Sektör kapasitesi değerleri, Çizelge 4.8'de verilmiştir. Tüm kare birimlerde meydana gelen iş yüklerinin toplanması ile 2 pik saatlik zaman diliminde tüm hava sahası üzerinde gerçekleşen uçuşlar için meydana gelen toplam hava sahası iş yükü, 508.775 birim iş yükü olarak saptanmıştır. Anket çalışması ile yoğun bir trafik periyodunda saatte maksimum yönetilebilecek uçak sayısı, 28 olarak bulunmuş ve bu uçak sayısı için tahmini sektör kapasitesi, 95.85 birim olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda açılacak optimum sektör sayısı, 5.31 olarak hesaplanmış ve optimum sektör sayısı olarak 6 sektör seçilmiştir.

$$S = \frac{Toplam\ hava\ sahası\ iş\ yükü}{Sektör\ kapasitesi} = \frac{508.775}{95.85} = 5.31 \cong 6\ \text{sektor}$$

4.2.5. Çözüm yöntemi parametrelerinin belirlenmesi

Çalışmada hava sahası sektör tasarım matematiksel modeli ile üç amaçlı karma tamsayılı bir programlama modeli önerilmiştir. Önerilen üç amaçlı yapı, toplam ağırlıklandırma ve konik skalerleştirme ile tek amaçlı hale dönüştürülmüştür.

Modelin her iki skalerleştirme yöntemi ile çözümünde kullanılan ortak parametre, ağırlık katsayılarıdır. Bu çalışmada örnek uygulama olarak ağırlıklar toplamı, $\sum_{l=1}^{3} W_l = 6$ olarak seçilmiştir.

Modelin konik skalerleştirme yöntemi ile çözümünde önemli noktalardan biri her bir amaç fonksiyonu için referans noktaların belirlenmesidir. Bu doğrultuda model öncelikle klasik ağırlıklandırma yöntemi ile çözülmüştür. Farklı ağırlık katsayıları için 3 amaç fonksiyonunun en iyi değerleri hesaplanarak karşılaştırılmış ve bu değerler arasındaki farklılıklara bakılarak en iyi değerlerin orta noktaları konik skalerleştirmede referans nokta olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çözüm yöntemi parametreleri izleyen bölümde detaylı bir şekilde verilmiştir.

4.3. Deneysel Çalışmalar

Çok amaçlı hava sahası sektör tasarım problemi için en yoğun pik 2 saatlik zaman diliminde gerçekleşen trafik verileri kullanılarak yukarıda sözü geçen tüm parametreler hesaplandıktan sonra toplam ağırlıklandırma ve konik skalerleştirme yöntemleri ile çözüm araştırılmıştır.

Geliştirilen sektör tasarım modeli, GAMS 21.5 yazılımı kullanılarak programlanmıştır. Toplam ağırlıklandırma yöntemi çözümleri için GAMS/ CPLEX çözücü kullanılırken, konik skalerleştirme yöntemi GAMS/DICOPT çözücüsü ile çözülmüştür. Tüm programlar, Windows XP'de Pentium 4 Core 2 Duo 2 GHz işlemci ve 3 GB RAM ile çalıştırılmıştır. Hava sahası sektör tasarım problemi kodları Ek 10 ve Ek 11'de verilmiştir.

Algoritmanın GAMS ortamında uygulanması sırasında sayısal çalışmanın en az hata ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla ilgili her bir kare birim iş yükü parametreleri ile her bir kare birim ve aday sektör merkez noktaları için koordinat verileri oluşturulan Excel dosyası aracılığıyla programa girilmiştir. Problemin çözümü sonucu elde edilen her bir kare birim için atamalar kolaylıkla excel dosyasına dönüştürülerek, koordinat verileri bu dosyaya eklendikten sonra hava sahası analiz aracı vasıtasıyla görselleştirilebilmektedir.

Hava sahası sektör tasarım problemi öncelikle her bir amaç fonksiyonuna farklı ağırlıklar verilerek (W_1, W_2, W_3) klasik ağırlıklandırma yöntemi ile çözülmüştür. Farklı ağırlık katsayıları için toplam amaç fonksiyonu değeri, 3 amaç fonksiyonunun en iyi değerleri ve 16 aday merkezden açılan 6 sektör (y_j) Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge de görüldüğü üzere farklı ağırlık katsayıları her bir amaç fonksiyonunun aldığı değerler, (1, 4, 1) ağırlıklarına karşı gelen çözümler dışında benzerlik göstermektedir. Farklı ağırlık değerleri için birinci amaç fonksiyonun toplam ağırlıklandırma ile elde edilen bir çözümü dışında aynı değeri alması, sektör kapasitesi için belirlenen maksimum değer ile açıklanabilir. W_2 ve W_3 ağırlık katsayılarındaki artış ile de F_2 ve F_3 amaç fonksiyonlarının en iyi değerlerinde azalma olduğu görülmektedir.

Hava sahası sektör tasarım problemi; α, (W_1, W_2, W_3) ϵ W parametrelerinin farklı değerleri ve toplam ağırlıklandırma yöntemi ile elde edilen amaç fonksiyonlarının en iyi çözüm sonuçlarının karşılaştırılması doğrultusunda her bir amaç fonksiyonu için belirlenen B_1, B_2, B_3 referans nokta değerleri için konik skalerleştirme denklemi (3.32) kullanılarak yeniden çözülmüştür. Daha önce belirtildiği üzere referans noktaların belirlenmesinde farklı ağırlık katsayıları için elde edilen amaç fonksiyonlarının en iyi değerlerinin orta noktaları esas alınmıştır. Problemin çözümünden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de verilerek Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Toplam ağırlıklandırma yöntemi ile elde edilen sonuçlar.

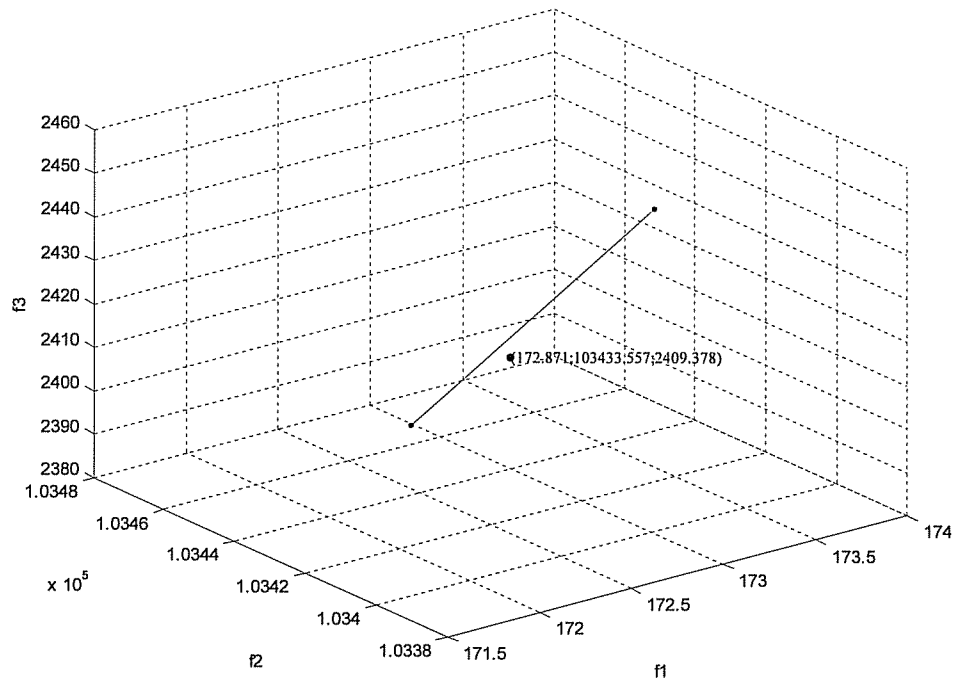
W_1	W_2	W_3	F_1	F_2	F_3	Z	Süre (sn)	Sektörler (y_j)
1	1	4	172.871	103461.814	2383.350	113168.087	1345.219	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
1	2	3	172.871	103461.814	2383.350	214246.551	81.797	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
1	3	2	172.871	103392.616	2458.718	315268.154	43.515	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
1	4	1	184.656	103384.452	2466.126	416188.589	43.907	KY2, KY3, KY6, KY7, KY9, KY14
2	1	3	172.871	103461.814	2383.350	110957.608	432.500	KY2, KY3, KY6, KY9,KY10, KY14
2	2	2	172.871	103433.557	2409.378	212031.612	62.203	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
2	3	1	172.871	103392.616	2458.718	312982.307	36.594	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
3	1	2	172.871	103461.814	2383.350	108747.129	211.563	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
3	2	1	172.871	103392.616	2458.718	209762.562	51.406	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
4	1	1	172.871	103433.557	2409.378	106534.419	73.562	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14

Çizelge 4.11. B_1=172.871, B_2=103427.215, B_3=2421.034 için konik skalerleştirme kullanılarak elde edilen sonuçlar.

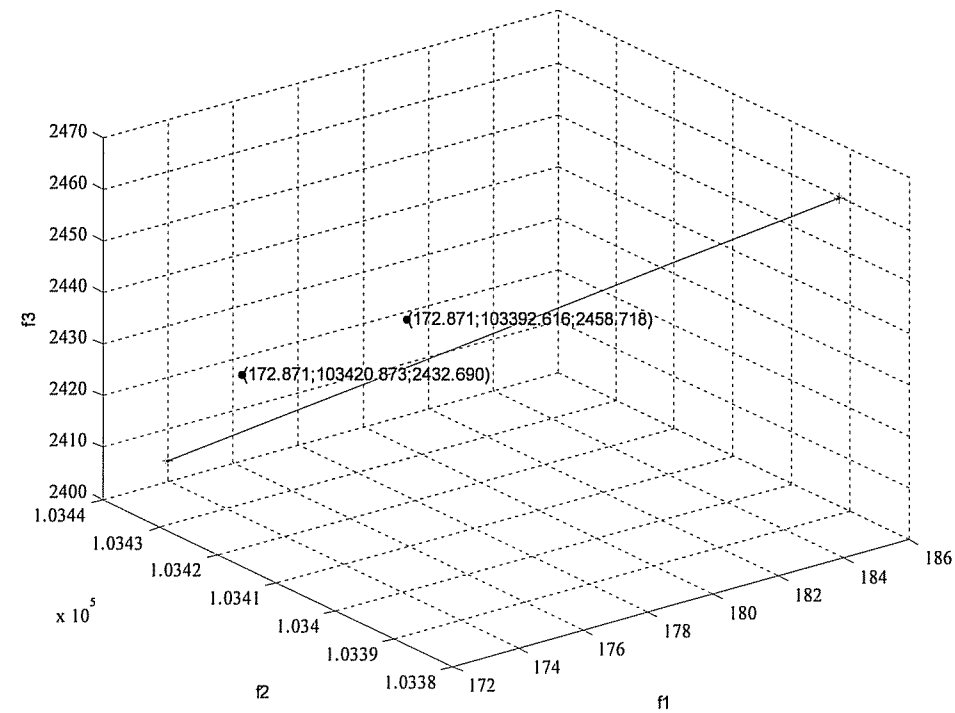
α	W_1	W_2	W_3	F_1	F_2	F_3	Süre (sn)	Sektörler (y_j)
0.1	1	2	3	172.871	103461.814	2383.350	363.531	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
0.5	1	2	3	172.871	103433.557	2409.378	507.187	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
1	1	2	3	172.871	103433.557	2409.378	432.437	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
0.1	1	3	2	172.871	103392.616	2458.718	312.234	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
0.5	1	3	2	172.871	103433.557	2409.378	355.640	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
1	1	3	2	172.871	103433.557	2409.378	509.938	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14

Çizelge 4.12. B_1=178.635, B_2=103409.005, B_3=2437.752 için konik skalerleştirme kullanılarak elde edilen sonuçlar.

α	W_1	W_2	W_3	F_1	F_2	F_3	Süre (sn)	Sektörler (y_j)
0.1	1	4	1	184.656	103384.452	2466.126	297.406	KY2, KY3, KY6, KY7, KY9, KY14
0.5	1	4	1	184.656	103384.452	2466.126	393.938	KY2, KY3, KY6, KY7, KY9, KY14
1	1	4	1	172.871	103392.616	2458.718	365.234	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
0.1	2	2	2	172.871	103433.557	2409.378	361.203	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
0.5	2	2	2	172.871	103433.557	2409.378	385.562	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
1	2	2	2	172.871	103420.873	2432.690	562.453	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14
1.75	2	2	2	172.871	103420.873	2432.690	587.641	KY2, KY3, KY6, KY9, KY10, KY14



Şekil 4.6. B_1=172.871, B_2=103427.215, B_3=2421.034 ile konik skalerleştirme kullanılarak hesaplanan yeni Pareto minimal noktalar.



Şekil 4.7. B_1=178.635, B_2=103409.005, B_3=2437.752 ile konik skalerleştirme kullanılarak hesaplanan yeni Pareto minimal noktalar.

4.4. Modelin Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler

Hava sahası sektör tasarım modeli; algoritmanın performansı, çözüm yöntemi ile ilâve parametreler ve sektör kapasitesi açısından ayrı ayrı incelenerek aşağıda değerlendirilmiştir.

4.4.1. Algoritmanın performansının değerlendirilmesi

Hava sahası sektör tasarım modeli farklı aday sektör merkez nokta sayısı-m ($m \in \{10,.....32\}$) için incelenmiştir. Her bir m değeri ile açılacak en iyi S tane sektör için farklı kombinasyon söz konusu olacaktır. Bunu da şu şekilde hesaplamak mümkündür:

$$C\binom{m}{S} = \frac{m!}{S!\cdot(m-S)!} \tag{4.4}$$

Bu kapsamda çok sayıda amacı aynı anda gerçekleyebilecek en uygun sayıda sektör açılması için seçilen aday sektör merkez nokta sayısına bağlı olarak araştırma uzayı da değişim göstermektedir. Sonuç olarak aday sektör merkezi sayısı arttıkça çözüm süresi de önemli ölçüde artış gösterecektir. Bunun dışında deneysel çalışmalarda verilen çizelgelerden de anlaşılacağı üzere amaç fonksiyonları için belirlenen ağırlık katsayılarının da problemin çözüm süresi üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada hava sahası sektör tasarım modeli, konik skalerleştirme yöntemi ile $\alpha = 1$, aday sektör merkez nokta sayısı $m=16$ olmak üzere anket sonuçları doğrultusunda belirlenen optimum 6 sektör için ortalama 468 saniyede çözülmüştür.

4.4.2. Çözüm yöntemi ve ilâve parametrelerin değerlendirilmesi

- Çalışmada konik skalerleştirme yöntemi ile α, (W_1, W_2, W_3) ϵ W olmak üzere farklı ağırlıklar ve referans noktalar kullanılarak elde edilen sonuçlar ortaya koyulmuştur. Çizelge 4.11'de de görüldüğü üzere $\alpha = 0.5$ ve $\alpha = 1$ olması

durumlarında (1,2,3) ve (1,3,2) ağırlıklarına karşı gelen yeni noktalar (172.871, 103433.557, 2409.378) olarak bulunmuştur. Benzer şekilde Çizelge 4.12'de $\alpha = 1$ olması durumunda (1,4,1) ve (2,2,2) için yeni noktaların sırasıyla (172.871, 103392.616, 2458.718) ve (172.871, 103420.873, 2432.690) olduğu görülmektedir. Bu noktaları geometrik olarak değerlendirdiğimizde elde edilen yeni çözümlerin (1,2,3) ile (1,3,2) ve (1,4,1) ile (2,2,2) en iyi çözümlerini birleştiren doğrunun yukarısında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.6, Şekil 4.7).

Elde edilen bu sonuçlar, sözü geçen noktaların klasik ağırlıklandırma yöntemi (α=0) kullanıldığında hiçbir hiperdüzlem tarafından desteklenmeyeceğini göstermektedir. Sonuç olarak konik skalerleştirme yöntemi ile uygun çözüm bölgesi değişmekle birlikte klasik ağırlıklandırma yöntemi ile bulunamayan yeni etkin çözümler elde edilmesi de mümkün olmaktadır. Diğer bir deyişle farklı ağırlık kombinasyonları ile toplam ağırlıklandırma yöntemi kullanılarak çok sayıda benzer etkin çözümler elde edilirken, konik skalerleştirme yöntemi ile farklı etkin çözümler kümesi elde edilebilmektedir.

- Konik skalerleştirme yöntemi ile $\alpha = 1$ için (1, 2, 3), (1, 3, 2), (1, 4, 1) ve (2, 2, 2) ağırlıkları kullanılarak elde edilen tüm çözümler hava sahası analiz aracı vasıtasıyla sektörlere atanan kare ızgara birimler (x_i^j) açısından karşılaştırılmış ve dağılımlarda sadece 3 kare birimde yer değişikliği olduğu saptanmıştır. Bu değişimler Çizelge 4.13'de verilmiştir. Dolayısıyla farklı ağırlık ve referans nokta çiftlerinin kullanılması ile sektör sınırlarında ufak çaplı değişiklikler elde edilmektedir.

Modelin $\alpha = 1$, (2, 2, 2) ağırlıkları ve Çizelge 4.12'de verilen her bir amaç fonksiyonu referans nokta değerleri için çözüm raporu Ek 12'de örnek olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.13. 4 Farklı ağırlık ve 2 farklı referans nokta çifti ile elde edilen çözümlerde açılan sektörlere atanan kare birimlerdeki farklılıklar.

x_J^I	**(1,2,3)**	**(1,3,2)**	**(1,4,1)**	**(2,2,2)**
A94	KY3	KY3	KY3	KY10
A151	KY6	KY6	KY14	KY14
A453	KY6	KY6	KY14	KY14

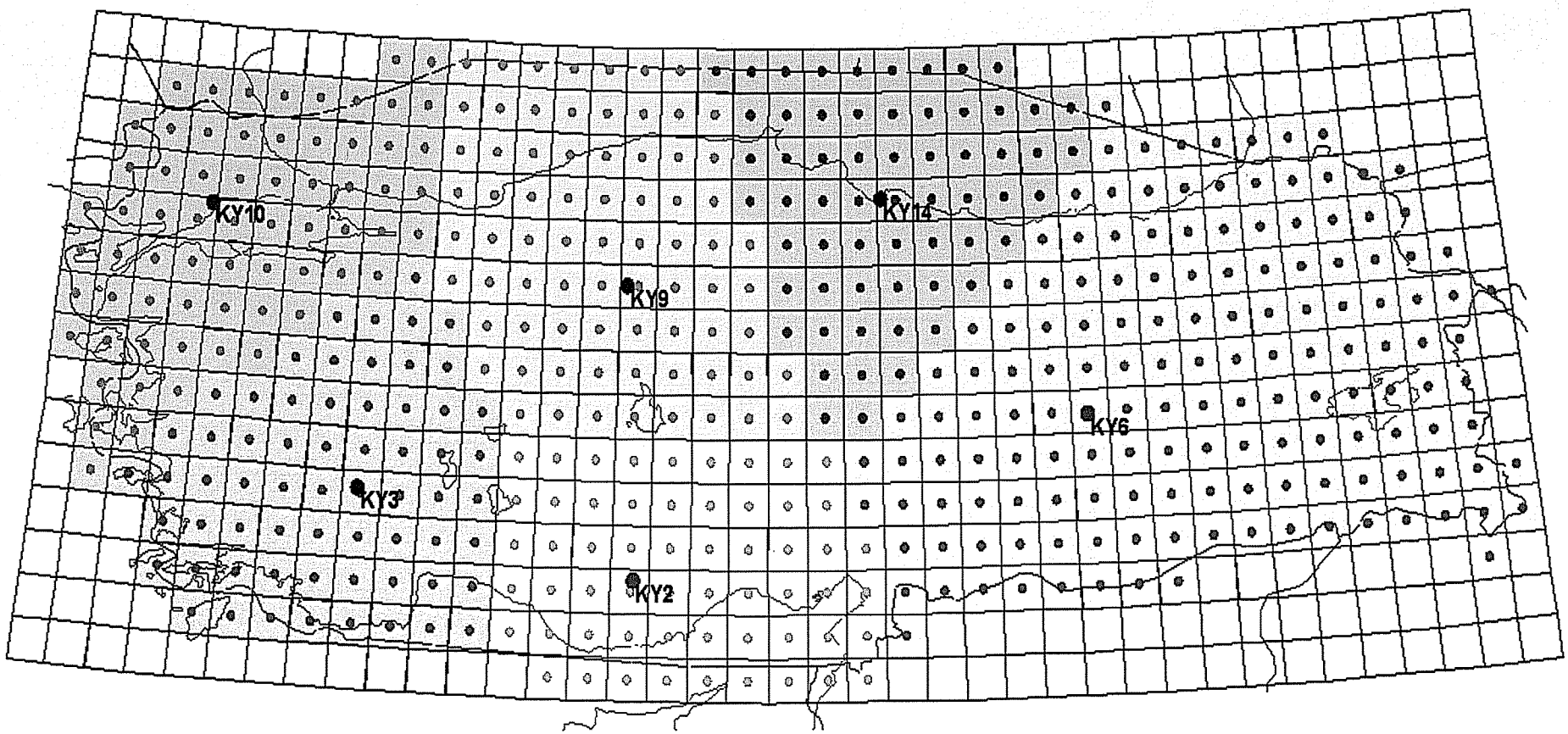
- Hava sahası sektör tasarım modeli, tüm ağırlıklar 10 ile çarpılarak ağırlıklar toplamı $\sum_{j=1}^{3} W_j = 60$ için incelenmiştir. Çizelge 4.10'da $\sum_{j=1}^{3} W_j = 6$ için elde edilen çözümlerde toplam amaç fonksiyonunun değeri (Z) ve çözüm sürelerinde meydana gelen değişiklikler dışında her bir amaç fonksiyonun aldığı değerlerde değişiklik saptanmamıştır. Dolayısıyla ağırlıklar toplamının 60 seçilmesi halinde modelin konik skalerleştirme yöntemi ile çözülmesinde her bir amaç fonksiyonu için belirlenecek referans değerlerinde bir değişim söz konusu olmamaktadır. Ancak daha büyük α değerleri seçilerek Pareto optimal çözümlerin araştırılmasına imkân sağlanmaktadır. Bu kapsamda model, $\alpha = 10$ olmak üzere Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de tanımlanan ağırlık katsayıları ve referans değerleri için çözülmüştür. Çözüm süreleri yaklaşık olarak aynı olmakla birlikte her bir amaç fonksiyonunun $\alpha = 1$ için elde edilen en iyi çözümleri ile aynı sonuçlara ulaşılmıştır.

4.4.3. Sektör kapasitesi etkisinin değerlendirilmesi

Bu çalışmada geliştirilen toplam hava sahası iş yükü modelinden hareketle hesaplanan kapasite miktarı, anket çalışmasından elde edilen verilere dayalı olarak en uygun sektör sayısının bulunmasında önemli bir etken olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte probleme ilâve edilen $\sum_{i=1}^{n} wl_i \cdot x_i^j \leq WLT \quad \forall j \in J$ kısıtı için WLT'nin alacağı değer maksimum iş yükü miktarı ile sınırlandırılarak sektör kapasitelerinin eş değer hale getirilmesinde kolaylık sağlanmıştır. Daha öncede bahsedildiği üzere bir sektörden geçen uçak sayısı sektörlerin yerleşimine, trafik karmaşıklığına ve zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Bir sektör için bir saatlik zaman diliminde kabul edilebilir uçak sayısı, Eurocontrol [88] tarafından 40-60 olarak öngörülmektedir. Bu kapsamda örnek uygulamada iki pik saatlik zaman dilimi için her bir sektörde maksimum iş yükü dolayısıyla sektör kapasite değeri, 60 uçak ile sınırlandırılmıştır. Çizelge 4.8'de verilen farklı sektör referans kapasite değerleri kullanılarak elde edilecek çözümlerle sektör sınırlarında meydana gelen değişiklikleri gözlemek mümkündür.

Hava sahası sektör sınır tasarım probleminin, seçilen 16 aday merkezden KY2 (MUT), KY3 (CRD), KY6 (EZS), KY9 (BUK), KY10 (EKI) ve KY14 (CRM) noktaları merkez olmak üzere optimum 6 sektörün harita üzerindeki yerleşimi Şekil 4.8'de görülmektedir. Açılan yeni sektörler tek veya birden fazla saha kontrol merkezinden yönetilebilir. Açılan yeni sektörler için Türkiye hava sahası yol haritası detaylı bir şekilde Ek 13'de verilmiştir.

Sonuç olarak modelin çözümünden elde edilen bilgiler ışığında seçilecek aday sektör merkez nokta sayısına, maksimum iş yükü (sektör referans kapasitesi) değerlerine veya farklı referans kapasite değerleri için hesaplanabilecek optimum sektör sayısına bağlı olarak çok farklı sektör konfigürasyonlarının elde edilebileceği görülmektedir.



Şekil 4.8. Hava sahası sektör tasarım modeli çözümü ile elde edilen Türkiye hava sahası sektörleri.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hava trafik yönetim biriminin alt birimi olan hava sahası yönetimi için uçakların emniyetli bir şekilde kontrolünün sağlanması ve sektörler arası kontrolör iş yüklerinin dengelenmesi amaçlarına yönelik olarak bir hava sahası sektör tasarım modeli ve bu model için çözüm algoritması sunulmuştur. Izgara temelli bölme esasına dayanan bu model, kümeleme yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu doğrultuda modelde, atama kısıtları, her bir hizmet biriminin birbiri ile bağlantısını sağlamak üzere komşuluk kısıtı, mesafe kısıtı ve sektörler arası iş yükü dengesini korumak üzere sektör kapasite kısıtı göz önünde bulundurulmuştur.

Izgara temelli sektör tasarım modelinin gelişim aşamasında öncelikle farklı alanlarda ve çalışmalarda uygulama alanı bulunan Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanılarak hava sahası analiz aracı geliştirilmiştir. Trafik analizlerini gerçekleştirmek üzere geliştirilen bu program pek çok kolaylığı beraberinde getirmektedir. Bu sayede;

- Trafik dağılımın uzaysal ve zamansal olarak izlenmesi,
- Farklı analiz ve sorgulamalar yapılabilmesi,
- Harita üzerinde tanımlı tüm noktaların coğrafi koordinat verilerine ve harita projeksiyon değerlerine ulaşılabilmesi,
- Hava sahası sektör modeli çözümünden elde edilecek noktasal değerlerin görselleştirilmesi,
- Gelecek çalışmalar için farklı ızgara seçimlerine uyumluluk sağlanabilmesi mümkündür.

Geliştirilen hava sahası analiz aracı vasıtasıyla sektör tasarım modelinin uygulama alanı olarak seçilen Türkiye hava sahası, 0.5 derece aralıklarla 471 kare ızgara birime ayrıştırılmıştır. Karelaj yöntemi ile uygulanan geometrik yaklaşım bu alanda yapılan çalışmalar için yeni bir bakış açısı sağlamaktadır.

Çalışmanın bir diğer aşaması kontrolör iş yükü modelinin geliştirilmesini içermektedir. Şu ana kadar kontrolör iş yükü esasına dayanarak gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki sektörizasyon çalışmasında kullanılan iş yükü modellerinde, bir takım eksiklikler dikkati çekmektedir. Bu eksiklikleri gidermek üzere toplam hava

sahası iş yükü modelinde çok sayıda parametre ve değişken modele dâhil edilmiş ve tüm faaliyetler meşguliyet süresi ile ilişkilendirilmiştir. Genel olarak tüm hava sahalarında verilen hizmetler ve kontrol faaliyetleri her ne kadar aynı olsa da hava sahası yapıları, trafik yoğunlukları ve uygulamalardaki bir takım prosedürel farklılıklar vb. etkenler göz önünde bulundurulduğunda kontrolörler açısından faaliyet ağırlık katsayılarında farklılıklar söz konusu olacaktır. Dolayısıyla bu tip çalışmalarda kontrolörlerin görüşlerinin alınması çalışmanın gerçeğe dayalı verilerle yapılması adına oldukça büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda çalışmada anket yöntemi tercih edilmiştir. İlgili ağırlık katsayıları ortalama değerler dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Hava sahası sektörizasyonu probleminin bugüne kadar yapılan çalışmalarda araştırmacılar tarafından polinomial bir sürede çözümü olmayan-NP-HARD (Non-Deterministic Polynomial Time Hard) problem sınıfında tanımlandığı görülmektedir. Dolayısıyla çözüm yöntemleri açısından metasezgisel yaklaşımlar ağırlık kazanmıştır. Bu çalışma ile kontrolör iş yükünün dengelenmesi esasına dayalı hava sahası sektörizasyonu için analitik bir yöntem geliştirilmiştir. Kümeleme esasına dayanarak geliştirilen hava sahası sektör tasarımı, konik skalerleştirme yöntemi ile çözülmüştür. Konik skalerleştirmenin en büyük avantajı, çok amaçlı problemlerin çözümünde problem dış bükey olsun ya da olmasın etkin ve özellikle has etkin çözümlerin bulunabileceğini garantilemesidir. Sektörizasyon problemi için uygulanan yaklaşımla sektörlerde kontrolör iş yüklerinin ve sektör kapasitelerinin dengelenmesi kolaylığı sağlanmıştır.

Bu çalışmanın hava sahası sektörizasyon problemlerine yönelik olarak bugüne kadar yapılan diğer çalışmalardan farklılıklarını şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Günümüzde hava sahası sektör tasarımlarında benzetim esaslı yöntemler üzerinde durulmakta ve daha çok dinamik yapılanma üzerine odaklanılmaktadır. Bu alanda sınırlı sayıda olan statik yapıdaki sektör tasarımları için alternatif bir yaklaşım oluşturulmuştur.
- CBS teknikleri kullanılarak 4 boyutlu hava sahası analizleri gerçekleştirilmiştir.

- Çok sayıda parametre ve değişkeni içeren yeni bir iş yükü ölçüm modeli kullanılmış, ilgili ağırlık katsayıları anket çalışması ile belirlenerek toplam hava sahası iş yükü gerçek trafik verileri ile analitik olarak hesaplanmıştır.
- Izgara temelli bölme yaklaşımlarında karelaj yöntemi ile alternatif bir yaklaşım geliştirilmiştir.
- Yousefi'nin önerdiği model yeni bir iş yükü amaç fonksiyonu ve kısıt ilâvesi ile yeniden düzenlenmiş ve bu sayede iş yükü maksimum olan sektörler en küçüklenirken açılan tüm sektörlerde öngörülen maksimum kapasite değerinin aşılmaması sağlanmıştır.
- Geliştirilen model farklı bir çözüm yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

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

➢ Toplam hava sahası iş yükü ölçüm modelinde ilgili ağırlık katsayıları, ortalama değerler esas alınarak belirlenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda bu katsayılar regresyon vb. gibi farklı istatistiksel yöntemlere dayandırılarak yeniden hesaplanabileceği gibi toplam hava sahası modeli ilgili ağırlık katsayılarının ve kontrol faaliyet sürelerinin belirlenmesi amacıyla yapılan anket çalışmasına ek olarak operasyonel ortamda gözlem tekniği kullanılarak da genişletilebilir. Bu sayede elde edilecek iş yükü ağırlık katsayıları ve faaliyet süreleri ile hava sahası sektör tasarım modeli yeniden çözülerek meydana gelebilecek değişiklikler incelenebilir.

➢ Hava sahası analiz aracı, farklı ızgara boyutları için tasarımda kolaylık sağlayabilecek özelliktedir. Bu sayede izleyen çalışmalarda daha küçük kare ızgara birimler kullanımı ile sınır tasarımlarındaki hassasiyet artırılarak hava sahası sektör tasarımları incelenebilir.

➢ Hava sahası sektör tasarım modeli, farklı çözüm yöntemleri kullanılarak geliştirilebilir. Bu sayede yöntemlerin kullanılabilirliği, sağlayacağı kolaylıklar ve elde edilecek optimum çözümler açısından karşılaştırmalar yapılabilir.

➢ Hava taşımacılığının gelecekteki artış tahminleri ve Eurocontrol'ün öngördüğü saatlik kapasite verileri doğrultusunda oluşturulacak farklı trafik senaryoları çerçevesinde orta ve uzun vadede hava sahası sektör tasarımları gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Oktal, H., Küçükönal, H., Durmaz, V., Sarılgan, E. ve Ateş, S.S, *Eskişehir ve Çevre İllerinde Havayolu Yolcu Talebini Yaratacak Faktörlerin Analizi,* Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Yayınları, No:15, Eskişehir, 2007.

[2] *Ulaştırma Özel İhtisas Komisyonu Raporu,* VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı, DPT, Ankara, 2001.

[3] Majumdar, A. ve Ochieng, W.Y., "The Factors Affecting Air Traffic Controller Workload: A Multivariate Analysis Based Upon Simulation Modelling of Controller Workload", *81st Annual Meeting of The Transportation Research Board,* Washington DC, 2001.

[4] Eurocontrol, *ECAC Airspace Planning Manual,* Vol. 2, Edition 1.0, 2002.

[5] Frost ve Sullivan, "ATC: Problems to be solved", *The Journal Of Global Airspace Avionics Magazine,* 34-36, 2001.

[6] Rivière, T., "Redesign Of The European Route Network For Sector-Less", *The 23rd Digital Avionics Systems Conference-DASC 04,* **1**, 2.A.2-2.1-8, 2004.

[7] Lung Wu, C. ve Caves R.E., "Research Review of Air Traffic Management", *Transport Reviews,* **22** (1), 115-132, 2002.

[8] Cavcar, A., *Temel Hava Trafik Yönetimi,* Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Yayınları, No:7, Eskişehir, 1998.

[9] Eurocontrol, *Airspace Strategy For The ECAC States,* Edition 1.0, 2001.

[10] Uslu, S., *Hava Trafik Sistemi Değerlendirme Ölçütleri,* Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Yayınları, No:14, Eskişehir, 2007.

[11] *Havacılık ve Teknoloji,* 2008. http://www.gedop.org/blog/2008/07/havacilik/egitim-havacilik/au-shyo-hava-trafik-kontrol-bolumu

[12] Çınar, E., *Hava Trafik Akış Yönetimi ve İstanbul Atatürk Havalimanındaki Taksi Sürelerinin Kalkış Slotu Tahsisine Etkisi,* Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, 2003.

[13] Vincent, P. ve Galotti, Jr., *Future Air Navigation System (FANS)*, Ashgate, England, 1997.

[14] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Annex 11 to the Convetion of International Civil Aviation: Air Traffic Services*, Montreal, Canada, 2001.

[15] Dravecka, L., "Towards The Traffic Syncronisation In A Functional Block of Airspace", *1st International Conference on Research in Air Transportation - ICRAT 2004*, Zilina, Slovakia, 2004.

[16] Turhan, U., *Hava Trafik Kontrolörü Adaylarının Seçimi ve Türkiye'deki Uygulama*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, 2007.

[17] Yousefi, A., Donohue, G. L. ve Qureshi, K.M, "Investigation of En route Metrics for Model Validation and Airspace Design Using the Total Airport and Airspace Modeler (TAAM)", *5th Eurocontrol/FAA ATM R&D Conference, Budapest*, Hungary, 2003.

[18] Delahaye, D. ve Puechmorel, S., "Air Traffic Complexity: Towards Intrinsic Metrics", *3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Napoli, 2000.

[19] Sridhar, B., Sheth, K.S. ve Grabbe, S., "Airspace Complexity and its Application in Air Traffic Management", *2nd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Orlando, FL, USA, 1998.

[20] Mogford, R.H., Murphy, E.D., Roske-Hofstrand, R.J., Yastrop, G. ve Guttman, J.A., *Application of Research Techniques for Documenting Cognitive Processes in Air Traffic Control: Sector Complexity and Decision Making* (DOT/FAA/CT-TN94/3), FAA Technical Center, Atlantic City, NJ, 1994.

[21] Majumdar, A., Ochieng, W. ve Polak, J., "Estimation of European Airspace Capacity From A Model of Controller Workload", *The Journal of Navigation,*, **55**, 381-403, 2002.

[22] Hilburn, B., *Cognitive Complexity In Air Traffic Control: A Literature Review*, EEC Note No. 04/04, Project COCA, Eurocontrol Experimental Centre, 2004.

[23] Averty, P., Athenes, S., Collet, C. ve Dittmar, A., "Evaluating A New Index Of Mental Workload In Real ATC Situation Using Psychophysiological Measures", *21st Digital Avionics Conference*, Irvine, CA, **2**, 7A4-1-7A4-13, 2002.

[24] Arad, B.A., "The Control Load And Load Sector Design", *Journal of ATC*, May, 12-31, 1964.

[25] Schmidt, D.K., "On Modelling ATC Work Load and Sector Capacity", *Journal of Aircraft*, **13,** 531-537, 1976.

[26] Hurst, M.W. ve Rose, R.M., "Objective Job Difficulty, Behavioural Response, and Sector Characteristics in Air Route Traffic Control Centers", *Ergonomics*, **21**, No.9, 697-708, 1978.

[27] Buckley, E.P., DeBaryshe, B.D., Hitchner, N. ve Kohn, P., *Methods And Measurement in Real-Time Air Traffic Control System Simulation* (DOT/FAA/CT-83/26), FAA Technical Center, Atlantic City N.J., 1983.

[28] Stein, E.S., *Air Traffic Controller Workload: An Examination of Workload Probe* (DOT/FAA/CT-TN84/24), FAA Technical Center, Atlantic City, NJ., 1985.

[29] Laudeman, I.V, Shelden, S.G., Branstrom, R. ve Brasil, C.L., *Dynamic Density: An Air traffic Management*, NASA/TM: 1998-112226, 1998.

[30] Smith, K., Scallen, S.F., Knecht, W. ve Hancock, P.A., "An Index of Dynamic Density", *Human Factors*, **40** (1), 69-78, 1998.

[31] Manning, C.A., Mills, S.H., Fox, C., Pfleiderer, E. ve Mogilka, H.J., *Investigating the Validity of Performance and Objective Workload Evaluation Research–POWER* (DOT/FAA/AM-01/10), Washington, DC, 2001.

[32] Pawlak, W.S, Brinton, C.R., Crouch, K. ve Lancaster, K.M., "A Framework For The Evaluation Of Air Traffic Control Complexity", *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.*, 1996.

[33] Chatterji, G.B. ve Sridhar, B., "Neural Network Based Air Traffic Controller Workload Prediction", *Proceedings of American Control Conference*, San Diego, California, 2620-2624, 1999.

[34] Schaefer, D., Meckiff, C., Magill, A., Pirard, B. ve Aligne, F., "Air Traffic Complexity As A Key Concept For Multi-Sector Planning", *20th Digital Avionics Systems Conference - DASC*, **2**, 7E5/1-7E5/12, 2001.

[35] Kirwan, B., Scaife, R. ve Kennedy, R., "Investigating Complexity Factors in UK Air Traffic Management", *Ergonomics*, 189-195, 2001.

[36] Histon, J.M., Aigoin, G., Delahaye, D., Hansman, R.J. ve Puechmorel, S., "Introducing Structurel Considerations into Complexity Metrics", *4th USA/Europe ATM R&D Seminar*, Sante Fe, USA, 2001.

[37] Histon, J.M. ve Hansman, R.J., *The Impact of Structure On Cognitive Complexity In Air Traffic Control*, Report No. ICAT-2002-4, MIT International Center for Air Transportation, Cambridge, USA, 2002.

[38] Athènes, S., Averty, P., Puechmorel, S., Delahaye, D. ve Collet, C. "ATC Complexity and Controller Workload: Trying to Bridge the Gap", *International Conference on Human Computer Interaction in Aeronautics (HCI-Aero)*, Cambridge, USA, 2002.

[39] Kopardekar, P. ve Magyarits, S., "Dynamic Density: Measuring And Predicting Sector Complexity", *21st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, California, 2002.

[40] Masalonis, A.J., Callaham, M.B. ve Wanke C.R., "Dynamic Density And Complexity Metrics For Real-Time Flow Management", *5th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Budapeste, Hungary, 2003.

[41] Benkouar, A., Flynn, G.M. ve Christien, R., *Adaptation Of Workload Model By Optimization Algorithms And Sector Capacity Assesment*, ECC Note No. 07/05 COCA Project, Eurocontrol Experimental Center, Bretigny-sur-Orge Cedex, 2005.

[42] Christien, R. ve Benkouar, A., "Air Traffic Complexity Indicators & ATC Sectors Classification", *5th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Budapeste, Hungary, 2003.

[43] *Binary Space Partitioning*
http://en.wikipedia.org/wiki/Binary_space_partition

[44] Basu, A., Mitchell, J.S.B. ve Sabhnani, G., "Geometric Algorithms for Optimal Airspace Design and Air Traffic Controller Workload Balancing" *Proceedings of the Tenth Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX)*, San Francisco, California, 2008.

[45] Yanalak, M., *Yüzey Modellemede Üçgenleme Yöntemleri.* http://www.hgk.mil.tr/dergi/makaleler/126_6.pdf

[46] Güdükbay, U. ve Sinop, A.K., *Hesaplamaya Dayalı Geometri*, Türkiye Bilişim Ansiklopedisi. http://www.cs.bilkent.edu.tr/~gudukbay/publications/papers/tba/Hesaplamaya_Dayali_Geometri.pdf

[47] Pesic, B. ve Delahaye, D., *Daily operational airspace sector grouping*, 1999. http://pom.tls.cena.fr/papers/reports/brankica.pdf

[48] Trandac, H., Baptiste, P. ve Duong, V., "A Constraint-Programming Formulation For Dynamic Airspace Sectorization ", *21st Digital Avionics Systems Conference*, Irvine, CA, **1**, 1C5-1-1C5-11, 2002.

[49] Yousefi, A., *Optimum Airspace Design With Air Traffic Controller Workload-Based Partitioning*, Doktora Tezi, George Mason University, Virginia, 2005.

[50] Klein, A., "An Efficient Method For Airspace Analysis And Partitioning Based On Equalized Traffic Mass", *6th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Maryland, USA, 2005.

[51] Kulluk, S. ve Türkbey, O., "Tesis Yerleşimi Problemi için Genetik Algoritma", *YA/EM-Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği 14.Ulusal Kongresi*, 2004.

[52] İşlier, A., *Tesis Planlaması*, Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 1997.

[53] Oktal, H. ve Küçükönal, H., "Dünyada Bölgesel Hava Taşımacılığı ve Türkiye'de Uygulanabilirliği", *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, **2**, Cilt 7, 383-394, 2007.

[54] Eurocontrol, *Turkey's ATC System* (22.01.2002) http://www.eurocontrol.be/dgs/publications/skyway/1999/v4n15/p12.htm

[55] Havayolu Ulaştırma Komisyonu, "9.Ulaştırma Şurası", Mayıs, 1998.

[56] Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM), *2008-2012 Stratejik Plan.* http://www.sp.gov.tr/documents/planlar/SivilHavacilikGenelMüdürlügüSP0812.pdf

[57] http://www.dhmi.gov.tr/dhmistatistik/istatistik.aspx

[58] ATAG, *The Economic Benefits of Air Transport*, 2000. http://www.icao.int/atworkshop/economicbenefitsairtransport.pdf

[59] Janić, M. ve Tosić, V., "En Route Sector Capacity Model", *Transportation Science*, **25**, No.4, 299-307, 1991.

[60] Eurocontrol, *Optimising Air Traffic Management Efficiency*, 2007. http://eurocontrol.int/corporate/public/standard_page/biz_efficiency.html

[61] Wyndemere Incorparated, *Dynamic Resectorization: Accommodating Increased Flight Flexibility*, 1997.

[62] Öztürk, G., *Sınıflandırma Problemleri İçin Yeni Bir Matematiksel Programlama Yaklaşımı*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2007.

[63] Gasimov, R., Sipahioğlu, A. ve Saraç, T., "A Multi-Objective Programming Approach To 1.5-Dimensional Assortment Problem", *European Journal Of Operational Research*, **179**, 64-79, 2007.

[64] Baykasoğlu, A., Dereli, T., Çağşır, H. ve Güllü, H., "Coğrafik Bilgi Sistemlerinin Mühendislik Karar Destek Sistemlerine Uygulanabilirliği Üzerine Bir Araştırma", *YA/EM-Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi*, Gaziantep, 2004.

[65] Uyguçgil, H., *Maden Mühendisliğinde Coğrafi Bilgi Sistemleri Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1994.

[66] Özyavuz, M., "Coğrafi Bilgi Sistemi ve Peyzaj Mimarlığında Kullanımı", *Trakya Üniversitesi Bilimsel araştırmalar Dergisi B Serisi*, **3**, 61-68, 2002.

[67] *Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS/GIS) Nedir?*, 2007. http:// www.gislab.ktu.edu.tr/gisnedir/cbs.htm

[68] Genç, S., "*Coğrafi Bilgi Sistemleri*", Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Seminer, 2007.

[69] Geyik, F. ve Velioğlu, A., "GIS Tabanlı Elektrik Dağıtım Planlaması: Gaziantep Tedaş Uygulaması", *YA/EM-Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği 14. Ulusal Kongresi*, Gaziantep, 2004.

[70] DHMİ Seyrüsefer Daire Başkanlığı, *Hava Seyrüseferi Eğitim Notları,* Ankara, 2008.
http://www.ans.dhmi.gov.tr/TR/ATCTR/dok/Hava.pdf

[71] Majumdar, A., Ochieng, W.Y., Bentham, J. ve Richards, M., "En-Route Sector Capacity Estimation Methodologies: An International Survey", *Journal of Air Transport Management,* **11**, 375-387, 2005.

[72] International Civil Aviation Organization (ICAO) , *Procedures for Air Navigation Services: Air Traffic Management*, Doc. 4444 ATM/501, Montreal, Canada, 2007.

[73] Altunışık, R., Coşkun, R., Bayraktaroğlu, S. ve Yıldırım, E., *Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri SPSS Uygulamalı*, Sakarya Üniversitesi İİBF, Sakarya Yayıncılık, 5.Baskı, ISBN: 978-975-8644-80-3, 2007.

[74] Yıldız, Z. *Bankalarda Müşterilerin Demografik ve Sosyo-Ekonomik Özellikler Bakımından Gruplandırılmasında Kümeleme Çözümlemesi ve Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, 1989.

[75] Alcal, H., *Veri Yapısının Araştırılması ve Doğal Kümelerin Belirlenmesi Amacıyla Kümeleme Çözümlemesi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, 1991.

[76] Özekeş, S., "Veri Madenciliği Modelleri ve Uygulama Alanları", İstanbul *Ticaret Üniversitesi Dergisi*, No. 3, 65-82, 2003.

[77] Doğan, İ., "Kümeleme Analizi ile Seleksiyon", *Turk. J. Vet. Anim. Sci.*, **26**, 47-53, 2002.

[78] *Jeodezi, Datum, Koordinat Sistemleri, Harita Projeksiyonları,*
http://www.koeri.boun.edu.tr/jeodezi/dosyalar/files/JEODEZI_BUKRDAE_GED.pdf

[79] Bölat, B. ve Kuzucu, A., "Çok Amaçlı Karar Verme Problemlerine Etkileşimli Bir Yaklaşım", *itüdergisi/d*, **1**, Cilt 5, 114-126, 2006.

[80] Köksoy, O. ve Hocaoğlu, G., "Multi-Objective Optimization Solutions To The Taguchi's Problem", *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, **18**(4), 613-626, 2005.

[81] Korul, V. ve Küçükönal, H. *Türk Sivil Havacılık Sisteminin Yapısal Analizi*. http://eab.ege.edu.tr/pdf/3/C1-S1-2-M4.pdf

[82] DHMİ, AIP-Aeronautical Information Publication, 2008.

[83] http://www.ans.dhmi.gov.tr/TR/ATCTR/atcana.html

[84] Laplace, I. ve Ky, P., *Economic Differentiation Between Lower And Upper Airspace*, ECC Note No. O5/04, Project NCD-ECO1, Eurocontrol Experimental Center, Bretigny-sur-Orge Cedex, 2004.

[85] Nuic, A., *Aircraft Performance Summary Tables For The Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.6* , Eurocontrol Experimental Center, ECC Note No.12/04, Brétigny-sur-Orge CEDEX, 2004.

[86] Bayram, M., *Nümerik Analiz* , Aktif Yayınevi, İstanbul, 2002.

[87] Çetek, C., *Hava Trafiğindeki Çatışmalardan Kaçınma İçin Ekonomik Manevraların Modellenmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.

[88] Eurocontrol, *Our international area of responsibility*. http://www.eurocontrol.int/muac/public/standard_page/AUintAreaOfRespon.html

Ek-1. Kontrolör iş yükünü etkileyen karmaşıklık faktörleri literatür özeti

Değişkenler	Araştırmacılar (Kaynak)
TRAFİK ÖZELLİKLERİ	
Trafik yoğunluğu / Uçuşların sayısı	Arad (1964); Hurst ve Rose (1978); Buckley ve Ark. (1983); Stein (1985); Smith ve Ark. (1996); Wyndemere (1996); Pawlak ve Ark. (1996); Kopardekar ve Ark. (1997); Laudeman ve Ark. (1998); Sridhar ve Ark. (1998); Majumdar ve Ochieng (2000); Manning ve Ark. (2001); Athenes ve Ark. (2002); Masalonis ve Ark. (2003); Christien ve Benkouar (2003).
Saatteki trafik miktarı	Arad (1964); Hurst ve Rose (1978); Buckley ve Ark. (1983); Stein (1985)
Pik trafik miktarı	Hurst ve Rose (1978); Kirwan ve Ark. (2001); Christien ve Benkouar (2003).
Trafik karması	Mogford ve Ark. (1994); Schaefer ve Ark. (2001); Christien ve Benkouar (2003).
Tırmanma ve alçalma trafiği	Mogford ve Ark. (1994); Wyndemere (1996); Majumdar ve Ochieng (2000); Christien ve Benkouar (2003).
Uçak hızları	Arad (1964); Hurst ve Rose (1978); Schmidt (1976); Sridhar ve Ark. (1999); Delahaye ve Ark. (2000); Majumdar ve Ochieng (2000).
Uçak pozisyonları	Pawlak ve Ark. (1996); Shridar ve Ark. (1999); Delahaye ve Ark. (2000); Histon ve Ark. (2002)
Hız değişikliği	Wyndemere (1996); Laudeman ve Ark. (1998); Sridhar ve Ark. (1998); Manning ve Ark. (2001); Schaefer ve Ark. (2001); Histon ve Ark. (2002); Masalonis ve Ark. (2003).
Baş değişikliği	Wyndemere (1996); Laudeman ve Ark. (1998); Sridhar ve Ark. (1998); Manning ve Ark.(2001)
İrtifa değişikliği	Wyndemere (1996); Laudeman ve Ark. (1998); Sridhar ve Ark. (1998); Manning ve Ark. (2001); Masalonis ve Ark. (2003).
Trafik akış oranı	Schmidt (1976); Kirwan ve Ark. (2001)
Sektördeki uçuş süresi	Arad (1964); Majumdar ve Ochieng (2000); Manning ve Ark. (2001).

Ayırma standartları	Arad (1964); Schmidt (1976); Hurst ve Rose (1978); Mogford ve ark. (1994); Smith ve Ark. (1996); Kopardekar ve Ark. (1997); Laudeman ve Ark. (1998); Sridhar ve Ark. (1998); Masalonis ve Ark. (2003); Christien ve Benkouar (2003).
Kümelenme/Bir araya toplanma	Stein (1985); Histon ve Ark. (2002)
Uçakların sektördeki dağılımı	Majumdar ve Ochieng (2000); Histon ve Ark. (2002); Masalonis ve Ark. (2003).
Çarpışma tehlikesi	Buckley ve ark. (1983); Stein (1985); Masalonis ve Ark. (2003); Christien ve Benkouar (2003).
Çarpışma tehlikesi tipi	Wyndemere (1996); Schaefer ve Ark. (2001); Christien ve Benkouar (2003).
Meşguliyet	Buckley ve Ark. (1983)
Yakıt tüketimi	Buckley ve Ark. (1983)
Gecikme	Buckley ve Ark. (1983)
Askeri uçuşlar	Mogford ve Ark. (1993); Kirwan ve Ark. (2001)
SEKTÖR ÖZELLİKLERİ	
Sektör boyutları	Arad (1964); Hurst ve Rose (1978); Buckley ve Ark. (1983); Stein (1985); Mogford ve Ark. (1993); Wyndemere (1996); Histon ve Ark. (2002); Masalonis ve Ark. (2003).
Sektör / Akış dizaynı	Arad (1964); Hurst ve Rose (1978); Stein (1985); Wyndemere (1996); Schaefer ve Ark. (2001); Kirwan ve Ark. (2001); Christien ve Benkouar (2003).
Uçuş seviyelerinin sayısı	Schmidt (1976); Majumdar ve Ochieng (2000); Kirwan ve Ark. (2001).
Koordinasyonlar	Schmidt (1976);Hurst ve Rose (1978); Buckley ve Ark. (1983); Stein (1985); Kopardekar ve Ark. (1997); Mogford ve Ark. (1994).
Yetki devri	Schmidt (1976); Hurst ve Rose (1978); Stein (1985); Manning ve Ark. (2001); Kirwan ve Ark. (2001).
Yol konfigürasyonu	Kirwan ve Ark. (2001)

Yol kesişim noktalarının sayısı	Mogford ve Ark. (1993); Histon ve Ark. (2002); Christien ve Benkouar (2003).
Küçük yakınsama açılı yollar	Schmidt (1973); Christien ve Benkouar (2003)
Karmaşık uçuş yolları	Mogford ve Ark. (1993)
Sınır yeri	Wyndemere (1996)
Tesis sayısı	Mogford ve Ark. (1993)
Tahditli sahalar	Mogford ve Ark. (1993)
KOMBİNASYON	
Radyo ve radar kapsama alanı	Mogford ve Ark. (1993)
Frekans tıkanıklığı	Mogford ve Ark. (1993)
Gerekli prosedürler	Mogford ve Ark. (1993);Kirwan ve Ark. (2001)
Meteoroloji	Mogford ve Ark. (1993); Schaefer ve Ark. (2001); Kirwan ve Ark. (2001); Masalonis ve Ark. (2003).

Ek-2. Veri toplama yöntemlerine göre literatür özeti.

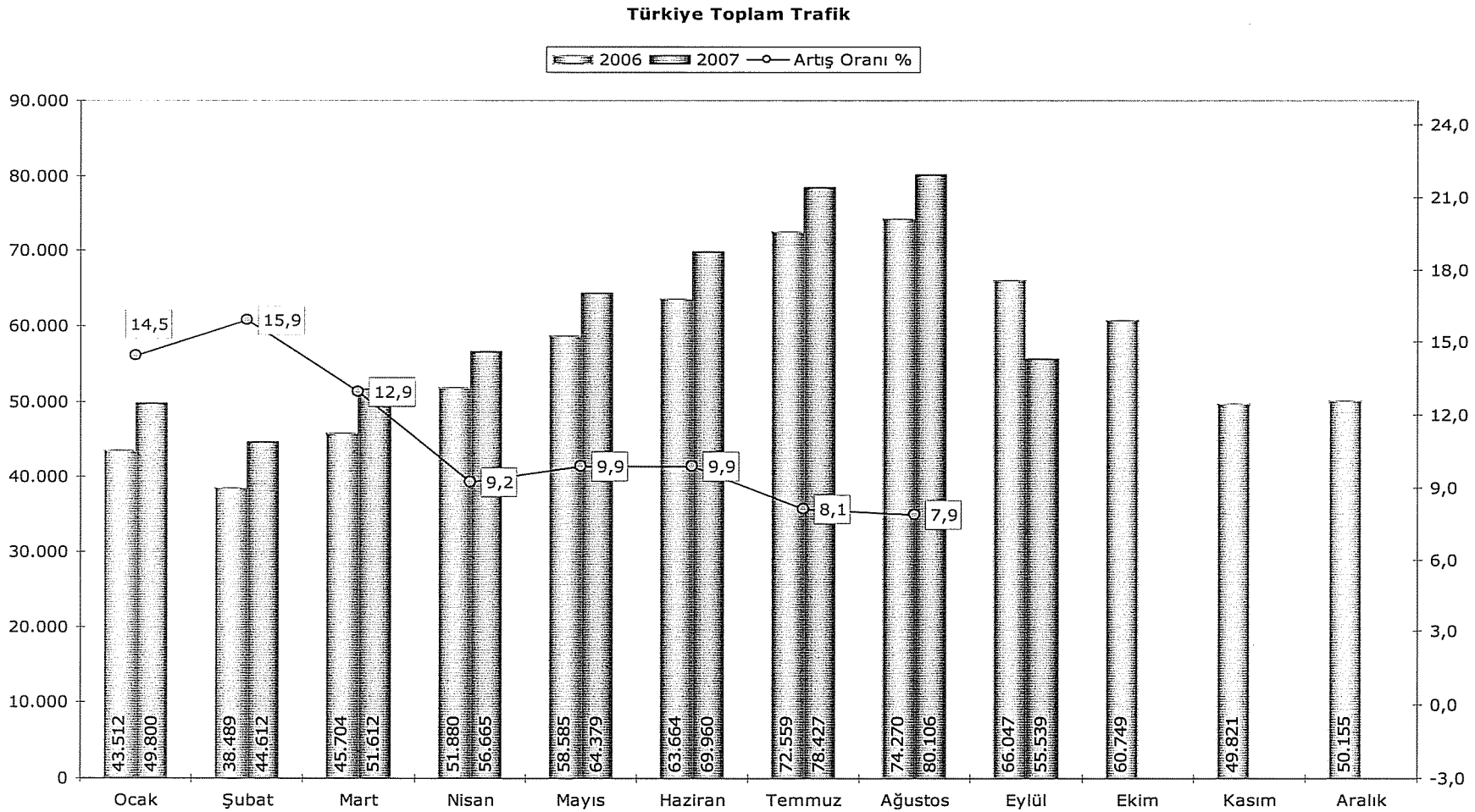
SINIF	TEKNİK	ALT TEKNİK	KAYNAK
GÖZLEM	Yerinde Gözlem		Histon ve Ark. (2002)
	Tanıtım		Stein (1985)
	Videoteyp kaydı		Schmidt (1976);
	Uzman değerlendirmesi		Pawlak, (1996); Athenes ve Ark. (2002)
	Davranışsal analizler		Manning ve Ark. (2001)
		Aktivite analizleri	Hurst ve Rose (1978)
		Haberleşme analizleri	Hurst ve Rose (1978)
		Ses komutları analizleri	
GÖRÜŞME	Uzman karar oturumu		Schaefer ve Ark. (2001); Kirwan ve Ark. (2001)
	Sınıflandırma ve derecelendirme uygulamaları		Stein (1985); Mogford ve Ark. (1994); Pawlak (1996); Kirwan ve Ark. (2001).
	Odak gruplar		Pawlak (1996); Delahaye ve Ark. (2000); Histon ve Ark. (2002).
	Kritik karar verme		Pawlak (1996); Laudeman ve Ark. (1998).
	Sözlü protokol analizleri		Pawlak (1996);
	Yapılandırılmış görüşme		Schmidt (1976); Stein (1985); Mogford ve Ark. (1994); Masalonis ve Ark. (2003).
	Yarı yapılandırılmış yerinde karşılıklı görüşme		
	İş yükü oranları		Masalonis ve Ark. (2003)
		Eş zamanlı	
	Sorular/Anketler		Arad (1964); Stein (1985); Laudeman ve Ark. (1998); Sridhar ve Ark. (1998); Athenes ve Ark. (2002).
DENEYSEL	Statik simülasyonlar		Buckley ve ark. (1983); Stein (1985)
	Küçük ölçekli simülasyon		Pawlak (1996); Kopardekar (1996); Masalonis ve Ark. (2003);
	Shadow mode trials		Schaefer ve Ark. (2001);
	Fizyolojik ölçümler		Athenes ve Ark. (2002);
		Göz kırpma	
		Kalp atışı	
		Beyin aktivitesi	

	Görev performansı		
		Birincil görev performansı	Arad (1964)
		İkincil görev performansı	
			Majumdar ve Ochieng (2000); Christien ve Benkouar (2003).
ANALİTİK	Görev analizleri		
	Biliş Modelleme		
	Monte Carlo simülasyonu		
	Operasyonel veri analizleri		Kopardekar (1996)
	Modellenen iş yükünün analizleri		Arad (1964); Christien ve Benkouar (2003).

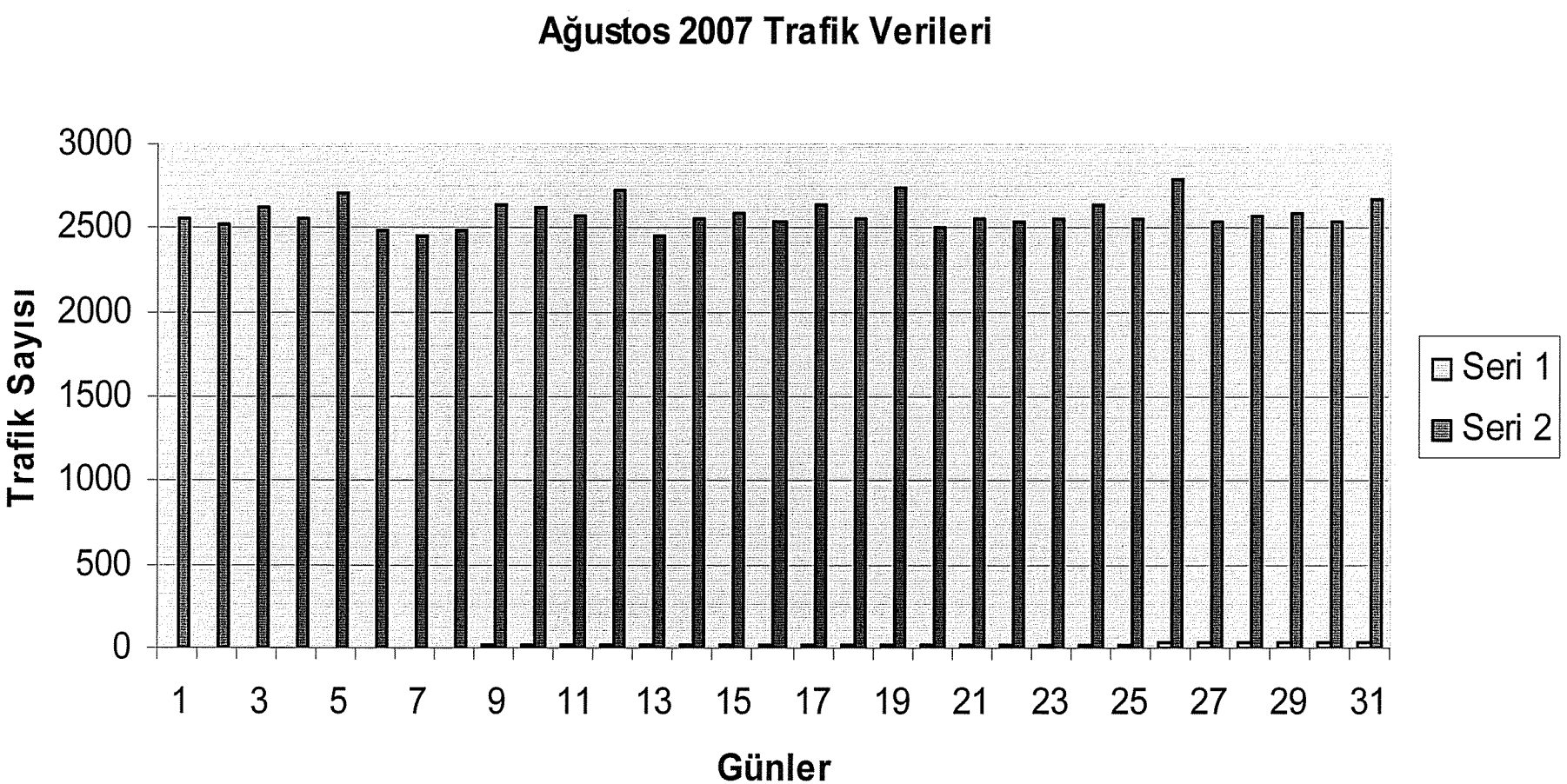
Ek-3. Karmaşıklık ve iş yükü ölçümünde kullanılan yöntemler.

Araştırmacılar (Kaynak)	Çözüm ve Değerlendirme Yöntemi
Arad, B.A. (1964)	Deneysel ve Analitik çözüm
Schmidth, D.K (1976)	Yarı deneysel-Deterministik
Hurst ve Rose (1978)	Çoklu regresyon Analizi (İstatistiksel Yöntemler)
Buckley ve Ark. (1983)	Çoklu regresyon Analizi (İstatistiksel Yöntemler)
Stein, E.S. (1985)	ATWIT, Uzman Oranları, Çoklu Regresyon Analizi
Mogford ve Ark. (1994)	Çoklu regresyon analizleri (İstatistiksel Yöntemler)
Pawlak ve ark. (1996)	Kişisel Oranlar ve Uzman değerlendirmesi
Smith ve Ark. (1998)	Deneysel ve analitik
Laudeman ve Ark. (1998)	Çoklu regresyon Analizi (İstatistiksel Yöntemler)
Sridhar ve Ark. (1998)	Regresyon Analizi (İstatistiksel Yöntemler)
Chatterji ve Sridhar (1999)	Sinir Ağları (2. Dereceden İstatistiksel Ölçümler)
Delahaye ve Ark. (2000)	Kolmogorov Entropi
Majumdar ve Ochieng (2000)	Regresyon, Temel bileşen analizi, Faktör analizi
Manning ve Ark. (2001)	Korelasyon Analizi (İstatistiksel Yöntemler)
Schaefer ve Ark. (2001)	TLS (Tactical Load Smoother)
Kirwan ve Ark. (2002)	Sınıflandırma ve Derecelendirme
Histon ve Ark. (2001-2002)	Kolmogorov Entropi
Athenes ve Ark (2002)	Korelasyon Analizi (İstatistiksel Yöntemler)
Kopardekar ve Magyarits (2002)	Regresyon Analizi (İstatistiksel Yöntemler)
Masalonis ve Ark.(2003)	Ki-kare Analizi (İstatistiksel Yöntemler)
Yousefi ve Ark.(2003)	İstatistiksel Yöntemler
Benkouar ve Christien (2003-2005)	Kümeleme Yöntemi

Ek-4. 2006-2007 yıllarında Türkiye'de aylara göre toplam trafik dağılımı ve artış oranları.



Ek-5. 2007 yılı Ağustos ayı günlere göre trafik sayısı dağılımı.



Ek-6. Hava trafik kontrolör iş yükü değerlendirme anket formu.

Sayın Kontrolör,

Bu anket, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Ana Bilim Dalı Doktora Programı kapsamında gerçekleştirilen "Hava Sahası Sektörizasyonu ve Türkiye Uygulaması" başlıklı tez çalışmasında ***hava trafik yol kontrolörlerinin*** *iş yüklerini analiz etmek amacıyla yapılmaktadır. Çalışmanın başarısı, aşağıda verilen soruları doğru ve eksiksiz cevaplamanıza bağlıdır. Ankete ayıracağınız değerli zamanınız ve görüşlerinizi bizlerle paylaşacağınız için şimdiden teşekkür eder, saygılar sunarım.*

Arş. Grv. Kadriye YAMAN
A.Ü.Sivil Havacılık Y.O.
kyaman@anadolu.edu.tr

1. Cinsiyetiniz : ( ) Bay ( ) Bayan

2. Yaşınız : .....

3. En son mezun olduğunuz : .....

4. Çalıştığınız birim : ( ) Ankara ACC ( ) İstanbul ACC

5. Kaç yıldır kontrolör olarak çalışıyorsunuz? : .....

6. Çalışma pozisyonunuz (Birden fazla seçeneği işaretleyebilirsiniz)

( ) Asist. Kont. ( ) Kontrolör ( ) OJTI ( ) Ekip Şefi ( ) Ünite Şefi

7. En çok hangi ACC sektöründe çalışıyorsunuz?

( ) Ankara ACC East 1 ( ) Ankara ACC Lower West ( ) İstanbul ACC Lower

( ) Ankara ACC East 2 ( ) Ankara ACC Upper West ( ) İstanbul ACC South East

( ) Ankara ACC Lower South ( ) İstanbul ACC Upper ( ) İstanbul ACC South West Lower

( ) Ankara ACC Upper South ( ) İstanbul ACC Intermediate ( ) İstanbul ACC South West Upper

8. Çalıştığınız ACC sektöründe yoğun trafik periyodunda, saatteki maksimum uçak sayısı nedir? :

9. Çalıştığınız ACC sektöründe yoğun trafik periyodunda, maksimum eş zamanlı uçak sayısı nedir? :

10. Sizce bir ACC kontrolörünün saatte kontrol edebileceği maksimum uçak sayısı ne kadar olmalıdır? :

11. Sizce bir ACC kontrolörünün eş zamanlı kontrol edebileceği maksimum uçak sayısı ne kadar olmalıdır? :

12. Çalıştığınız sektörde bir uçak en fazla ne kadar süre uçmaktadır? (Örneğin 15 dakika gibi) :

13. Sizce bir uçağın bir sektörde maksimum uçuş süresi ne kadar olmalıdır? :

14.

Aşağıda verilen kontrol faaliyetlerini, çalışmanızda meydana getirdiği iş yükü bakımından önem derecesine göre uygun kutucuğa (X) koyarak derecelendiriniz.	ÇOK ÖNEMLİ ⟷ AZ ÖNEMLİ				
	5	4	3	2	1
İzleme faaliyetleri					
Koordinasyon faaliyetleri					
Conflict tespit ve çözüm faaliyetleri					
Uçak hareket değişim faaliyetleri (uçuş başı, hız, irtifa, direk rota)					

15.

Aşağıda verilen farklı uçak hareketlerinin iş yükünüzde ne derece etkili olduğunu uygun kutucuğa (X) koyarak derecelendiriniz.	ÇOK FAZLA ⟷ ÇOK AZ				
	5	4	3	2	1
Sektörde çok sayıda uçağın **seviye değişikliği**					
Sektörde çok sayıda uçağın **hız değişikliği**					
Sektörde çok sayıda uçağın **uçuş başı değişikliği**					
Sektörde çok sayıda uçağın **direk rotada** uçması					

16. Aşağıda verilen farklı uçak hareketleri için verdiğiniz talimatları uygulama/uygulatma sürelerini saniye olarak yazınız.

Uçuş başı değişikliğine harcadığım süre .....**sn**
Hız değişikliğine harcadığım süre .....**sn**
İrtifa değişikliğine harcadığım süre .....**sn**
Direkt rota değişikliğine harcadığım süre .....**sn**

17.

Aşağıdaki belirtilen koordinasyon faaliyetlerinin iş yükünüzde ne derece etkili olduğunu uygun kutucuğa (X) koyarak derecelendiriniz.	ÇOK FAZLA ⟷ ÇOK AZ				
	5	4	3	2	1
Aynı ACC birimi içerisindeki diğer sektörlerle koordinasyon					
Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyon					
Askeri ünitelerle koordinasyon					
Komşu ACC birimleri ile koordinasyon					

18. Aşağıdaki belirtilen koordinasyon faaliyetleri için harcadığınız ortalama süreyi saniye olarak yazınız.

Aynı ACC birimi içerisindeki sektörler arası koordinasyona harcadığım süre .....**sn**

Aynı ACC birimi içerisindeki diğer ATC birimleri ile koordinasyona harcadığım süre .....**sn**

Askeri birimlerle koordinasyona harcadığım süre .....**sn**

Farklı ACC birimleri ile koordinasyona harcadığım süre .....**sn**

19.

Aşağıda belirtilen uçaklar arasında conflict tespit ve çözüm faaliyetlerinin iş yükünüzü ne kadar etkilediğini uygun kutucuğa (X) koyarak derecelendiriniz.	**ÇOK FAZLA ⟷ ÇOK AZ**				
	5	**4**	**3**	**2**	**1**
Aynı uçuş seviyesinde aynı yönde uçan trafikler arasında					
Aynı uçuş seviyesinde kesişen yönlerdeki trafikler arasında					
Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasında					
Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasında					
Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasında					

20. Aşağıda belirtilen conflict tespit ve çözüm faaliyetleri için harcadığınız süreyi yazınız.

	Tespit süresi	**Çözüm süresi**
Aynı yöndeki trafik çakışmalarının	:.....**sn**	:.....**dk**
Kesişen yönlerdeki trafik çakışmalarının	:.....**sn**	:.....**dk**
Aynı yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmaların	:.....**sn**	:.....**dk**
Kesişen yönde tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmaların	:.....**sn**	:.....**dk**
Karşı yönlü tırmanan veya alçalan trafikler arasındaki çakışmaların	:.....**sn**	:.....**dk**

Anketimiz bitmiştir.
Yapılan bu bilimsel çalışmaya katkılarınızdan dolayı teşekkür ederiz.

Ek-7. 26 Ağustos 2007 tarihinde iki pik saatlik zaman diliminde gerçekleşen 2 dakikalık (13^{00}-13^{02}) uçuş verisi.

Giriş Zamanı	Uçak Çağrı Kodu	Uçak Tipi	Kalkış Yeri	Varış Yeri	Yol	Nokta	FL	Nokta Üzerindeki Zaman
13:00	**BGW673**	**A320**	**LTAI**	**EDDB**	KUMRU 1B	LTAI	000	13:00
					A/UA16	KUMRU	181	13:07
					A/UA 16	ELMAS	209	13:09
					A/UA 16	EKSEN	245	13:12
					A/UA 16	LEMDA	155	13:13
					L/UL 619	KFK	319	13:20
					L/UL 619	HANKO	320	13:26
					L/UL 619	GAYEM	320	13:40
					L/UL 619	MAKOL	320	13:51
13:00	**AZA823**	**A320**	**OLBA**	**LIMC**	L/UL 619	VESAR	280	13:00
					L/UL 619	MUT	340	13:10
					L/UL 619	OKLAM	340	13:25
					L/UL 610	KFK	340	13:35
					L/UL 610	KARGI	340	13:41
					L/UL 610	YAA	340	13:52
					L/UL 610	IST	340	13:57
					L/UL 610	FENER	340	14:01
					L/UL 615	VADEN	340	14:11
13:01	**SVA185**	**B772**	**OERK**	**EDDF**	L/UL 619	VESAR	360	13:01
					L/UL 619	MUT	360	13:10
					L/UL 619	OKLAM	360	13:24
					L/UL 610	KFK	360	13:32
					L/UL 610	KARGI	360	13:38
					L/UL 610	YAA	360	13:47
					L/UL 610	IST	360	13:51

					L/UL 610	FENER	360	13:55
					L/UL 610	VADEN	360	14:04
13:02	**AFL4235**	**T154**	**UUEE**	**LGIR**	G/UG1	RIXEN	360	13:02
					G/UG1	UNSAL	370	13:07
					G/UG1	FATIH	370	13:09
					M/UM 603	IST	370	13:11
					G/UG 80	EKI	360	13:19
					G/UG 80	*BIG	370	13:24
					G/UG 80	KONEN	370	13:27
					G/UG 80	DUGLA	370	13:29
					G/UG 80	BERGO	370	13:33

Ek-8. Uçak tiplerine göre ara irtifa değerlerine karşı gelen hız değerleri.

Uçak Tipi	FL	h_0	h	h_1	V_0	V_1	$h-h_0$ (feet)	V_1-V_0	h_1-h_0	Vtas (Knot)
A310	336	33000	33600	35000	465	461	600	-4	2000	463,8
A310	380	37000	38000	39000	459	459	1000	0	2000	459
A310	384	37000	38000	39000	459	459	1000	0	2000	459
A319	250	24000	25000	26000	425	438	1000	13	2000	431,5
A319	268	26000	26800	28000	438	452	800	14	2000	443,6
A319	270	26000	27000	28000	438	452	1000	14	2000	445
A319	293	29000	29300	31000	459	458	300	-1	2000	458,85
A319	299	29000	29900	31000	459	458	900	-1	2000	458,55
A319	300	29000	30000	31000	459	458	1000	-1	2000	458,5
A319	320	31000	32000	33000	458	454	1000	-4	2000	456
A319	325	31000	32500	33000	458	454	1500	-4	2000	455
A319	340	33000	34000	35000	454	450	1000	-4	2000	452
A320	245	24000	24500	26000	438	452	500	14	2000	441,5
A320	250	24000	25000	26000	438	452	1000	14	2000	445
A320	255	24000	25500	26000	438	452	1500	14	2000	448,5
A320	283	28000	28300	29000	464	462	300	-2	1000	463,4
A320	300	29000	30000	31000	462	458	1000	-4	2000	460
A320	309	29000	30900	31000	462	458	1900	-4	2000	458,2
A320	311	31000	31100	33000	458	454	100	-4	2000	457,8
A320	312	31000	31200	33000	458	454	200	-4	2000	457,6
A320	318	31000	31800	33000	458	454	800	-4	2000	456,4
A320	319	31000	31900	33000	458	454	900	-4	2000	456,2
A320	320	31000	32000	33000	458	454	1000	-4	2000	456
A320	321	31000	32100	33000	458	454	1100	-4	2000	455,8
A320	325	31000	32500	33000	458	454	1500	-4	2000	455
A320	326	31000	32600	33000	458	454	1600	-4	2000	454,8
A320	327	31000	32700	33000	458	454	1700	-4	2000	454,6
A320	334	33000	33400	35000	454	450	400	-4	2000	453,2
A320	338	33000	33800	35000	454	450	800	-4	2000	452,4
A320	340	33000	34000	35000	454	450	1000	-4	2000	452
A320	352	35000	35200	37000	450	447	200	-3	2000	449,7
A320	360	35000	36000	37000	450	447	1000	-3	2000	448,5
A321	245	24000	24500	26000	425	438	500	13	2000	428,25
A321	255	24000	25500	26000	425	438	1500	13	2000	434,75
A321	267	26000	26700	28000	438	452	700	14	2000	442,9
A321	268	26000	26800	28000	438	452	800	14	2000	443,6
A321	287	28000	28700	29000	452	459	700	7	1000	456,9
A321	288	28000	28800	29000	452	459	800	7	1000	457,6
A321	300	29000	30000	31000	459	458	1000	-1	2000	458,5
A321	302	29000	30200	31000	459	458	1200	-1	2000	458,4
A321	309	29000	30900	31000	459	458	1900	-1	2000	458,05
A321	319	31000	31900	33000	458	454	900	-4	2000	456,2
A321	320	31000	32000	33000	458	454	1000	-4	2000	456
A321	321	31000	32100	33000	458	454	1100	-4	2000	455,8
A321	323	31000	32300	33000	458	454	1300	-4	2000	455,4
A321	324	31000	32400	33000	458	454	1400	-4	2000	455,2

Ek-8. Uçak tiplerine göre ara irtifa değerlerine karşı gelen hız değerleri (devamı).

Uçak Tipi	FL	h_0	h	h_1	V_0	V_1	$h-h_0$ (feet)	V_1-V_0	h_1-h_0	Vtas (Knot)
A321	325	31000	32500	33000	458	454	1500	-4	2000	455
A321	331	33000	33100	35000	454	450	100	-4	2000	453,8
A321	340	33000	34000	35000	454	450	1000	-4	2000	452
A321	388	37000	38800	39000	447	447	1800	0	2000	447
A332	269	26000	26900	28000	479	487	900	8	2000	482,6
A332	314	31000	31400	33000	481	477	400	-4	2000	480,2
A332	361	35000	36100	37000	473	470	1100	-3	2000	471,35
A332	380	37000	38000	39000	470	470	1000	0	2000	470
A332	400	39000	40000	41000	470	470	1000	0	2000	470
A343	340	33000	34000	35000	465	461	1000	-4	2000	463
A343	360	35000	36000	37000	461	459	1000	-2	2000	460
B733	287	28000	28700	29000	440	438	700	-2	1000	438,6
B733	308	29000	30800	31000	438	434	1800	-4	2000	434,4
B733	319	31000	31900	33000	434	430	900	-4	2000	432,2
B733	320	31000	32000	33000	434	430	1000	-4	2000	432
B733	328	31000	32800	33000	434	430	1800	-4	2000	430,4
B733	340	33000	34000	35000	430	427	1000	-3	2000	428,5
B734	250	24000	25000	26000	398	411	1000	13	2000	404,5
B734	270	26000	27000	28000	411	424	1000	13	2000	417,5
B734	283	28000	28300	29000	424	431	300	7	1000	426,1
B734	291	29000	29100	31000	431	434	100	3	2000	431,15
B734	293	29000	29300	31000	431	434	300	3	2000	431,45
B734	300	29000	30000	31000	431	434	1000	3	2000	432,5
B734	320	31000	32000	33000	434	430	1000	-4	2000	432
B734	321	31000	32100	33000	434	430	1100	-4	2000	431,8
B734	323	31000	32300	33000	434	430	1300	-4	2000	431,4
B734	337	33000	33700	35000	430	427	700	-3	2000	428,95
B735	287	28000	28700	29000	452	450	700	-2	1000	450,6
B737	360	35000	36000	37000	450	447	1000	-3	2000	448,5
B737	380	37000	38000	39000	447	447	1000	0	2000	447
B738	245	24000	24500	26000	398	411	500	13	2000	401,25
B738	246	24000	24600	26000	398	411	600	13	2000	401,9
B738	250	24000	25000	26000	398	411	1000	13	2000	404,5
B738	257	24000	25700	26000	398	411	1700	13	2000	409,05
B738	278	26000	27800	28000	411	424	1800	13	2000	422,7
B738	286	28000	28600	29000	424	431	600	7	1000	428,2
B738	297	29000	29700	31000	431	444	700	13	2000	435,55
B738	298	29000	29800	31000	431	444	800	13	2000	436,2
B738	300	29000	30000	31000	431	444	1000	13	2000	437,5
B738	301	29000	30100	31000	431	444	1100	13	2000	438,15
B738	302	29000	30200	31000	431	444	1200	13	2000	438,8
B738	313	31000	31300	33000	444	454	300	10	2000	445,5
B738	314	31000	31400	33000	444	454	400	10	2000	446
B738	315	31000	31500	33000	444	454	500	10	2000	446,5
B738	319	31000	31900	33000	444	454	900	10	2000	448,5

Ek-8. Uçak tiplerine göre ara irtifa değerlerine karşı gelen hız değerleri (devamı).

Uçak Tipi	FL	h_0	h	h_1	V_0	V_1	$h-h_0$ (feet)	V_1-V_0	h_1-h_0	Vtas (Knot)
B738	360	35000	36000	37000	450	447	1000	-3	2000	448,5
B738	368	35000	36800	37000	450	447	1800	-3	2000	447,3
B738	380	37000	38000	39000	447	447	1000	0	2000	447
B742	320	31000	32000	33000	505	500	1000	-5	2000	502,5
B742	340	33000	34000	35000	500	496	1000	-4	2000	498
B742	360	35000	36000	37000	496	493	1000	-3	2000	494,5
B742	361	35000	36100	37000	496	493	1100	-3	2000	494,35
B744	400	39000	40000	41000	482	482	1000	0	2000	482
B752	246	24000	24600	26000	412	425	600	13	2000	415,9
B752	264	26000	26800	28000	425	438	800	13	2000	430,2
B752	268	26000	26800	28000	425	438	800	13	2000	430,2
B752	274	26000	27400	28000	425	438	1400	13	2000	434,1
B752	315	31000	31500	33000	459	465	500	6	2000	460,5
B752	332	33000	33200	35000	465	461	200	-4	2000	464,6
B752	340	33000	34000	35000	465	461	1000	-4	2000	463
B752	346	33000	34600	35000	465	461	1600	-4	2000	461,8
B752	347	33000	34700	35000	465	461	1700	-4	2000	461,6
B752	352	35000	35200	37000	461	459	200	-2	2000	460,8
B752	360	35000	36000	37000	461	459	1000	-2	2000	460
B752	380	37000	38000	39000	459	459	1000	0	2000	459
B753	264	26000	26400	28000	438	452	400	14	2000	440,8
B762	377	37000	37700	39000	459	459	700	0	2000	459
B762	380	37000	38000	39000	459	459	1000	0	2000	459
B763	340	33000	34000	35000	465	461	1000	-4	2000	463
B763	360	35000	36000	37000	461	459	1000	-2	2000	460
B763	380	37000	38000	39000	459	459	1000	0	2000	459
B772	326	31000	32600	33000	488	489	1600	1	2000	488,8
B772	355	35000	35500	37000	484	482	500	-2	2000	483,5
B772	360	35000	36000	37000	484	482	1000	-2	2000	483
B772	380	37000	38000	39000	482	482	1000	0	2000	482
B773	340	33000	34000	35000	489	484	1000	-5	2000	486,5
B773	360	35000	36000	37000	484	482	1000	-2	2000	483
BE40	270	26000	27000	28000	438	446	1000	8	2000	442
C17	343	33000	34300	35000	465	461	1300	-4	2000	462,4
C17	360	35000	36000	37000	461	459	1000	-2	2000	460
C525	300	29000	30000	31000	343	355	1000	12	2000	349
C650	255	24000	25500	26000	425	438	1500	13	2000	434,75
C650	292	29000	29200	31000	456	452	200	-4	2000	455,6
C650	296	29000	29600	31000	456	452	600	-4	2000	454,8
C650	320	31000	32000	33000	452	448	1000	-4	2000	450
C650	403	39000	40300	41000	442	442	1300	0	2000	442
CL60	300	29000	30000	31000	431	444	1000	13	2000	437,5
CL60	360	35000	36000	37000	444	442	1000	-2	2000	443
C750	328	31000	32800	33000	473	477	1800	4	2000	476,6
C750	425	41000	42500	43000	470	470	1500	0	2000	470

Ek-8. Uçak tiplerine göre ara irtifa değerlerine karşı gelen hız değerleri (devamı).

Uçak Tipi	FL	h_0	h	h_1	V_0	V_1	$h-h_0$ (feet)	V_1-V_0	h_1-h_0	Vtas (Knot)
C56X	259	24000	25900	26000	425	438	1900	13	2000	437,35
C56X	320	31000	32000	33000	440	436	1000	-4	2000	438
DC92	270	26000	27000	28000	480	476	1000	-4	2000	478
F2TH	266	26000	26600	28000	438	452	600	14	2000	442,2
F2TH	320	31000	32000	33000	469	465	1000	-4	2000	467
F2TH	331	33000	33100	35000	465	461	100	-4	2000	464,8
GALX	259	24000	25900	26000	425	438	1900	13	2000	437,35
GALX	320	31000	32000	33000	446	442	1000	-4	2000	444
H25B	269	26000	26900	28000	397	410	900	13	2000	402,85
H25B	341	33000	34100	35000	436	432	1100	-4	2000	433,8
H25B	367	35000	36700	37000	432	430	1700	-2	2000	430,3
J328	321	31000	32100	33000	411	407	1100	-4	2000	408,8
IL86	291	29000	29100	31000	459	469	100	10	2000	459,5
IL86	292	29000	29200	31000	459	469	200	10	2000	460
IL86	294	29000	29400	31000	459	469	400	10	2000	461
IL86	300	29000	30000	31000	459	469	1000	10	2000	464
IL86	320	31000	32000	33000	469	465	1000	-4	2000	467
GLEX	300	29000	30000	31000	497	493	1000	-4	2000	495
GLEX	315	31000	31500	33000	493	489	500	-4	2000	492
GLEX	380	37000	38000	39000	482	482	1000	0	2000	482
GLEX	400	39000	40000	41000	482	482	1000	0	2000	482
LJ60	270	26000	27000	28000	438	452	1000	14	2000	445
LJ45	247	24000	24700	26000	425	438	700	13	2000	429,55
LJ45	320	31000	32000	33000	446	442	1000	-4	2000	444
MD11	320	31000	32000	33000	487	483	1000	-4	2000	485
MD82	245	24000	24500	26000	412	425	500	13	2000	415,25
MD82	252	24000	25200	26000	412	425	1200	13	2000	419,8
MD82	255	24000	25500	26000	412	425	1500	13	2000	421,75
MD82	266	26000	26600	28000	425	438	600	13	2000	428,9
MD82	279	28000	27900	29000	438	445	-100	7	1000	437,3
MD82	300	29000	30000	31000	445	446	1000	1	2000	445,5
MD82	320	31000	32000	33000	446	442	1000	-4	2000	444
MD83	251	24000	25100	26000	412	425	1100	13	2000	419,15
MD83	252	24000	25200	26000	412	425	1200	13	2000	419,8
MD83	257	24000	25700	26000	412	425	1700	13	2000	423,05
MD83	267	26000	26700	28000	425	438	700	13	2000	429,55
MD83	273	26000	27300	28000	425	438	1300	13	2000	433,45
MD83	287	28000	28700	29000	438	445	700	7	1000	442,9
MD83	300	29000	30000	31000	445	446	1000	1	2000	445,5
MD83	320	31000	32000	33000	446	442	1000	-4	2000	444
MD88	252	24000	25200	26000	412	425	1200	13	2000	419,8
MD88	257	24000	25700	26000	412	425	1700	13	2000	423,05
MD88	267	26000	26700	28000	425	438	700	13	2000	429,55
MD88	273	26000	27300	28000	425	438	1300	13	2000	433,45
MD88	300	29000	30000	31000	445	446	1000	1	2000	445,5

Ek-8. Uçak tiplerine göre ara irtifa değerlerine karşı gelen hız değerleri (devamı).

Uçak Tipi	FL	h_0	h	h_1	V_0	V_1	$h-h_0$ (feet)	V_1-V_0	h_1-h_0	Vtas (Knot)
T134	270	26000	27000	28000	397	410	1000	13	2000	403,5
T154	263	26000	26300	28000	434	448	300	14	2000	436,1
T154	294	29000	29400	31000	455	469	400	14	2000	457,8
T154	309	29000	30900	31000	455	469	1900	14	2000	468,3
T154	337	33000	33700	35000	465	461	700	-4	2000	463,6
T154	340	33000	34000	35000	465	461	1000	-4	2000	463
T154	347	33000	34700	35000	465	461	1700	-4	2000	461,6
T154	360	35000	36000	37000	461	459	1000	-2	2000	460
T154	380	37000	38000	39000	459	459	1000	0	2000	459
T204	320	31000	32000	33000	459	465	1000	6	2000	462

Ek-9. Aday sektör merkez noktaları ve harf kodları.

Aday Sektör Merkezleri	Kare Birim	Seyrüsefer Sistemi Tanıtım Kodu	S/S Sistemi Enlemi (x koordinatı)	S/S Sistemi Boylamı (y koordinatı)
KY1	A36	AYT	3402	4067
KY2	A41	MUT	3692	4056
KY3	A100	CRD	3297	4183
KY4	A133	IMR	3020	4259
KY5	A177	KFK	3420	4287
KY6	A194	EZS	4368	4283
KY7	A284	BIG	3050	4477
KY8	A296	BAG	3652	4444
KY9	A297	BUK	3706	4443
KY10	A323	EKI	3058	4531
KY11	A326	IST	3221	4519
KY12	A327	YAA	3275	4516
KY13	A363	BKZ	3281	4570
KY14	A378	CRM	4084	4551
KY15	A408	INB	3765	4606
KY16	A444	SIN	3924	4659

Ek-10. Hava sahası sektör tasarım problemi toplam ağırlıklandırma yöntemi kodu.

```
$eolcom //
$STITLE Example model definitions

**Örnek Model (Toplam Agirliklandirma Methodu)
**Seçilen kare birim (A1*A471)
**Seçilen aday sektör merkezi(KY1*KY16)

Sets
i  kare birim indisi          /A1*A471/
j  aday sektör indisi         /KY1*KY16/
h  isyuku matrisi             /Ni,Ti,Nc1,Nc2,Nc3,Nc4,Nc5,Nk1,Nk2,
                               Nk3,Nk4,Nh1,Nh2,Nh3,Nh4/
Enbo1                         /E1, B1/
Enbo2                         /E2, B2/
Goals  amac fonksiyonlari     /isyuku, mesafe, maxmesafe/ ;

Alias(i,ii);
Alias(j,jj);
Alias(Goals,Goal) ;

Set
NG(i,ii) kare birim komsuluklari
$include C:\data_sector\kom471.inc

Parameter
Wdata(i,h)  FL 245 ve uzeri isyuku matrisi ;
$libinclude xlimport Wdata C:\data_sector\sektorler.xls veriler3!A1..P472

Parameter
Adata(i,*) Enlem ve boylam;
$libinclude xlimport Adata C:\data_sector\sektorler.xls veriler3!R1..T472

Parameter
Bdata(j,*) Enlem ve boylam;
$libinclude xlimport Bdata C:\data_sector\sektorler.xls veriler3!V1..X17

Scalars
*=================== 1. Is yuku agirliklari ========================*
Fi   "İzleme"                                                  /4.18/
Fk   "Koordinasyon"                                            /4.61/
```

```
Fc  "Carpisma tehlikesi"                                        /4.69/
Fh  "Ucak hareketi"                                             /4.29/

*=================== 2. İlgili Faaliyet Katsayilari ====================*
** Koordinasyon
Ck1  "Ayni ACC icinde yetki devri"                              /3.82/
Ck2  "Diger ATC birimleri ile koordinasyon"                     /3.93/
Ck3  "Askeri unitelerle koordinasyon"                           /4.60/
Ck4  "Farkli ACC birimine yetki devri"                          /4.14/

** Carpisma Tespit ve Cozum
Cc1  "Ayni iz ayni seviye "                                     /3.61/
Cc2  "Aynı seviye kesisen yon"                                  /4.20/
Cc3  "Ayni yonde tirmanan-alcalan"                              /3.88/
Cc4  "Kesisen yonde tirmanan-alcalan"                           /4.39/
Cc5  "Karsi yonlu tırmanan-alcalan"                             /4.64/

** Ucak Hareketi
Ch1  "Ucus seviye degisikligi"                                  /4.49/
Ch2  "Hiz degisikligi"                                          /3.53/
Ch3  "Ucus basi degisikliği"                                    /4.17/
Ch4  "Direkt rota"                                              /3.43/

*================= 3.İlgili Faaliyet Zamanlari(saat)====================*

Tcs1 "Ayni iz, ayni seviye tespit-cozum suresi "                /0.035/
Tcs2 "Kesisen trafikler arasi tespit-cozum suresi"              /0.041/
Tcs3 "Ayni yönde tırmanan-alcalan trafik tespit-cozum suresi"   /0.034/
Tcs4 "Kesisen yönde tırmanan-alcalan trafik tespit-cozum suresi" /0.037/
Tcs5 "Karsi yonlu tırmanan-alcalan trafik tespit-cozum suresi"  /0.033/
Tks1 "Aynı ACC birimi yetki devri suresi"                       /0.007/
Tks2 "Diger ATC Birimleri koordinasyon suresi"                  /0.008/
Tks3 "Askeri koordinasyon suresi"                               /0.016/
Tks4 "Farkli ACC yetki devri suresi"                            /0.011/
Ths1 "FL degisikligi suresi"                                    /0.007/
Ths2 "Hiz degisikligi verme suresi"                             /0.005/
Ths3 "Bas degisikligi verme suresi"                             /0.006/
Ths4 "Direkt rota verme süresi"                                 /0.005/
;
Parameter  WL  "kare birim isyuku" ;

WL(i) =(Fi *(Wdata(i,'Ni') * Wdata(i,'Ti'))+ (Fc * ((Wdata(i,'Nc1')* Cc1*Tcs1)+
        (Wdata(i,'Nc2') * Cc2 * Tcs2)+(Wdata(i,'Nc3') * Cc3 * Tcs3)+
        (Wdata(i,'Nc4') * Cc4 * Tcs4)+ (Wdata(i,'Nc5') * Cc5 * Tcs5)) +
        (Fk * ((Wdata(i,'Nk1') * Ck1 * Tks1)+ (Wdata(i,'Nk2') * Ck2 * Tks2)+
        (Wdata(i,'Nk3') * Ck3 * Tks3)+ (Wdata(i,'Nk4') * Ck4 * Tks4))+
        (Fh * ((Wdata(i,'Nh1') * Ch1 * Ths1) + (Wdata(i,'Nh2') * Ch2 * Ths2)+
        (Wdata(i,'Nh3') * Ch3 * Ths3)+ (Wdata(i,'Nh4') * Ch4 * Ths4))))));
```

Parameter D "Mesafe" ;

D(i,j) = sqrt(sqr(Adata(i,'E1')-Bdata(j,'E2'))+ sqr(Adata(i,'B1')-Bdata(j,'B2')));

Parameter S;

S = 6;

Parameter

Weights(Goals) Amaclar icin agirliklar
/isyuku 1, mesafe 2, maxmesafe 3/ ;

Variables

Goalobj Amac fonksiyonu degeri;

Positive Variables

Goallevel(Goals)
WLT j sektoru icin toplam isyuku
MD(j) minimax mesafe ;

Binary Variables

x(i,j) i kare birim j sektorune atanmissa 1 diger durumda 0,

y(j) j sektoru acilmissa 1 diger durumda 0 ;

Equations

OBJ "Agirliklandırılmıs amac fonksiyonu"
def1 "İsyuku amac fonksiyonu"
def2 "Toplam mesafe amac fonksiyonu"
def3 "Minmax mesafe amac fonksiyonu"
constK1 "Atama kisiti"
constK2 "Atama kisiti"
constK3 "Komsuluk kisiti"
constK4 "Acilacak en az sektor sayı kisiti"
constK5 "Minmax mesafe kisiti"
constK6 "Minmax isyuku kisiti" ;

===
*Amaclar
===

OBJ..Goalobj =e= sum(Goals, Weights(Goals)* Goallevel(Goals));

def1..WLT =e= Goallevel("isyuku") ;

def2..sum(j, sum(i, x(i,j) * D(i,j))) =e= Goallevel("mesafe") ;

def3.. sum(j, MD(j)) =e= Goallevel("maxmesafe") ;

```
*=====================================================================*
*Kisitlar
*=====================================================================*
constK1(i)..sum(j, x(i,j)) =e= 1 ;

constK2(j)..sum(i, x(i,j)) =l= card(i) * y(j) ;

constK3(i,j)..x(i,j) =l= sum(ii $ NG(i,ii), x(ii,j));

constK4..sum(j, y(j)) =l= S;

constK5(i,j)..D(i,j)*x(i,j) =l= MD(j) ;

constK6(j).. sum(i,WL(i)*x(i,j)) =l= WLT;

*Bounds
WLT.up=205;

*=====================================================================* *

Model Sektor /all/;
option limrow=0, limcol=0, solprint=on, solvelink=2;
option MIP = CPLEX;
option iterlim = 10000000;
option reslim = 20000;
option optcr = 0;

Parameter Goaldata(Goal,*,*) ;

Solve Sektor using MIP minimizing Goalobj;
Goaldata(Goal,Goals,"Payoff")=Goallevel.l(Goals);

Display x.l, y.l ;
```

Ek-11. Hava sahası sektör tasarım problemi konik skalerleştirme yöntemi kodu.

```
$eolcom //
$STITLE Example model definitions

**Örnek Model (Konik skalerlestirme methodu)
**Seçilen kare birim (A1*A471)
**Seçilen aday sektör merkezi(KY1*KY16)

Sets
i  kare birim indisi          /A1*A471/
j  aday sektör indisi         /KY1*KY16/
h  isyuku matrisi             /Ni,Ti,Nc1,Nc2,Nc3,Nc4,Nc5,Nk1,Nk2,
                               Nk3,Nk4,Nh1,Nh2,Nh3,Nh4/
Enbo1                         /E1, B1/
Enbo2                         /E2, B2/
Goals  amac fonksiyonlari     /isyuku, mesafe, maxmesafe/ ;
Alias(i,ii);
Alias(j,jj);
Alias(Goals,Goal) ;

Set
NG(i,ii) kare birim komsuluklari
$include C:\data_sector\kom471.inc

Parameter
Wdata(i,h)  FL 245 ve uzeri isyuku matrisi;
$libinclude xlimport Wdata C:\data_sector\sektorler.xls veriler3!A1..P472

Parameter
Adata(i,*) Enlem ve boylam;
$libinclude xlimport Adata C:\data_sector\sektorler.xls veriler3!R1..T472

Parameter
Bdata(j,*) Enlem ve boylam;
$libinclude xlimport Bdata C:\data_sector\sektorler.xls veriler3!V1..X17

Scalars
*=================== 1. Is yuku agirliklari ======================*
Fi   "İzleme"                                              /4.18/
Fk   "Koordinasyon"                                        /4.61/
```

```
Fc  "Carpisma tehlikesi"                                          /4.69/
Fh  "Ucak hareketi"                                               /4.29/
*=================== 2. İlgili Faaliyet Katsayilari ===================*
** Koordinasyon

Ck1  "Ayni ACC icinde yetki devri"                                /3.82/
Ck2  "Diger ATC birimleri ile koordinasyon"                       /3.93/
Ck3  "Askeri unitelerle koordinasyon"                             /4.60/
Ck4  "Farkli ACC birimine yetki devri"                            /4.14/

** Carpisma Tespit ve Cozum

Cc1  "Ayni iz ayni seviye "                                       /3.61/
Cc2  "Aynı seviye kesisen yon"                                    /4.20/
Cc3  "Ayni yonde tirmanan-alcalan"                                /3.88/
Cc4  "Kesisen yonde tirmanan-alcalan"                             /4.39/
Cc5  "Karsi yonlu tırmanan-alcalan"                               /4.64/

** Ucak Hareketi

Ch1  "Ucus seviye degisikligi"                                    /4.49/
Ch2  "Hiz degisikligi"                                            /3.53/
Ch3  "Ucus basi degisikliği"                                      /4.17/
Ch4  "Direkt rota"                                                /3.43/

*================ 3.İlgili Faaliyet Zamanlari(saat)=================*
Tcs1 "Ayni iz, ayni seviye tespit-cozum suresi "                  /0.035/
Tcs2 "Kesisen trafikler arasi tespit-cozum suresi"                /0.041/
Tcs3 "Ayni yönde tırmanan-alcalan trafik tespit-cozum suresi"     /0.034/
Tcs4 "Kesisen yönde tırmanan-alcalan trafik tespit-cozum suresi"  /0.037/
Tcs5 "Karsi yonlu tırmanan-alcalan trafik tespit-cozum suresi"    /0.033/
Tks1 "Aynı ACC birimi yetki devri suresi"                         /0.007/
Tks2 "Diger ATC Birimleri koordinasyon suresi"                    /0.008/
Tks3 "Askeri koordinasyon suresi"                                 /0.016/
Tks4 "Farkli ACC yetki devri suresi"                              /0.011/
Ths1 "FL degisikligi suresi"                                      /0.007/
Ths2 "Hiz degisikligi verme suresi"                               /0.005/
Ths3 "Bas degisikligi verme suresi"                               /0.006/
Ths4 "Direkt rota verme süresi"                                   /0.005/;

Parameter WL  "kare birim isyuku" ;
WL(i) =(Fi *(Wdata(i,'Ni') * Wdata(i,'Ti'))+ (Fc * ((Wdata(i,'Nc1')* Cc1*Tcs1)+
        (Wdata(i,'Nc2') * Cc2 * Tcs2)+(Wdata(i,'Nc3') * Cc3 * Tcs3)+
        (Wdata(i,'Nc4') * Cc4 * Tcs4)+ (Wdata(i,'Nc5') * Cc5 * Tcs5)) +
        (Fk * ((Wdata(i,'Nk1') * Ck1 * Tks1)+ (Wdata(i,'Nk2') * Ck2 * Tks2)+
        (Wdata(i,'Nk3') * Ck3 * Tks3)+ (Wdata(i,'Nk4') * Ck4 * Tks4))+
        (Fh * ((Wdata(i,'Nh1') * Ch1 * Ths1) + (Wdata(i,'Nh2') * Ch2 * Ths2)+
        (Wdata(i,'Nh3') * Ch3 * Ths3)+ (Wdata(i,'Nh4') * Ch4 * Ths4))))));
```

Parameter D "Mesafe" ;
D(i,j) = sqrt(sqr(Adata(i,'E1')-Bdata(j,'E2'))+ sqr(Adata(i,'B1')-Bdata(j,'B2')));

Parameter S;
S = 6;

Parameter

Alfa	/1/	
w1	Amac agirlik katsayisi	/1/
w2	Amac agirlik katsayisi	/2/
w3	Amac agirlik katsayisi	/3/
B1	Referans nokta	/172.871/
B2	Referans nokta	/103427.215/
B3	Referans nokta	/2421.034/;

Variables

z Amac fonksiyonu degeri;

Positive Variables

WLT
MD(j)
Goallevel(Goals) ;

Binary Variables

x(i,j) i kare birim j sektorune atanmissa 1 diger durumda 0,
y(j) j sektoru acilmissa 1 diger durumda 0 ;

Equations

OBJ	"Skalerlestirilmis amac fonksiyonu"
def1	"İsyuku amac fonksiyonu"
def2	"Toplam mesafe amac fonksiyonu"
def3	"Minmax mesafe amac fonksiyonu"
constK1	"Atama kisiti"
constK2	"Atama kisiti"
constK3	"Komsuluk kisiti"
constK4	"Acilacak en az sektor sayı kisiti"
constK5	"Minmax mesafe kisiti"
constK6	"Minmax isyuku kisiti" ;

```
*=====================================================================*
*Amaclar
*=====================================================================*
OBJ..w1*(WLT-B1) + w2*(sum(i, sum(j, D(i,j)*x(i,j)))-B2)+
      w3*(sum(j, MD(j))-B3) + Alfa*(abs(WLT-B1)+
      abs(sum(i, sum(j, D(i,j)*x(i,j)))-B2)+abs(sum(j, MD(j))-B3))=e= z ;
```

```
def1.. WLT =e= Goallevel("isyuku") ;

def2..sum(j, sum(i, x(i,j) * D(i,j))) =e= Goallevel("mesafe") ;

def3.. sum(j, MD(j)) =e= Goallevel("maxmesafe") ;

*=====================================================================*
*Kisitlar
*=====================================================================*
constK1(i)..sum(j, x(i,j)) =e= 1 ;

constK2(j)..sum(i, x(i,j)) =l= card(i) * y(j) ;

constK3(i,j)..x(i,j) =l= sum(ii $ NG(i,ii), x(ii,j));

constK4..sum(j, y(j)) =l= S;

constK5(i,j)..D(i,j)*x(i,j) =l= MD(j) ;

constK6(j).. sum(i,WL(i)*x(i,j)) =l= WLT;

*Bounds
WLT.up=205;
*=====================================================================*
Model Sektor /all/;
option limrow=0, limcol=0, sysout=on, solprint=on, solvelink=2;
option NLP = conopt2;
option MIP = CPLEX;
option MINLP = DICOPT;
option iterlim = 10000000;
option reslim = 20000;
option optcr = 0;

Parameter Goaldata(Goal,*,*) ;

Solve Sektor using MINLP minimizing z;
Goaldata(Goal,Goals,"Payoff")=Goallevel.l(Goals);

Display x.l, y.l ;
```

Ek-12. Çok amaçlı karma tam sayılı sektör tasarım matematiksel programlama modeli örnek analiz sonuçları.

KY2		KY3		KY6			KY9		KY10		KY14	
A1	A66	A10	A100	A28	A157	A275	A179	A333	A93	A325	A151	A382
A2	A67	A11	A101	A48	A158	A276	A180	A334	A94	A326	A187	A410
A3	A68	A12	A102	A49	A159	A277	A181	A335	A131	A327	A188	A411
A4	A69	A13	A103	A50	A160	A278	A182	A336	A132	A328	A225	A412
A5	A70	A14	A133	A51	A161	A279	A183	A337	A168	A329	A226	A413
A6	A71	A15	A134	A52	A162	A280	A184	A338	A169	A357	A227	A414
A7	A72	A16	A135	A53	A163	A281	A185	A366	A170	A358	A262	A415
A8	A73	A17	A136	A54	A164	A307	A186	A367	A205	A359	A263	A416
A9	A74	A29	A137	A55	A165	A308	A216	A368	A206	A360	A264	A417
A18	A75	A30	A138	A56	A166	A309	A217	A369	A207	A361	A265	A418
A19	A104	A31	A139	A76	A167	A310	A218	A370	A208	A362	A266	A419
A20	A105	A32	A140	A77	A189	A311	A219	A371	A209	A363	A301	A443
A21	A106	A33	A141	A78	A190	A312	A220	A372	A210	A364	A302	A444
A22	A107	A34	A171	A79	A191	A313	A221	A373	A243	A365	A303	A445
A23	A108	A35	A172	A80	A192	A314	A222	A402	A244	A393	A304	A446
A24	A109	A36	A173	A81	A193	A315	A223	A403	A245	A394	A305	A447
A25	A110	A37	A174	A82	A194	A316	A224	A404	A246	A395	A306	A448
A26	A111	A57	A175	A83	A195	A317	A254	A405	A247	A396	A339	A449
A27	A112	A58	A176	A84	A196	A318	A255	A406	A248	A397	A340	A450
A38	A142	A59	A177	A85	A197	A319	A256	A407	A249	A398	A341	A451
A39	A143	A60	A178	A86	A198	A346	A257	A408	A282	A399	A342	A452
A40	A144	A61	A211	A87	A199	A347	A258	A409	A283	A400	A343	A453
A41	A145	A62	A212	A88	A200	A348	A259	A435	A284	A401	A344	A463
A42	A146	A63	A213	A89	A201	A349	A260	A436	A285	A427	A345	A464
A43	A147	A64	A214	A90	A202	A350	A261	A437	A286	A428	A374	A465
A44	A148	A65	A215	A91	A203	A351	A292	A438	A287	A429	A375	A466
A45	A149	A95	A250	A92	A204	A352	A293	A439	A288	A430	A376	A467
A46	A150	A96	A251	A113	A228	A353	A294	A440	A289	A431	A377	A468
A47		A97	A252	A114	A229	A354	A295	A441	A290	A432	A378	A469
		A98	A253	A115	A230	A355	A296	A442	A320	A433	A379	A470
		A99	A291	A116	A231	A356	A297	A456	A321	A434	A380	A471
				A117	A232	A383	A298	A457	A322	A454	A381	
				A118	A233	A384	A299	A458	A323	A455		
				A119	A234	A385	A300	A459	A324			
				A120	A235	A386	A330	A460				
				A121	A236	A387	A331	A461				
				A122	A237	A388	A332	A462				
				A123	A238	A389						
				A124	A239	A390						
				A125	A240	A391						
				A126	A241	A392						
				A127	A242	A420						
				A128	A267	A421						
				A129	A268	A422						
				A130	A269	A423						
				A152	A270	A424						
				A153	A271	A425						
				A154	A272	A426						
				A155	A273							
				A156	A274							

Ek-13. Açılan optimum 6 sektör için Türkiye hava sahası detaylı yol haritası.

