

**KAVŞAK YÖNTEMİNİN HAVA SAHASI YOL YAPISINA VE SEKTÖR
KAPASİTESİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Mustafa ÖZDEMİR

Eskişehir, 2017

**KAVŞAK YÖNTEMİNİN HAVA SAHASI YOL YAPISINA VE SEKTÖR
KAPASİTESİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Mustafa ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Öznur USANMAZ

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen bilimleri Enstitüsü

Aralık 2017

Bu tez çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1610F677 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mustafa ÖZDEMİR'in “**Kavşak Yönteminin Hava Sahası Yol Yapısına Ve Sektör Kapasitesine Etkilerinin Değerlendirilmesi**” başlıklı tezi 29/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Hava Trafik Kontrol Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	<u>Unvanı - Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Öznur USANMAZ	
Üye	: Prof. Dr. Çerkez AĞAYEVA	
Üye	: Yard. Doç. Dr. Özlem ŞAHİN	

.....
Enstitü Müdürü

ÖZET

KAVŞAK YÖNTEMİNİN HAVA SAHASI YOL YAPISINA VE SEKTÖR KAPASİTESİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mustafa ÖZDEMİR

Hava Trafik Kontrol Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık 2017

Danışman: Doç. Dr. Öznur USANMAZ

Hava trafik sisteminin önemli bir bölümünü oluşturan hava sahasında rotaların uygun konfigürasyonlarda tasarlanarak çakışma noktalarının sayısının azaltılması, verimli bir trafik akışının sağlanabilmesi açısından önemlidir. Böylece tıkanıklık ve gecikmeler en aza indirilerek hava sahası kapasitesinin artırılması mümkün olabilir.

Bu çalışmada hızlı ve gerçek zamanlı simülasyonlardan faydalanılarak kavşak yöntemi ile yapılandırılmış rotalar farklı kesişim açılarıyla değerlendirilmiştir. Kesişim noktalarında, aynı uçuş seviyelerini muhafaza eden uçaklar arasında emniyetli ayırmaların sağlanması hedeflenmiştir. Hızlı zamanlı simülasyonlar ile rotalar arası minimum kesişim açısı, uçakların ortalama gecikme süresine bağlı olarak belirlenmiş ve farklı ağ yapılarındaki rotaların sektör kapasitesine ve gecikme süresine etkisi incelenmiştir. Hızlı zamanlı simülasyonlarda en iyi sonucu veren iki model, çakışma sayısı, kontrolörler tarafından verilen talimat sayısı ve müdahale edilen uçak sayısı gibi parametreler açısından gerçek zamanlı simülasyonlarla da değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, aynı seviyedeki üç rotanın tek noktada birleştirilmesinin hava sahası verimliliğini düşürdüğü hem hızlı zamanlı hem de gerçek zamanlı simülasyonlarla gösterilmiştir. Bu bağlamda, hava sahası tasarımında rotaların tek bir noktada birleştirilmesinden ziyade, mümkün olduğunca ikişerli gruplar halinde kesişmesinin daha yüksek bir sektör kapasitesi ve daha yönetilebilir bir hava sahası açısından önemli olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Hava trafik yönetimi, Kavşak yöntemi, Kesişen rotalar, Sektör kapasitesi, Simülasyon.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE EFFECTS OF ROUNDABOUT METHOD ON SECTOR CAPACITY AND ROUTE STRUCTURE

Mustafa ÖZDEMİR

Department of Air Traffic Control

Anadolu University, Graduate School of Sciences, December 2017

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Öznur USANMAZ

It is important to reduce the number of conflict points by designing the routes in appropriate configurations to provide efficient traffic flow in the airspace that constitutes a significant part of the air traffic system. Thus, congestion and delays can be minimized and the airspace capacity can be increased.

In this study, the routes constructed by roundabout method are evaluated using fast-time and real-time simulations considering different intersection angles. It is also aimed to provide safe separation between aircraft maintaining the same flight levels at the intersection points. The minimum intersection angle between routes is determined depending on the average delay time of the aircraft, and the effects of the routes with different network structures on sector capacity and delay time are examined through fast time simulations. Two scenarios selected according to fast time simulation results are also evaluated with real-time simulations in terms of the parameters such as the number of conflicts, the number of instructions given by the controllers, and the number of interfered aircraft.

As a result, both fast-time and real-time simulations have shown that combining three routes at the same level at a single point reduces airspace efficiency. Consequently, the intersection of routes in pairs rather than combining them at a single point is important to achieve a higher sector capacity and a more manageable airspace.

Keywords: Air traffic management, Roundabout method, Crossing routes, Sector capacity, Simulation.

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu tezin her aşamasında yardımcı olan, kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Öznur USANMAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca sayın Prof. Dr. Çerkez AĞAYEVA ve Yard. Doç. Dr. Özlem ŞAHİN'e değerli katkıları için teşekkür ederim.

Mustafa ÖZDEMİR

29/12/2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

.....
(İmza)

.....
(Adı-Soyadı)

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI.....	i
JURİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Kavşak Yöntemi.....	1
1.2. Simülasyonlar.....	6
1.2.1. Hızlı zamanlı simülasyonlar	7
1.2.2. Gerçek zamanlı simülasyon	9
2. MATERYAL VE YÖNTEM	12
2.1. Sektör Kapasitesinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	12
2.1.1. Kontrolör iş yükü bazlı yöntemler	13
2.1.2. Gecikme bazlı yöntemler	13
2.2. Rota Kesişim Açısının Hava Sahası Verimliliğine Etkisi.....	14
2.2.1. Kesişen rotalarda uçakların yanlamasına ayrılması	16
2.2.2. Optimum kesişim açısının belirlenmesi	20
2.3. Gecikme Süresi ve Sektör Kapasitesi.....	26
2.4. Simülasyon Modeli.....	26
2.4.1. Hızlı ve gerçek zamanlı simülasyonda kullanılacak girdilerin belirlenmesi.....	27
2.4.1.1. Uçak tipi ve kategorileri	27
2.4.1.2. Uçak hızları.....	29
2.4.1.3. Sektör boyutu ve rota uzunlukları	30
2.4.1.4. Ayırma minimumları.....	30
2.4.1.5. Uçuş seviyesi	31
2.4.2. Kabuller	32

	<u>Sayfa</u>
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
3.1. Hızlı Zamanlı Simülasyon Uygulaması.....	33
3.1.1. Kesişim açısının sektör kapasitesine etkisinin değerlendirilmesi	33
3.1.2. Tek sektör içinde kavşak yönteminin uygulanması.....	41
3.1.3. Kavşak yöntemi ile bir sektörün iki alt sektöre bölünmesi.....	52
3.2. Gerçek Zamanlı Simülasyon Uygulaması	58
3.2.1. Talimat sayıları	62
3.2.2. Rotasından çıkarılan uçak sayıları.....	64
3.2.3. Fazladan kat edilen mesafeler.....	66
3.2.4. Gözlenen çakışma sayısı	67
3.3. Hızlı ve Gerçek Zamanlı Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi	67
4. SONUÇ	70
KAYNAKÇA	73
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. 2014-2015 arasında Avrupa hava sahasında en çok kullanılan 50 uçak.....	27
Tablo 2.2. Simülasyonda kullanılan uçak tipleri ve kategorileri.....	29
Tablo 2.3. Uçak kategorilerine göre kullanılan uçuş hızları (kts).....	30
Tablo 3.1. Kesişim açısı (α), yatay ayırma noktasının kesişim noktasına olan uzaklığı (ℓ) ve çakışma bölgesinin alanı	34
Tablo 3.2. Farklı yoğunluktaki trafiklerin ortalama gecikme süreleri (dakika)	39
Tablo 3.3. Farklı açılar için SIMMOD’da oluşturulan senaryolar	42
Tablo 3.4. Kavşak yönteminin uygulanması sonucu kesişim açısı ve rota uzunluklarının değişimi	55
Tablo 3.5. Hızlı ve gerçek zamanlı simülasyon sonuçları.....	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. (a) Tek sektör içinde farklı yönlü rotalar, (b)iki farklı sektörde kavşaklar ile yapılandırılmış rotalar	2
Şekil 1.2. Aynı noktaya yaklaşmakta olan 8 uçak için çakışma çözümü	4
Şekil 1.3. Çakışma çözümlemeye başlanması gereken zaman ve kesişim açısı ilişkisi ..	5
Şekil 1.4. Kesişim açısına bağlı olarak çarpışma riskindeki değişim.....	6
Şekil 2.1. (a) Dar açıyla kesişen rotalar, (b) geniş açıyla kesişen rotalar	15
Şekil 2.2. (a) Optimum kesişim açısından daha küçük açıyla kesişen rotalar, (b) optimum kesişim açısından daha büyük açıyla kesişen rotalar	16
Şekil 2.3. Kesişen rotalarda yanlamasına ayırma noktaları.....	17
Şekil 2.4. Kesişen iki rota için çakışma bölgesi	18
Şekil 2.5. Çakışma bölgesine yaklaşmakta olan iki uçak	19
Şekil 2.6. Bir uçağın çakışma bölgesini terk etmesi halinde diğer uçağın çakışma bölgesine girişi	19
Şekil 2.7. Kesişen üç rota için çakışma bölgesi.....	21
Şekil 2.8. Kesişen iki rota için kesişim açısı ile çakışma bölgesinin değişimi	25
Şekil 2.9. Kesişen üç rota için çakışma bölgesi ($\alpha_1 = 20^\circ$)	26
Şekil 2.10. Yatayda (D_y) ve dikeyde (H_d) sağlanması gereken ayırmalar.....	31
Şekil 2.11. 2008-2015 yılları için uçuş seviyesi dağılımı.....	32
Şekil 3.1. Kesişim açısı ile çakışma bölgesinin değişimi	35
Şekil 3.2. Sektöre aynı anda giren iki uçak için SIMMOD ekran görüntüsü	36
Şekil 3.3. Aynı anda sektöre giren uçakların çakışma bölgesine aynı anda gelmesini temsil eden SIMMOD ekran görüntüsü.....	36
Şekil 3.4. 5 derecelik kesişim açısında trafik akışının SIMMOD ortamında gösterimi .	37
Şekil 3.5. 90 derecelik kesişim açısı için trafik akışının SIMMOD ortamında gösterimi	37
Şekil 3.6. Kesişim açısına bağlı ortalama gecikme süresi	38
Şekil 3.7. Kesişim açısı kapasite değişimi.....	39

Şekil 3.8. Farklı kesişim açılarında uçuş sıklığına bağlı ortalama gecikme sürelerindeki değişim	40
Şekil 3.9. (a) Model 1- aynı seviyedeki rotaların üç ayrı noktada kesişmesi, (b) model 2- aynı seviyedeki rotaların tek noktada kesişmesi	42
Şekil 3.10. Üç çakışma noktası bulunan tasarım	43
Şekil 3.11. Tek çakışma noktası olan tasarım.....	43
Şekil 3.12. a) Senaryo 1 için gecikme dağılımı ($\alpha= 15^\circ$), b) Senaryo 5 için gecikme dağılımı ($\alpha=15^\circ$).....	44
Şekil 3.13. a) Senaryo 4 için gecikme dağılımı ($\alpha= 60^\circ$), (b) senaryo 8 için gecikme dağılımı ($\alpha= 60^\circ$).....	45
Şekil 3.14. Toplam simülasyon süresi	46
Şekil 3.15. Kesişim açısına bağlı ortalama gecikme süresi	47
Şekil 3.16. Kesişim açısına bağlı kapasite karşılaştırması	48
Şekil 3.17. a) Senaryo 1 için sektör meşguliyeti, b) Senaryo 5 için sektör meşguliyeti	49
Şekil 3.18. a) Senaryo 4 için sektör meşguliyeti, b) Senaryo 8 için sektör meşguliyeti	50
Şekil 3.19. Tek noktada kesişen rotaların ikişerli olarak düzenlenmesi.....	51
Şekil 3.20. Model 3: FL360 ve FL 350'daki aynı yönlü rotalar.....	53
Şekil 3.21. Model 4: FL360 ve FL350'daki rotaların tek noktada birleştirilmesi	54
Şekil 3.22. Model 3 için (a) uçakların aynı anda sektöre girişi, (b) FL350 ve FL360'daki trafik akışı	55
Şekil 3.23. Model 4 için (a) uçakların aynı anda sektöre girişi, (b) FL350 ve FL360'daki trafik akışı	56
Şekil 3.24. Model 3 ve Model 4 için gecikme ve kapasite karşılaştırması.....	57
Şekil 3.25. Model 3 ve Model 4 için gecikmeli ve gecikmesiz uçuş süresi	58
Şekil 3.26. Model 1-trafik akışı	59
Şekil 3.27. Model 1-trafik akışı	59
Şekil 3.28. Gerçek zamanlı simülasyonda kullanılan (a) kontrolör pozisyonu, (b) sanal pilot pozisyonu	60
Şekil 3.29. Çakışma riskindeki uçakların gösterimi	61

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.30. Model 1-talimat sayıları	63
Şekil 3.31. Model 2-talimat sayıları	64
Şekil 3.32. Model 1 ve model 2 için talimat sayıları	65
Şekil 3.33. Rotasından çıkan uçak sayısının rotalara göre dağılımı	66
Şekil 3.34. Çalışmalara göre fazladan kat edilen mesafeler	67
Şekil 3.35. (a) Model 1 için çakışma sayıları, (b) model 2 için çakışma sayıları.....	67
Şekil 3.36. Hızlı zamanlı simülasyon sonuçları.....	69
Şekil 3.37. Gerçek zamanlı simülasyon sonuçları	69

1. GİRİŞ

Hava taşımacılığına olan talep dünya çapında hızla artmaya devam etmektedir. Artan bu talebi karşılayabilmek için mevcut kapasitenin de talebe paralel olarak artırılması beklenmektedir. Ancak, kapasiteyi sınırlayan bazı faktörler vardır. Genel anlamda hava trafik kapasitesini sınırlayan faktörler; havaalanı bazında öncelikle pist kapasitesi iken, hava sahası kapasitesi diğer bir sınırlayıcı faktördür. Hava sahası kapasitesini sınırlayan faktörlerin başında ise hava sahasındaki kısıtlamalar ve kontrolör iş yükü gelmektedir [1]. Hava sahasındaki kısıtlamalara örnek olarak hava sahasının yapısı ve boyutları, seyrüsefer amacıyla kullanılan cihazların güvenilirlikleri ve uçaklar arası uygulanması gereken ayırma minimaları gösterilebilir [2].

Kontrolör iş yükü; hava trafiğinin emniyetli bir şekilde idare edilebilmesi için kontrolörlerin üstlenmek zorunda oldukları fiziksel ve zihinsel işlerdir [3]. Kontrolör iş yükünün hava trafik yönetim kapasitesine etkisini azaltmak ve hava trafik hizmetlerinin (Air Traffic Service, ATS) daha etkin verilmesini sağlamak amacıyla, hava sahası alt bölümlere (sektörlere) ayrılabilir. Bu işleme sektörizasyon denir. Sektör ise içerisinde çok sayıda uçuş yolları, hava meydanları, seyrüsefer yardımcıları, irtifa sınırları olabilen coğrafi olarak tanımlanmış bir hava sahası parçası olarak ifade edilebilir [2].

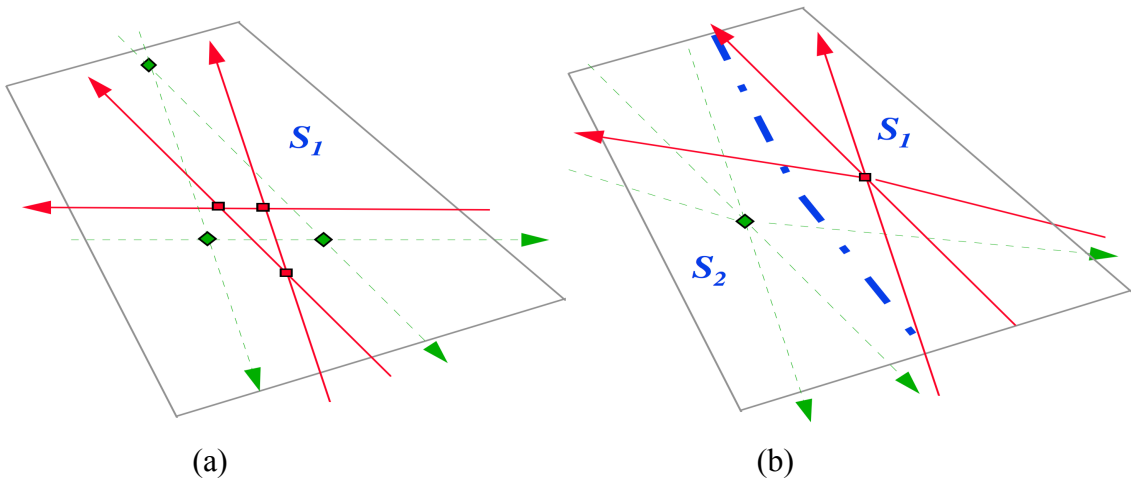
Bir sektörde ya da hava sahasında birbirine paralel ve/veya belirli bir açıyla kesişen birçok ATS yolu bulunabilir. ATS yolu; trafik akışının, hava trafik hizmet kurallarına uygun olarak sağlanması için tasarlanmış özel bir yoldur [4]. ATS yollarının hava sahasında oluşturduğu ağ yapısı sektörizasyon konusunda belirleyici olabilmektedir. Ağ yapısı ile sektörizasyon arasında iki yönlü bir ilişki vardır. Örneğin tek yönlü ATS yollarının kullanımı, sektör verimliliğini artırmak amacıyla göz önünde bulundurulmalıdır.

1.1. Kavşak Yöntemi

Aynı seviyedeki tek yönlü yolların (çift ve tek seviye) kendi aralarında gruplandırılarak iki farklı noktada birleştirilmesi ve böylece iki farklı sektör kurulması sağlanabilir. Bu yöntem EUROCONTROL tarafından “*Roundabout*” olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmada ise “*kavşak*” olarak ifade edilecek olan bu yöntemin amacı, aynı seviyedeki tek yönlü yolların gruplandırılmasını ve iş yükünün farklı sektörlerle paylaşımını sağlamaktır [5].

Aşağıdaki şekillerde kullanılan kırmızı çizgiler çift seviyedeki uçuş yollarını; yeşil çizgiler ise tek seviyedeki uçuş yollarını ifade etmektedir (Şekil 1.1a-1.1b). Direkt rotaların kullanıldığı Şekil 1.1a’da çift seviyeler için 3 ve tek seviyeler için 3 olmak üzere toplam 6 çakışma noktası (conflict points) vardır. Bu şekilde oluşturulan bir ağ yapısı karmaşıktır ve bölünemeyen bir sektör olduğu için aşırı yüklenmeler olabilir. Ayrıca, bu şekilde tasarım yapılması durumunda maksimum kapasitenin sınırlandırılması söz konusu olabilir.

Kavşaklar ile yapılandırılmış rotalarda ise geçiş noktalarının Şekil 1.1b’deki gibi konumlandırılması ile ilk sektörün (S_1), iki sektöre (S_1 ve S_2) ayrılmasına olanak tanımıştır. EUROCONTROL’ün “European Route Network Improvement Plan (ERNIP)- European Airspace Design Methodology Guidelines” adlı dokümanında Şekil 1.1b’deki gibi yapılan tasarımda maksimum kapasitenin artacağı ifade edilmektedir. Ancak bu artışa ilişkin sayısal bir veri verilmemektedir.



Şekil 1.1 (a) Tek sektör içinde farklı yönlü rotalar, (b) iki farklı sektörde kavşaklar ile yapılandırılmış rotalar [5]

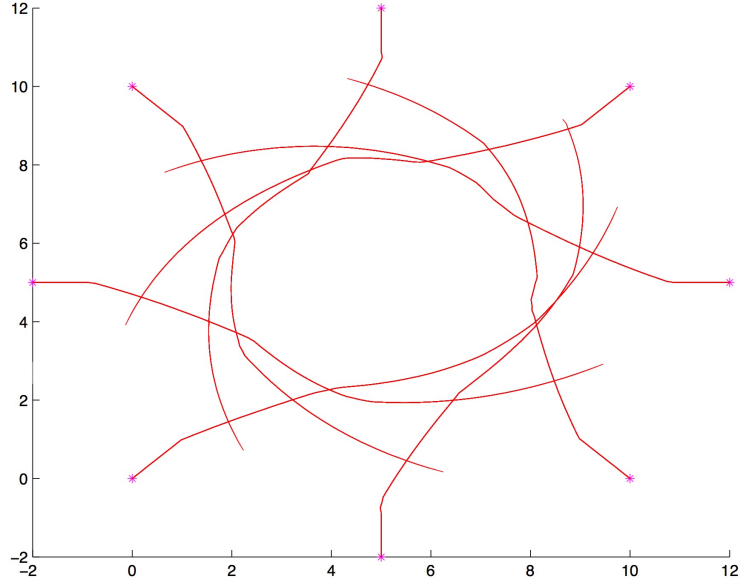
Kavşak yönteminin uygulanması, sektörlerin alt sektörlere ayrılmasına ve kontrolör iş yükünün farklı sektörlere yayılarak azaltılmasına olanak sağlamasının yanında çakışma noktalarının sayısını da azalttığı için sektör karmaşıklığını azalttığı söylenebilir.

Literatürde, kavşak yönteminin karayollarındaki uygulamalarıyla ilgili birçok çalışma vardır. Örneğin (Baric, Pilko ve Strujic, 2016) karayollarında optimum kavşak tasarımı için çok kriterli karar verme yöntemlerini kullanmışlardır [6]. (Hassannejad vd., 2015) ise araçların ön tarafına yerleştirilen bir kamera vasıtası ile hareketli nesneleri algılamak için geliştirdikleri algoritma ile kavşaktaki araçların çarpışmasını önlemeyi

amaçlamışlardır [7]. (Alkhaledi, 2015) ise karayollarında geleneksek döner kavşak yerine akıllı kavşak tasarımının kullanılmasının araçların bekleme zamanlarını, yakıt tüketimini ve karbondioksit emisyonunu azaltacağını ve yayaların kavşaktan daha güvenli geçebileceğini belirtmiştir [8]. (Chang, Ahn ve Hahn, 2013) kavşaktaki trafik yoğunluğunun araçların gecikme süresi üzerinde belirleyici olduğunu belirtmişlerdir. Trafik simülasyonu (VISSIM) kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada, şerit başına düşen araç sayısının 110'dan az ya da 400'den fazla olması durumunda kavşak yönteminin gecikme süresi üzerinde bir etkisi olmadığı, 160-180 arasında ise gecikmeyi büyük oranda azalttığı sonucuna varılmıştır [9]. Karayollarında kullanılan kavşak yöntemi ile bu çalışmada bahsedilen ve havayollarında uygulanan kavşak yönteminin, farklı yolların bir noktada birleşmesi ya da kesişmesi ve bunun sonucu olarak bu noktalarda tıkanıklıkların meydana gelmesi ve çarpışma riskinin daha fazla olması gibi ortak noktaları olduğu söylenebilir.

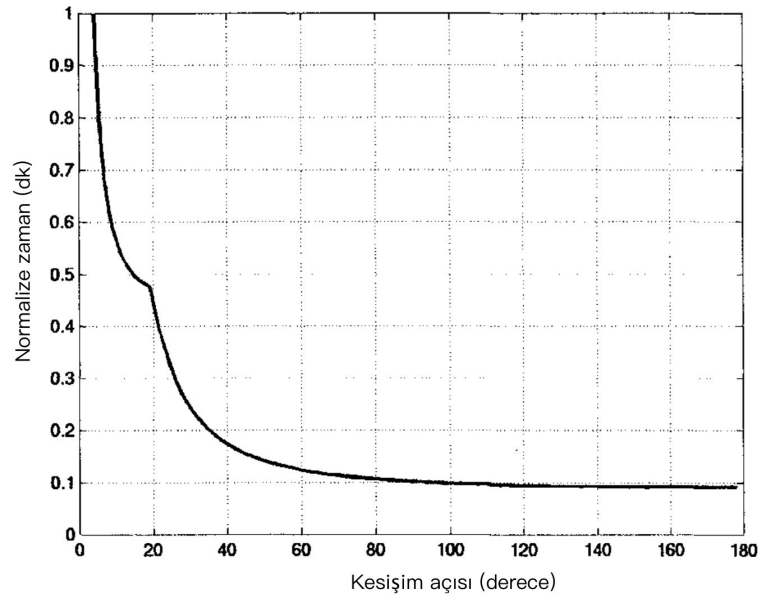
“*Roundabout*” terimi daha çok karayollarında kullanılan bir tabir olmakla birlikte bazı çalışmalarda çoklu kesişen rotalar için de bu ifadenin kullanıldığı görülmektedir [10-13]. Bu yöntemde karayollarında olduğu gibi bir dönüş manevrası söz konusu değildir, ancak kesişim noktalarındaki olası çakışmaları önlemek için bir dönüş manevrası gerekebilir. Bu gibi durumlarda, uçak, kontrolör tarafından yolundan çıkarılıp çakışma riski ortadan kalktıktan sonra tekrar kendi rotasına döndürülebilir.

(Ramamoorthy, Crassidis ve Singh, 2004) tarafından yapılan çalışmada, yerel yöringe planlayıcı olarak adlandırılan bir algoritma geliştirilmiştir. Ortak bir kurala dayalı olarak çalışan bu algoritmada potansiyel bir çakışma durumunda uçakların ne yapması gerektiği önceden tanımlıdır. Bu çalışmada tanımlanan ortak kural “herhangi bir engel ile karşılaşıldığında saat yönünün tersine dön” şeklindedir. Bu sayede hava sahasındaki belirsizliğin önüne geçilerek hava sahası karmaşıklığının azaltılabileceği belirtilmiştir. Şekil 1.2’de aynı noktaya uçmakta olan 8 uçak için kavşak yöntemi kullanılarak bir çözüm önerisi sunulmuştur. Seviye değişikliği yerine, her bir uçağın saat yönünün tersine dönüş manevrası yaparak çakışmadan kaçınmasının mümkün olabileceği belirtilmiştir [14]. Bu çalışmada, karayollarında uygulanan döner kavşak benzeri bir öneri sunulmuştur.



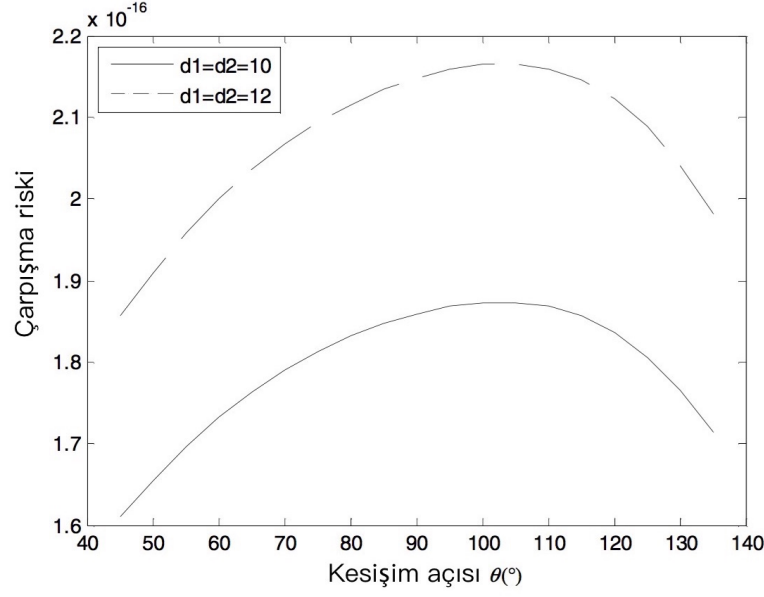
Şekil 1.2 Aynı noktaya yaklaşmakta olan 8 uçak için çakışma çözümü [14]

(Chatterji ve Sridhar, 2001) kontrolör iş yükü üzerine yaptıkları çalışmada, sektör karmaşıklığının iş yükünü artırdığını ve kesişen rota sayısının da sektör karmaşıklığı üzerine önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Küçük açıyla birleşen rotaların karmaşıklık düzeyi daha fazla iken, karmaşıklık düzeyinin en az olduğu kesişim açısının 90 derece olduğu belirtilmiştir. Küçük kesişim açısıyla kesişen rotalarda uçakların çakışma tespiti zorlaşır, fakat çözümlemesi kolaydır. Çünkü kontrolörün çakışmayı çözümlemek için daha fazla zamanı vardır. Diğer taraftan kafa kafaya gelen uçakların çakışma tespiti kolay, ancak çakışma çözümlemesi zordur. Ayrıca, iki uçağın da kesişim noktasına eşit uzaklıkta olduğu ve her iki uçağında çakışmadan kaçınmak için manevra yaptığı varsayılırsa, dar kesişim açısı ile kesişen rotalarda çakışma çözümlemenin daha geniş açıyla kesişen rotalara göre daha erken başlamak zorunda olduğu belirtilmiştir. Şekil 1.3’de çakışma çözümleme işleminin başlaması gereken zamanın rota kesişim açısına göre değişimi verilmiştir. Bu şekil en hızlı gerçekleştirilebilecek çakışma çözümleme manevrası için verilmiştir. 19 dereceden daha küçük kesişim açılarında en hızlı çözümleme manevrası hız değişimi iken 19 derecenin üstünde seviye değişimi olduğu belirtilmiştir [15].



Şekil 1.3 Çarpışma çözümlemeye başlanması gereken zaman ve kesişim açısı ilişkisi [15]

(Yuling vd., 2015) tarafından kesişen iki rota için ayırma minimaları, uçak hızları, uçak tipleri, Gerekli Seyrüsefer Performansı (Required Navigation Performance, RNP) değeri, tırmanma ve alçalma oranları gibi uçuş rotası planlama parametrelerine dayalı çarpışma risk modeli oluşturulmuştur. RNP 1 için yapılan çalışma sonucunda dikey ayırma miniması çarpışma riskini en çok etkileyen faktör olduğu sonucuna varılmıştır [16]. Şekil 1.4'te farklı kesişim açısına ve rapor noktasından kesişim noktasına olan uzaklığa (d_1 ve d_2) bağlı olarak saatlik ortalama çarpışma risk sayısı gösterilmiştir. Şekilde yaklaşık 100 derecelik kesişim açısında çarpışma riskinin en yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 1.4 Kesişim açısına bağlı olarak çarpışma riskindeki değişim [16]

(Özdemir ve Usanmaz, 2017) aynı seviyede iki farklı konfigürasyonda kesişen rotaları farklı kesişim açıları için hızlı zamanlı simülasyonlarla incelemişlerdir. Çalışmada, aynı noktada üç rotanın kesişmesinin, farklı noktalarda ikişerli olarak kesişmelerine göre, sektör kapasitesini düşürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca, rotalar arası kesişim açısının artmasıyla kapasite artış oranının azaldığı vurgulanmıştır [17].

Literatürdeki çalışmaların daha çok kesişen rotalardaki çarpışma riskinin azaltılması ve uygun çözüm yöntemlerinin geliştirilmesi üzerine olduğu görülmüştür. Literatürden farklı olarak bu çalışmada farklı konfigürasyonlarda kesişen rotaların hava sahası verimliliğine etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, kavşak yönteminin sektör kapasitesine, uçakların ortalama gecikme sürelerine ve kontrolör performanslarına etkisi hızlı ve gerçek zamanlı simülasyonlarla incelenmiştir.

1.2. Simülasyonlar

Karmaşık gerçek dünya davranışlarını incelemek için kullanılan simülasyonlardan özellikle hava trafik kontrol ile ilgili çalışmalarda faydalanılmaktadır. Hava trafikte kullanılan simülasyonlar gerçek zamanlı ve hızlı zamanlı simülasyonlar olarak sınıflandırılabilir.

Hızlı zamanlı simülasyonlardan sektör kapasitesinin belirlenmesinde büyük ölçüde faydalanılmaktadır. Bu simülasyonlardan bazıları kontrolör iş yükü bazlı iken (RAMS gibi), bazıları ise gecikme süresini (SIMMOD gibi) hesaba katmaktadır. Fakat, RAMS

gibi hızlı zamanlı simülasyonlar her ne kadar kontrolör iş yükünü etkileyen faktörleri (çakışma nokta sayısı, uçak sayısı, seviye, baş, hız değişimi gibi) de simülasyona dahil etse de insan faktörlerini (kontrolör davranışları, bireysel farklılıklar ve çevresel faktörlerin etkisi gibi) değerlendirmede yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden, insan faktörlerinin de etkisini ölçmek için genellikle hızlı zamanlı simülasyonlardan sonra gerçek zamanlı simülasyonlar da kullanılmaktadır.

Ayrıca, gerçek ve hızlı zamanlı simülasyonlar birlikte kullanılarak daha etkili sonuçlar elde etmek mümkün olabilir. Gerçek zamanlı simülasyonlarda senaryo oluşturulmasında hızlı zaman simülasyonunun verileri kullanılabilirken hızlı zamanlı simülasyon modellerinin geçerliliği gerçek zamanlı simülasyonlarla test edilebilir [18].

1.2.1. Hızlı zamanlı simülasyonlar

Hava trafik kontrol operasyonları birbirinden bağımsız birçok değişkeni ve belirsizliği içerdiği için hızlı zamanlı simülasyonlar bu faktörlerin incelenmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır.

Hızlı zamanlı simülasyon teknikleri hava trafik hizmet sağlayıcıları tarafından özellikle havaalanı ve hava sahası kapasitesini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Hızlı zamanlı simülasyonlar, faktörlerin incelenmesini kolaylaştırarak kapasite tahmini için büyük bir esneklik sağlar ve birçok farklı senaryoyu kısa bir süre içerisinde test etme olanağı verir [19].

Günümüzde hava trafik sisteminin sadece havaalanı ya da hava sahası kısmını modellemeye yönelik geliştirilen simülasyonların yanı sıra hava trafik sisteminin tamamını modellemeye dönük simülasyon araçları da mevcuttur. Sayısal olarak birçok hızlı zamanlı simülasyon aracı bulunmakla birlikte, yaygın olarak kullanılanlardan bazıları, SIMMOD (The Airport and Airspace Delay and Consumption Simulation Model), TAAM (Total Airspace Airport Modeller), RAMS (Reorganized ATC Mathematical Simulator), AirTOP (Air Traffic Optimization) ve CAST (Comprehensive Airport Simulation Tool) olarak sıralanabilir. SIMMOD, TAAM, RAMS ve AirTOP simülasyon araçlarının hava trafik sisteminin neredeyse tamamını modellemeye yönelik olduğu söylenebilir. CAST ise sadece havaalanı, terminal binası ve yolcu davranışlarının modellenmesine yöneliktir [20].

SIMMOD, FAA tarafından geliştirilen ayırık zamanlı bir simülasyon modelidir. Bu model ile pist, taksi yolları ve park pozisyonları dahil olmak üzere bir hava alanı, ilgili

terminal hava sahası ya da bölgesel bir hava sahası ayrıntılı olarak modellenenebilir. SIMMOD'un modelleme prensibi, hava alanı ve hava sahası elemanlarının düğüm (node) ve bağlantı (link) kullanılarak temsil edilmesine dayanır. Uçaklar, bağlantı boyunca düğümünden düğüme geçerler ve birden fazla uçak tek bir düğüme geçmeye çalıştıklarında çakışma meydana gelir. Bu çakışmalar bir veya daha fazla uçağın bir düğüme bekletilmesiyle çözülür. SIMMOD, her bir uçağın her bir düğüme meydana gelen gecikme miktarını kaydederek, gecikme istatistiklerini derlemektedir. Modelin başlıca çıktıları, uçak seyahat süresi, birim zamanda trafik akışı ve kapasite, gecikmeler ve yakıt tüketimidir [21, 22].

SIMMOD, çakışmaları önlemek ve uçaklar arası gerekli ayırmaları sağlamak için uçakların hızını azaltıp artırabilir, uçakları rotasından çıkarabilir ya da belli bir noktada bekletebilir. Oluşturulan modeller ve trafik akışı SIMMOD'un animatör aracından izlenebilir. Bu araçta, uçaklara hangi müdahalelerin yapıldığı görülebilir [23].

TAAM modeli ise The Preston Group tarafından Avustralya Sivil Havacılık Otoritesi ile birlikte geliştirilmiş olup tüm hava trafik sisteminin detaylı bir şekilde modellenmesine imkân sağlar. Ayrıca, üç boyutlu bir simülasyon modeli olan TAAM, havaalanı kapasite tahmini, havaalanı iyileştirme planlaması, gürültü etkisi, şiddetli hava etkisi, terminal hava sahası ve sektör tasarımı, kontrolör iş yükü değerlendirmesi, yeni hava trafik kontrol (HTK) kurallarının etkisi, sistem genelinde gecikmeler ve maliyet yararları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [24, 25].

RAMS, ISA Software tarafından geliştirilen ve kalkıştan başlayıp inişe kadar olan tüm uçuş safhasının modellenenebildiği bir simülasyon aracıdır. Hava sahası operasyonları ile pist etkileşimleri (paralel veya kesişen pist uygulamaları gibi) de modellenenebilir. RAMS, bir hava trafik kontrol sisteminin geliştirilmesi, simülasyonu ve analizi konusunda çakışma algılama ve çözümleme mekanizmaları, iş yükü modelleri ve modern kullanıcı ara yüzü gibi birçok gelişmiş özelliklere sahip entegre bir çalışma ortamı sunmaktadır. Ayrıca, farklı hava koşullarının ve hava sahasındaki yasak bölgelerin etkilerinin de ölçülebilmesi hava trafik kontrol kavramlarının geniş bir yelpazede incelenmesine olanak tanır. RAMS ile uçuş profillerinin ve sektörlerin 3 boyutlu olarak görselleştirilmesi de mümkündür [21].

AirTOP modeli AirTOP Soft firması tarafından geliştirilen yeni nesil bir simülasyon aracıdır. Bu model kalkış, saha, yaklaşma operasyonlarının ve anlaşma mektuplarının yanı sıra havaalanı yer hareketlerinin, yolcu davranışlarının ve tüm

terminal süreçlerinin modellenenebilmesine olanak tanır. Çakışma algılama ve çözümleme çalışmaları çeşitli teknikler kullanılarak ve kullanıcı tarafından düzenlenerek modellenenebilir. AirTOP ile kapasite, iş yükü, gecikme, ekonomik ve çevresel etkilerin incelenebilmesinin yanında sektörizasyon, rotaların yeniden düzenlenmesi, serbest rota (free-route) gibi çalışmalar da yapılabilir [26-28].

CAST ise Airport Research Center (ARC) tarafından geliştirilen 3 boyutlu hızlı zamanlı simülasyon modelidir. Bu model ile havaalanı ve havaalanı çevresindeki uçak hareketleri, kargo ve bagaj taşımacılığı, yakıt ikmali ve temizlik gibi işlemlerin yanı sıra terminal binası içerisinde bilet kontrol işlemleri, güvenlik, bekleme kapıları, bagaj ve gümrük işlemleri gibi yolcu hareketleri de modellenenebilir [29, 30].

1.2.2. Gerçek zamanlı simülasyon

Gerçek zamanlı simülasyonlar, gerçek hayata uygulanması emniyet ve finansal nedenlerle zor olan durumları, yeterli ölçüde gerçeklik kazandırarak benzetim imkânı sağlamaktadır [31]. Tek başına uçak sayısı kontrolör iş yükünü ifade etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu yüzden kontrolör iş yükünü ifade etmek için, trafik sayısına ek olarak sektörün ve uçuş yollarının yapısı, trafiğin durumu ve insan faktörleri gibi diğer faktörlerin de göz önünde bulundurulması gerekebilir.

Hava trafik kontrolde gerçek zamanlı simülasyonlar, gerçekçi bir ortamda yeni araçların gösterimi/kanıtlanması, insan makine etkileşiminin geliştirilebilmesi için insan faktörü araştırılması ve hava trafik kontrolörlerinin yeni sistemlerde ve prosedürlerde kabiliyetlerinin artırılmasına olanak tanımaktadır. Gerçek zamanlı simülasyonlar, daha gerçekçi ve detaylı bir çalışma ortamı sunması yönüyle hızlı zamanlı simülasyonlardan ayrılmaktadır. Ayrıca hızlı zamanlı simülasyonlar, kontrolör muhakeme ve düşüncesi gibi insan faktörlerinin hesaba katılmasında yetersiz kalabilmektedir. Bu yüzden genellikle hızlı zamanlı simülasyonlardan sonra gerçek zamanlı simülasyonlar da kullanılır [19, 32, 33].

Faklı firmalar tarafından üretilen çeşitli gerçek zamanlı simülatörler mevcuttur. Bunlara LETVIS, HIFI SIMU, X-AVION, CASS, ATCOACH ve BEST simülatörleri örnek olarak gösterilebilir. Bu çalışmada, Micro Nav firması tarafından üretilen BEST (Beginning to End for Simulation and Training) simülatörü kullanılmıştır.

Bu simülatörde eğitimci, sanal pilot ve kontrolör pozisyonları mevcut olup bu pozisyonların kendi aralarında değiştirilmesi mümkündür. Ayrıca simülasyon

sonuçlarının kaydedilmesi ve ölçülmesi imkânı da vardır. Simülatörün, mevcut sisteme entegre olarak telsiz ve telefon bağlantısına olanak tanıyan ve bu özelliklerin dokunmatik ekran ile yönetilmesini sağlayan sesli iletişim sistemi bulunmaktadır. Ayrıca ses kaydetme ve geriye oynatma özellikleri de mevcuttur. Bu simülatör, uçak performanslarını, hava durumunu, seyrüsefer yardımcılarını ve çevreyi gerçekçi bir şekilde simülasyon ortamına aktarabilmektedir [34, 35]. Simülatörde yeni bir hava sahası tasarlanması ya da mevcut hava sahasında değişiklik yapılması mümkündür. Ayrıca farklı performanstaki uçakların simülasyona dahil edilmesiyle daha gerçekçi çalışmalar yapılabilir. Kısa vadeli çakışma alarm (Short Term Conflict Alert) mesafesi kullanıcı isteği doğrultusunda değiştirilebilir [36].

Bu çalışmada, kavşak yönteminin modellenmesinde SIMMOD (The Airport and Airspace Delay and Consumption Simulation Model) hızlı zamanlı simülasyon modeli ve Anadolu Üniversitesi Hava Trafik Kontrol bölümünde bulunan BEST gerçek zamanlı simülatörü kullanılmıştır. Literatüre bakıldığında SIMMOD'un kapasite, gecikme ve tıkanıklık analizi ile havaalanı altyapı değişikliklerinin incelenmesinde sıkça kullanıldığı görülmektedir. (Li vd., 2015) yakın paralel pistlerin farklı kullanım şekillerini simülasyon ortamında modelleyerek bu konfigürasyonların kapasite ve operasyonel verimliliklerini değerlendirmişlerdir [37]. (Simic ve Babic, 2015) farklı konfigürasyonlardaki havaalanı yerleşim planlarının, farklı trafik taleplerinin ve HTK uygulamalarının havaalanı sisteminin performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir [38]. (Peng, Gao ve Sun, 2013) tarafından yapılan çalışmada, paralel pist operasyonları için geliş ve kalkış prosedürleri tasarlanmış ve oluşturulan model ARENA ve SIMMOD ile karşılaştırılmalı olarak test edilmiştir [39]. (Bubalo ve Daduna, 2011) trafik sayısı ve çeşitliliğini değiştirerek bağımsız paralel pist operasyonlarını incelemişlerdir [40]. (Lee ve Balakrishnan, 2012) SIMMOD kullanarak havaalanlarındaki belirsizliklerin havaalanı performansına etkisini incelemiştir [41]. (Wei ve Siyuan, 2010) ise SIMMOD kullanarak yakın paralel pist operasyonları için en uygun konfigürasyonu, seyahat süresi, gecikme miktarı, kalkış kuyruğunda bekleme süresi gibi parametrelere bağlı olarak araştırmışlardır [42]. (Wang, Zhang ve Xu, 2008) Gaoqi havalimanı için geliş ve kalkış uçaklarının ortalama gecikmelerini belirlemişler ve gecikme ile kapasite arasındaki ilişkiyi belirlemek için istatistiksel analiz kullanmışlardır [43]. Hava trafik sistemindeki gecikmeler, hava sahasında ve hava alanlarında tıkanıklıklara sebep olmasının yanında ekonomik ve çevresel açıdan da birçok dezavantajı beraberinde getirmektedir. (Forbes,

2008) uçuş gecikmelerinin havayolları fiyatlarına etkisini incelediği çalışmada, özellikle rekabet ortamının yüksek olduğu bölgelerde gecikmelerin havayolları bilet fiyatlarını düşürdüğünü belirtmiştir [44]. (Müller ve Santana, 2008) ise hava alanında yaşanan tıkanıklık ve gecikmelerin ekonomik etkilerini incelemiştir [45]. (Gao vd., 2008) ise birbirine yakın sivil ve askeri havaalanlarından oluşan toplam on havaalanı arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan tıkanıklıkları ve gecikmeleri uçuş planlarını optimize ederek azaltmayı amaçlamıştır [46].

(Cetek vd., 2014) İstanbul Atatürk Havalimanı'nda tıkanıklık yaşanan bölgeleri belirlemek ve uygun çözüm önerileri sunmak için hem hızlı zamanlı hem de gerçek zamanlı simülasyonlardan faydalanmışlardır. Öncelikle 3 alternatif model SIMMOD ile incelenmiş ve en iyi sonucu veren model insan davranışlarının etkisini de değerlendirmeye katmak için BEST gerçek zamanlı simülasyon ortamında test edilmiştir. Sonuç olarak, gerçek zamanlı simülasyonlarda kontrolörlerin taktiksel müdahaleleri ve insan faktörü nedeniyle hızlı zamanlı simülasyon sonuçlarına göre bazı farklılıkların ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu nedenle, kritik durumlarda hızlı zamanlı simülasyon sonuçlarının gerçek zamanlı simülasyonlarda da test edilmesi gerekebileceği ifade edilmiştir [19].

Gerçek zamanlı simülasyonların akademik çalışmalar için kullanım sıklığı maliyet, uygulama ve kullanım zorluğu, geniş kurulum alanı ve sistemi kullanabilecek uzman ekip gerektirmesi gibi nedenlerle hızlı zamanlı simülasyonlara göre sınırlıdır. Ancak, hava trafik sistemi içerisindeki bir değişikliğin veya yeni bir altyapı ilavesinin operasyonel faaliyete geçmeden önce gerçek zamanlı simülasyonlarla test edilmesi emniyet ve etkinlik açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışma kapsamında simülasyonlar ile kavşak yönteminde kullanılan rota kesişim açılarının ve farklı konfigürasyonlardaki rota tasarımlarının da sektör kapasitesine etkisi belirlenecektir.

Hava sahası tasarımında kavşak yönteminin kullanılmasıyla; karmaşık yol yapılarının sadeleştirilmesi, sektör karmaşıklığının ve kontrolör iş yükünün azalması ve sektör kapasitesinin artması sonucu uçuş operasyonlarının daha etkin ve verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Ayrıca bu çalışmanın hava sahası ve yol ağı planlamasına katkı sağlaması beklenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Sektör kapasitesi, belirli bir zaman diliminde belirli bir HTK sektörüne giren ve uluslararası kurallara göre emniyetli bir şekilde yönetilebilecek, yönlendirilebilecek ya da hizmet verilebilecek maksimum uçak sayısıdır [1, 3].

Bu çalışmada ATS yol yapılarındaki iyileşme önerileri ile hizmet verilecek uçak sayısındaki artış dolayısıyla sektör kapasitesinde artış hedeflendiği için öncelikle sektör kapasitesini belirlemede kullanılan yöntemler açıklanacaktır. Sektör kapasitesinin hesaplanmasında kullanılan yöntemler, havacılıkta kullanılan başlıca simülasyon modelleri ve kavşak yöntemi tanıtılacaktır. Ayrıca, rota tasarımında kesişim açısının önemi, optimum kesişim açısı, kesişen rotalarda uçakların yanlamasına ayrılması konuları ayrıntıları ile verilecektir.

2.1. Sektör Kapasitesinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Mevcut hava trafik sisteminde sektör kapasitesi genel olarak ortalama uçuş süresine [47], sektör karmaşıklığına ve kontrolör iş yüküne bağlıdır. Sektör karmaşıklığı ve kontrolör iş yükü ise uçak trafiğine ve sektörün durumuna bağlıdır. Trafiğe bağlı faktörler, sektördeki toplam uçak sayısı, uçak tipleri ve performans karakteristikleri, trafik çeşitliliği (performans-kategori gibi farklı özelliklerdeki uçakların bir arada bulunması), tırmanan/alçalan uçak sayısı, uçak hızları, yatay ve dikey ayırma standartları, uçaklar arası minimum mesafe, uçuş yönü, potansiyel çakışma sayısı, seviye, baş, hız değişiklikleridir. Sektöre bağlı faktörler ise sektör boyutu ve şekli, sektör sınırlarının konumu, sektördeki uçuş seviyesi sayısı, sektöre giriş-çıkış noktalarının sayısı, uçuş yollarının konfigürasyonu, tek yönlü yolların miktarı, otomasyon düzeyi ve rüzgar olarak sıralanabilir [1, 5, 32, 48, 49].

EUROCONTROL' ün "European Route Network Improvement Plan (ERNIP)-European Airspace Design Methodology Guidelines" adlı raporunda, yeni rota tasarımı veya mevcut rotaların yeniden düzenlenmesinde sektör karmaşıklığını azaltarak kapasitenin artırılmasını sağlamak amacıyla çok sayıda kesişen rota tasarımından kaçınılması gerektiği belirtilmiştir. Çünkü özellikle hava trafiğinin yoğun olduğu bölgelerde çok sayıda kesişen rotanın sektör kapasitesini düşürdüğü görülmüştür. Ayrıca, daha yüksek saha kontrol sektör kapasitesine ulaşmak için özellikle tırmanan ve/veya alçalan trafiklerin karşılıklı etkileşiminin olduğu alanlarda, tek yönlü yolların kullanımı yaygınlaştırılması gerektiği belirtilmiştir [5].

Hava trafik kontrol hizmeti sağlanan uçak miktarı, mevcut koşullar altında hava trafik kontrol biriminin idare edebileceği uçak sayısını geçmemelidir. Hava alanları ve hava sahasındaki sektörler için emniyetli bir şekilde hizmet verilebilecek maksimum uçak sayısını (kapasite) belirlemek ve ilan etmek hava trafik hizmet sağlayıcılarının sorumluluğundadır [49].

2.1.1. Kontrolör iş yükü bazı yöntemler

Hava sahası kapasitesi mekânsal ve geometrik kısıtlamalar göz önüne alınarak hesaplanabilir. Ancak, hava trafiği arttıkça, kontrolör iş yükü hava sahası kapasitesi için birincil belirleyici faktör olmuştur.

Almanya hava trafik hizmet sağlayıcısı (DFS), hava sahası kapasitesini hesaplamak için, saatteki uçak sayısı, sektör başına ortalama uçuş süresi, potansiyel çakışma sayısı, koordinasyon (koordinasyon birimlerinin sayısı ve kalitesi), seviye değişikliği sayısı gibi iş yüküne etki eden faktörleri göz önünde bulunduran bir formül geliştirmiştir.

Trafik miktarının artması emniyet önlemlerinin başarısız olmasına sebep olabilir. Bu yüzden bazı ülkeler sektör kapasitesini belirlemek amacıyla kontrolör iş yükü için bir eşik değer belirlemiştir. Örneğin, İtalya’da kontrolörler için %70 (yani bir saatlik zaman diliminde bir kontrolör en fazla 42 dakika meşgul olabilir) iş yükü sınırı uygulanmaktadır.

Portekiz hava trafik hizmet sağlayıcısı (NAV Portugal), sektör kapasitesini belirlemek için kontrolör iş yüküne ek olarak trafik karmaşıklığını göz önünde bulundurmaktadır [3].

2.1.2. Gecikme bazı yöntemler

Sektör kapasitesinin hesaplanmasında kullanılan diğer bir yaklaşım ise uçakların ortalama gecikme süresini baz alan ve buna bağlı olarak sektör kapasitesinin hesaplanmasına olanak veren simülasyon modelleridir.

Havaalanları bakımından, tek bir uçuş operasyonu için uçuş yoğunluğuna bağlı ortalama gecikme süresi önemli bir parametredir. HTK sektör kapasitesi açısından bakılacak olursa, trafik sayısındaki bir artış ortalama gecikme süresini de artırır. Bu yüzden ortalama gecikmenin izin verilen bir değeri aşmaması için trafik sayısına bir sınır belirlenebilir. Bu sınırlama aynı zamanda emniyetin arttırılmasına da katkı sağlayacaktır. Çünkü, çok yüksek ortalama gecikme süreleri, bazı uçakların havada çok fazla kalması

anlamına gelebilir. Bir uçağın uzun süre havada kalması uçağın yakıt kritiğine girmesine neden olabileceğinden emniyeti etkileyebilir [44].

Sektör kapasitesinin hesaplanmasında tek başına ortalama gecikme süresi yeterli olmayabilir. Çünkü kontrolör iş yükü ve insan faktörleri de sektör kapasitesini belirleyen önemli faktörlerdir [32]. Ancak ilk etapta kontrolör iş yükü ve insan faktörleri göz ardı edilerek sektör kapasitesi hesaplanıp ardından bu faktörleri de göz önünde bulunduran simülasyonlar kullanılabilir.

Örneğin, Japonya’da sektör kapasitesi hesaplanmasında TAAM ve SIMMOD simülasyonları kullanılmaktadır. Fakat bahsedilen hızlı zamanlı simülasyonlarda kontrolör iş yükü ilk etapta değerlendirmeye katılmaz. Kontrolör iş yükü sadece hızlı zamanlı simülasyonlardan sonra uygulanan gerçek zamanlı simülasyonlarda değerlendirilir [1].

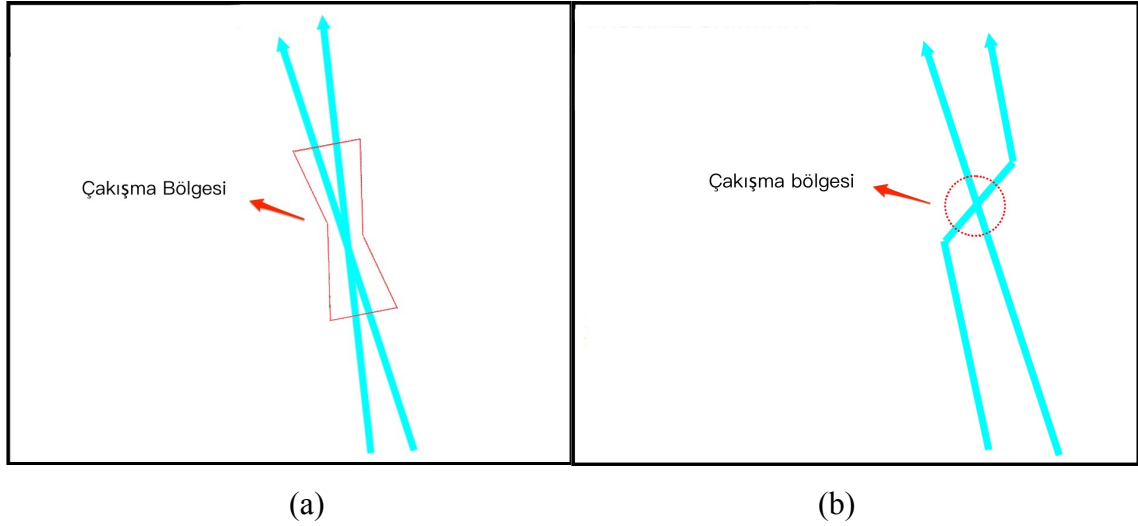
Kontrolör iş yükünün ve sektör karmaşıklığının, sektör kapasitesinde belirleyici bir faktör olduğu göz ardı edilemez. Ancak, kontrolör iş yükünün artması, gecikme süresini de artıracığı için gecikme süresi kontrolör iş yükünden bağımsız bir faktör olarak düşünülemez.

2.2. Rota Kesişim Açısının Hava Sahası Verimliliğine Etkisi

Hava sahasında, artan trafik talebine cevap verebilecek ve mümkün olduğunca kesişme noktalarını en aza indirgeyebilecek emniyetli rotalar tasarlanması önemlidir. Bununla birlikte, günümüzün yoğun hava trafik koşullarında, kesişen rotaları hava sahasından tamamen kaldırmak mümkün değildir. Bu nedenle, verimli bir trafik akışı sağlamak için, kesişen rotaların ve özellikle kesişim açılarının uygun bir konfigürasyonda tasarlanması önem arz etmektedir [50].

Hava sahası yol yapısındaki çakışma noktalarının sayısının yanı sıra, çakışma bölgesinin boyutları da hava sahası kapasitesini etkileyen faktörler arasındadır. Çakışma bölgesi, kesişen rotalarda uçakların aynı anda bulunmaması gereken bölgedir (Şekil 2.1a-2.1b). Uçakların emniyetli ve kolay bir şekilde yatay ayırmalarının sağlanabilmesi için ATS yolları arasındaki çakışma bölgesi en azda tutulmalıdır. Bu çakışma bölgesinin boyutları, rota kesişim açısına bağlı olarak değişmektedir. Kesişim açısı, birbirine yaklaşan rota çiftleri arasında oluşturulmuş dar açı olarak adlandırılır [15]. Kesişen iki rotanın çakışma bölgesini minimize eden optimum bir kesişim açısı vardır. Kesişen iki rota için optimum kesişim açısı 90 derece olup bununla ilgili çalışmalar mevcuttur [51-

53]. Bu yüzden uçuş yolları mümkün olduğunca dik açıda kesişmelidir. Şekil 2.1a'daki gibi bir uygulamada, ayırmanın sağlanmadığı alanda (kırmızı çizgiyle belirtilmiş alanlar), iki rota tek bir rotaymış gibi düşünülür. Uzunlamasına ayırmanın sağlanmadığı durumlarda dikey ayırma uygulanmalıdır. Şekil 2.1b'de ise çarpışma riski, uzunlamasına ayırmaya gerek duyulmadan kolaylıkla çözülebilir [5].

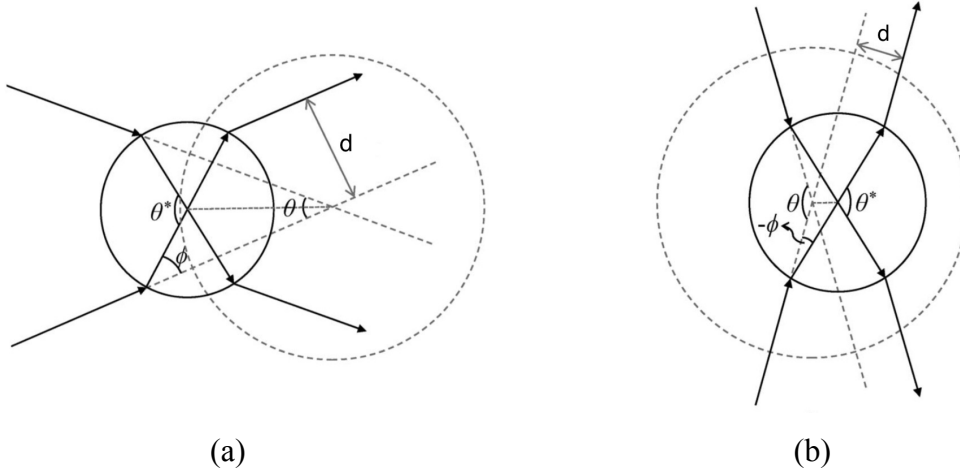


Şekil 2.1 (a) Dar açıyla kesişen rotalar, (b) geniş açıyla kesişen rotalar [5]

Şekil 2.1a ve Şekil 2.1b'ye bakarak, her iki durum karşılaştırıldığında iki rota kesişim açısının daha küçük olduğu birinci şekilde ayırmanın sağlanmadığı alan (çakışma bölgesi) daha büyük iken rota kesişim açısının daha dik açıyla olduğu ikinci şekilde ayırmanın sağlanmadığı alan daha küçüktür. Dolayısıyla ikinci durumda, uçaklar arası emniyetli ayırma sağlanırken hava sahasının daha verimli kullanıldığı söylenebilir.

(Huang vd., 2014) çakışma bölgesini, merkezi rotaların kesişim noktası olan ve kesişim noktasına yaklaşan uçakların çakışmasını bu bölge içerisinde çözümlenmesine olanak sağlayan (çakışma noktasının etrafından dolaşmaksızın) minimum çembersel bölge olarak tanımlamışlardır. Optimum kesişim açısı ise, en küçük çakışma bölgesini veren açıdır. Rotaların kesişim açılarının optimumda tutulmasının, çakışma bölgesinin alanını azaltacağını, hava sahası kapasitesini artıracak ve böylece daha verimli bir hava sahası tasarımının mümkün olacağını belirtmişlerdir [51]. Şekil 2.2'de optimum kesişim açısından daha küçük ve daha büyük bir açıda (θ) kesişen iki rotanın, optimum kesişim açısı (θ^*) kullanılarak yeniden düzenlenmesi gösterilmiştir. Optimum kesişim açısının

kullanılması sonucu çakışma bölgesinin (kesikli çizgiyle gösterilen çember) alanında azalma olduğu görülmüştür.



Şekil 2.2 (a) Optimum kesişim açısından daha küçük açıyla kesişen rotalar, (b) optimum kesişim açısından daha büyük açıyla kesişen rotalar [51]

Rotaların optimum kesişim açısında birleştirilmesinin, uçakların daha fazla manevra yapmasına ve dolayısıyla uçuş süresinin, kullanılan yakıtın ve uçuş maliyetinin artmasına sebep olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Fakat, fazladan manevralar ve operasyonel maliyet karşılığında, çakışma bölgesinin azaltılması, daha verimli bir hava sahası tasarımına olanak tanır. Bunun sonucu olarak hava sahası kapasitesinin artması ve yoğun trafiklerde emniyetli operasyonlar gerçekleştirilmesi mümkün hale gelebilir. Diğer taraftan, yoğun olmayan trafiklerde bu gibi rota düzenlemeleri gereksiz yörünge değişimine sebep olabilir. Bu yüzden, trafik yoğunluğu az olan bölgelerde bu gibi rota değişimleri tavsiye edilmemektedir [51].

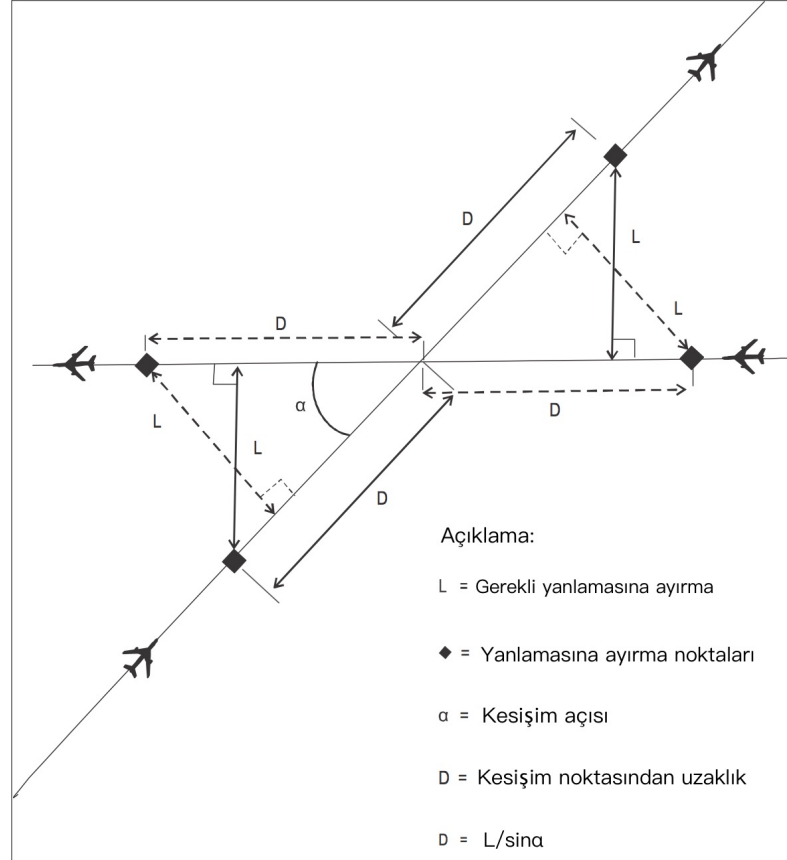
2.2.1. Kesişen rotalarda uçakların yanlamasına ayrılması

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (International Civil Aviation Organization, ICAO), “Procedures for Air Navigation Services- Air Traffic Management” adlı dokümanında kesişen yolları kullanan iki uçak arasındaki yanlamasına ayırmanın, Şekil 2.3’de gösterilen ve aşağıda açıklanan kurallara uygun olarak oluşturulması gerektiğini belirtmiştir:

- Başka bir uçağın rotasıyla kesişen bir rotada seyahat eden bir uçak “yanlamasına ayırma noktasına” ulaşana kadar, diğer uçakla yanlamasına ayrılmıştır.

Yanlamasına ayırma noktası diğer uçağın rotasına dik ölçülen belirli bir mesafede yer almaktadır.

- b) Rotaların kesişim noktasını geçtikten sonra seyahatine devam eden bir uçak ikinci “yanlamasına ayırma noktasını” geçtikten sonra, diğer uçakla yanlamasına ayrılmıştır [49].

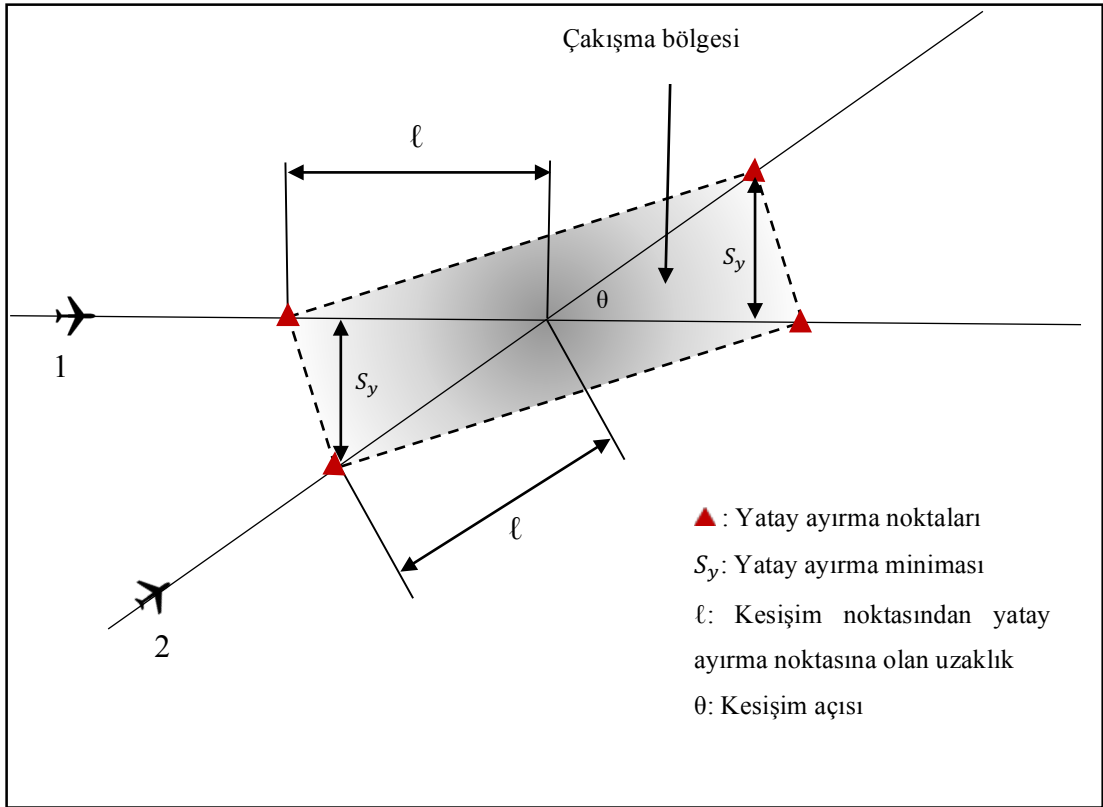


Şekil 2.3 Kesişen rotalarda yanlamasına ayırma noktaları [49]

Bu simülasyon çalışması kapsamında oluşturulan modeller, Şekil 2.3'te gösterilen kesişen rotalarda uçaklar arası yanlamasına ayırma kuralları baz alınarak oluşturulmuştur.

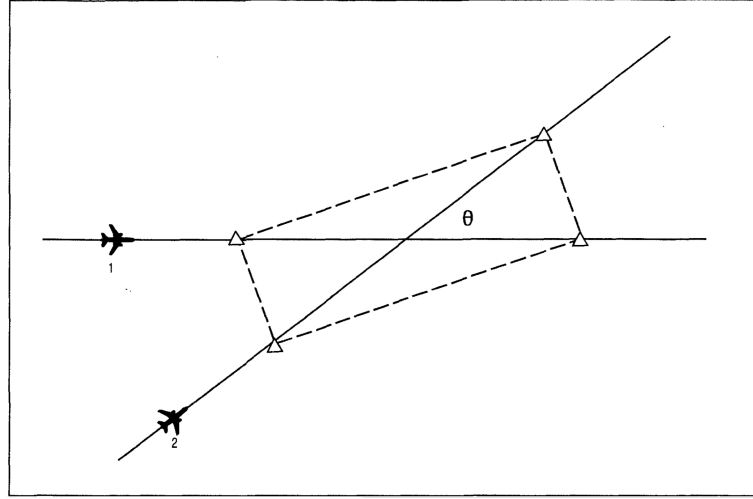
ICAO'nun “Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima” adlı diğer bir dokümanında ise kesişen rotalarda seyahat eden uçakların çakışmasını önlemek için bu iki rota arasında oluşan çakışma bölgesinde, aynı anda birden fazla uçağın bulunmasını engellemek gerektiği belirtilmiştir. Pratikte, belli bir noktada çakışma riski olan uçaklar mümkünse dikey olarak ayrılır, fakat burada dikey ayırmanın mümkün olmadığı durumlar göz önünde bulundurularak yatay ayırmanın nasıl sağlanacağı üzerinde durulmuştur.

Kesişen rotalarda yatay ayırma, kesişim noktasının etrafında bir çakışma bölgesi tanımlanarak ve bu bölge baz alınarak yapılır. Çakışma bölgesi dörtgendir, dörtgenin köşeleri yatay ayırma noktası olarak tanımlanır. Yatay ayırma noktalarından diğer rotaya dik olarak çizilen uzunluklar (S_y) birbirine eşittir (Şekil 2.4). Yatay ayırma, kontrolör tarafından, aynı seviyedeki uçakların bu çakışma bölgesinde aynı anda bulunmasını önleyerek sağlanır [48].



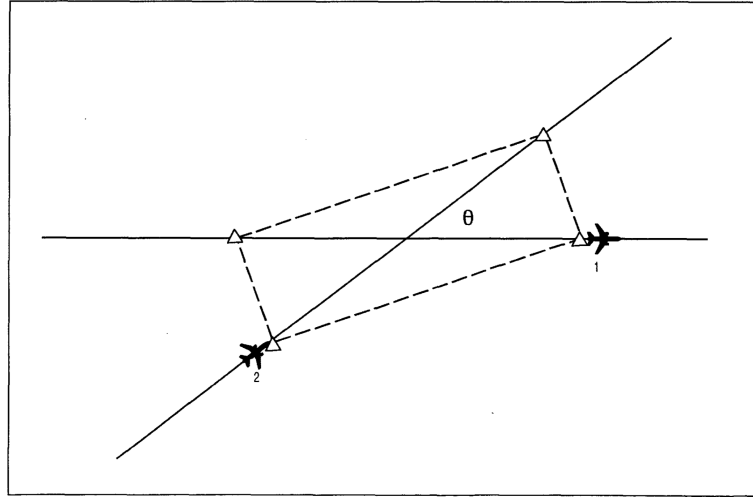
Şekil 2.4 Kesişen iki rota için çakışma bölgesi [48]

Aynı seviyedeki iki uçağın Şekil 2.5’deki gibi birbirine yaklaştığını düşünelim. 1 numaralı uçağın çakışma bölgesine önce girdiğini varsayalım. Kontrolör, mesafeye dayalı bir prosedür uygulayarak uçakların yatay olarak ayrılmasını sağlamak için, her iki pilottan da kesişme noktasına olan mesafe bilgisini alır. Bu işlem, 2 numaralı uçağın çakışma bölgesine girmeden önce yani yaklaşmakta olduğu yatay ayırma noktasına yeterli bir mesafede iken gerçekleştirilir [48].



Şekil 2.5 Çakışma bölgesine yaklaşmakta olan iki uçak [48]

Çakışma bölgesine giren bir uçak bu bölgeyi terk ettiğinde eğer varsa çakışma bölgesine girmeyi bekleyen uçak girer (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Bir uçağın çakışma bölgesini terk etmesi halinde diğer uçağın çakışma bölgesine girişi [48]

Eğer, Otomatik Bağımlı Gözetim (Automatic Dependent Surveillance, ADS) kullanılıyorsa, pozisyon bilgisine dayalı tahminlerde yürütülebilir. Uçakların kesişme noktasına olan mesafeleri (hesaplanan veya rapor edilen), her iki uçağın nominal yere göre hızları ve rapor zamanı bilindiği durumda, kontrolör 2. uçağın çakışma bölgesine giriş zamanını ($T2_{giriş}$), 1. uçağın çakışma bölgesine giriş ($T1_{giriş}$) ve çakışma bölgesinden çıkış ($T1_{çıkış}$) zamanlarını hesaplar. Eğer, $T1_{giriş} < T1_{çıkış} < T2_{giriş}$ ise uçaklar aynı anda çakışma bölgesinde bulunmayacağı için herhangi bir ayırma prosedürü uygulanmasına gerek yoktur. $T1_{giriş} < T2_{giriş} < T1_{çıkış}$ ise herhangi bir ayırma uygulanmadığı durumda,

uçaklar çakışma bölgesinde aynı anda bulunacaktır. Bu durumda, 2 numaralı uçağın yatay ayırma noktasına gelmeden önce dikey olarak ayrılması veya aynı seviyeyi muhafaza etmesi halinde emniyetli ayırma sağlanana dek geciktirilmesi gerekmektedir [48].

2.2.2. Optimum kesişim açısının belirlenmesi

Kesişen rotalardaki çakışma bölgesinin alanının artması, hava sahasının verimsiz kullanılmasına sebep olabilir. Çünkü çakışma bölgesinde bir uçak bulunduğu durumda ikinci bir uçağın bu bölgeye girmemesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çakışma bölgesinin alanının mümkün olduğunca minimumda tutulması gerekmektedir. Bu alanı minimum yapan açı değeri ise optimum kesişim açısıdır.

Buradaki hesaplama, Şekil 2.4'te yer alan iki rota için çakışma bölgesinin alanı baz alınarak yapılmıştır.

Kesişen iki rotanın optimum kesişim açısının belirlenmesi için Şekil 2.4'te yer alan çakışma bölgesinin alanı (dikdörtgen bölge);

$$\begin{aligned}
 A &= 2\ell S_y \\
 \sin \theta &= \frac{S_y}{\ell} \Rightarrow \ell = \frac{S_y}{\sin \theta} \\
 A &= \frac{2S_y^2}{\sin \theta}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

şeklinde ifade edilebilir.

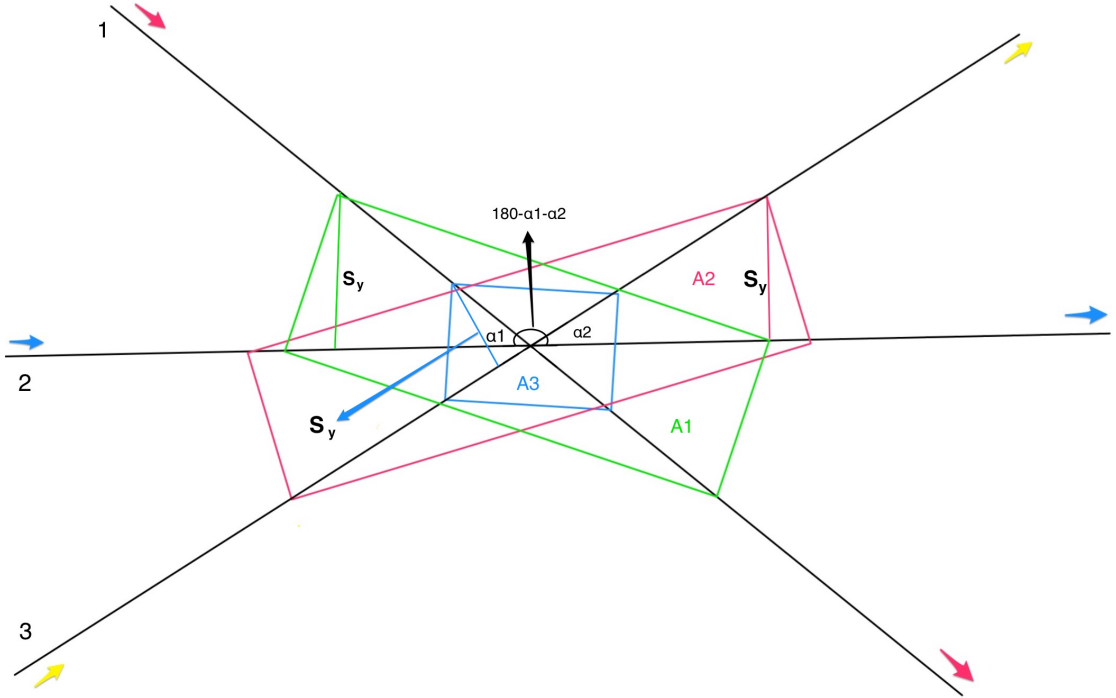
Burada; S_y iki uçak için sağlanması gereken yatay ayırma mesafesidir. S_y mesafesi sabit olup, Türkiye'deki saha operasyonlarında 5NM olarak uygulanmaktadır. θ , rotalar arasındaki kesişim açısıdır. ℓ mesafesi, yatay ayırma noktalarından kesişim noktasına olan uzaklık olup birbirine eşittir.

Çakışma bölgesinin alanını minimum yapan açı değerini (optimum kesişim açısı) hesaplamak için, çakışma bölgesinin türevi alınarak sıfıra eşitlenir:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial A}{\partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{2S_y^2}{\sin \theta} = -2S_y^2 \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} \\
 -2S_y^2 \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} &= 0, \quad \{S_y \neq 0 \text{ ve } \theta \in (0, \pi)\} \\
 \Rightarrow \theta &= \frac{\pi}{2}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Kesişen iki rota için optimum kesişim açısının 90 derece olduğu yukarıdaki eşitlikle matematiksel olarak gösterilmiştir. Fakat ikiden fazla rota için optimum kesişim açısı hakkında literatürde yapılmış bir çalışma bulunamamıştır. Kavşak yönteminde aynı seviyede kesişen üç rota bulunduğu için bu rotaların kesişim açılarının optimumda tutulması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda aynı seviyede kesişen üç rotanın optimum kesişim açısının belirlenmesi amacıyla kesişen iki rota için kullanılan yaklaşım temel alınmış ve rotalar arası çakışma bölgelerinin minimum yapılması amaçlanmıştır.

Kesişen üç rota için çakışma bölgeleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir. 1-2, 2-3 ve 1-3 numaralı rotalar arasında oluşan çakışma bölgeleri sırasıyla yeşil, kırmızı ve mavi renkte gösterilmiş olup alanları A1, A2 ve A3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.7 Kesişen üç rota için çakışma bölgesi

Oluşan toplam çakışma bölgesinin alanını minimize ederek optimum kesişim açılarını hesaplamak için:

ℓ_1 , ℓ_2 ve ℓ_3 sırasıyla A1, A2 ve A3 için kesişim noktasından yatay ayırma noktasına olan uzaklıklar olmak üzere;

$$\begin{aligned}
A1 &= 2\ell_1 S_y \\
A2 &= 2\ell_2 S_y \\
A3 &= 2\ell_3 S_y \\
\ell_1 &= \frac{S_y}{\sin \alpha_1}, \ell_2 = \frac{S_y}{\sin \alpha_2}, \ell_3 = \frac{S_y}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \\
\Rightarrow A1 + A2 + A3 &= \frac{2S_y^2}{\sin \alpha_1} + \frac{2S_y^2}{\sin \alpha_2} + \frac{2S_y^2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (2.3)
\end{aligned}$$

Toplam çakışma bölgesini minimum yapan optimum kesişim açılarını bulmak için toplam alanın α_1 ve α_2 değişkenlerine göre türevi alınıp sıfıra eşitlenir.

Çakışma bölgesinin toplam alanı;

$$A1 + A2 + A3 = A_t$$

olsun.

Bu durumda;

$$A_t(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{2S_y^2}{\sin \alpha_1} + \frac{2S_y^2}{\sin \alpha_2} + \frac{2S_y^2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}$$

olarak yazılabilir. A_t fonksiyonunun α_1 'e göre türevi;

$$\begin{aligned}
\frac{\partial A_t(\alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_1} &= \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left[\frac{2S_y^2}{\sin \alpha_1} + \frac{2S_y^2}{\sin \alpha_2} + \frac{2S_y^2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \right] \\
\frac{\partial A_t(\alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_1} &= -\frac{2S_y^2 \cos \alpha_1}{\sin^2 \alpha_1} - \frac{2S_y^2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} = 0 \quad (2.4)
\end{aligned}$$

olarak elde edilir. A_t fonksiyonunun α_2 'ye göre türevi ise;

$$\begin{aligned}
\frac{\partial A_t(\alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_2} &= \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left[\frac{2S_y^2}{\sin \alpha_1} + \frac{2S_y^2}{\sin \alpha_2} + \frac{2S_y^2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \right] \\
\frac{\partial A_t(\alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_2} &= -\frac{2S_y^2 \cos \alpha_2}{\sin^2 \alpha_2} - \frac{2S_y^2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2)} = 0 \quad (2.5)
\end{aligned}$$

olarak elde edilir. (2.4) ve (2.5) numaralı denklemler çözülürse;

$$\frac{2S_y^2 \cos \alpha_2}{\sin^2 \alpha_2} = \frac{2S_y^2 \cos \alpha_1}{\sin^2 \alpha_1}$$

$$\Rightarrow \cos \alpha_1 = \cos \alpha_2$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 \quad (2.6)$$

elde edilir.

(2.4) numaralı denklemde α_2 yerine α_1 yazılırsa;

$$\begin{aligned} \frac{2S_y^2 \cos \alpha_1}{\sin^2 \alpha_1} + \frac{2S_y^2 \cos(2\alpha_1)}{\sin^2(2\alpha_1)} &= 0 \\ 4\cos^3 \alpha_1 + 2\cos^2 \alpha_1 - 1 &= 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

denklemini elde edilir.

(2.7)'de elde edilen 3. dereceden denklemi çözmek için;

$$\cos \alpha_1 = x \quad (2.8)$$

yazılır.

$$4x^3 + 2x^2 - 1 = 0 \quad (2.9)$$

$$\left(x - \frac{1}{2}\right)(4x^2 + 4x + 2) = 0$$

(2.9) denkleminin kökleri x_1 , x_2 ve x_3 olarak adlandırılırsa;

$$x_1 = 1/2$$

olarak elde edilir.

Diğer kökleri bulmak için (2.10)'daki ikinci dereceden denklem çözülür.

$$4x^2 + 4x + 2 = 0 \quad (2.10)$$

$$ax^2 + bx + c = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4ac = -16$$

$$\Delta < 0$$

Bu durumda (2.10) denkleminin reel kök yoktur ve (2.9) denkleminin tek kökü olup o da $1/2$ 'dir.

(2.8)'deki eşitlikte x yerine $\frac{1}{2}$ yazılırsa, $\{S_y \neq 0 \text{ ve } \theta \in (0, \pi)\}$ şartları altında;

$$\cos \alpha_1 = 1/2 \Rightarrow \alpha_1 = \pi/3$$

olarak bulunur.

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 60^\circ \text{ olduğu için üçüncü açı;}$$

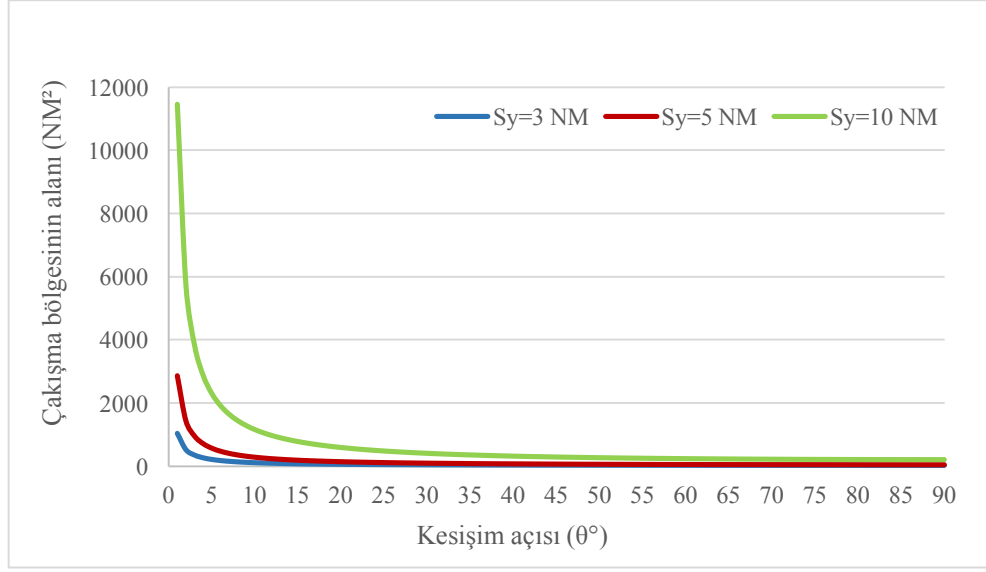
$$180^\circ - a_1 - a_2 = 60^\circ$$

olur.

Görüldüğü gibi kesişen üç rota için optimum kesişim açısı birbirine eşit ve 60° olarak bulunmuştur. Optimum kesişim açısı homojen trafik akışı olduğu varsayımı ile hesaplanmıştır. Çünkü trafiklerin geliş aralıkları ve çakışma bölgesinde karşılaşp karşılaşmama durumları çakışma bölgesinin alanının önemini belirlemektedir. Örneğin kesişim noktasına varış zamanı aynı olan iki uçak için çakışma bölgesinin alanının minimum olması yani rotaların optimum kesişim açısıyla kesişmesi önemli iken farklı zamanlarda gelen iki uçak için bu bölgenin alanının büyüklüğü önemli olmayabilir.

İki rota için kesişim açısına ve uçaklar arası uygulanması gereken minimum yatay ayırma miktarına (S_y) bağlı olarak çakışma bölgesinin alanının değişimi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. 90° derecede minimum çakışma bölgesi oluşurken kesişim açısı azaldıkça çakışma bölgesinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayırma miniması arttıkça çakışma bölgesinin alanı daha erken artmaya başladığı söylenebilir. Örneğin $S_y=5$ NM için çakışma bölgesinin alanı 10° den sonra hızlı bir şekilde artmaya başlarken $S_y=10$ NM için 20° den sonra hızlı bir şekilde artmaya başlamıştır.

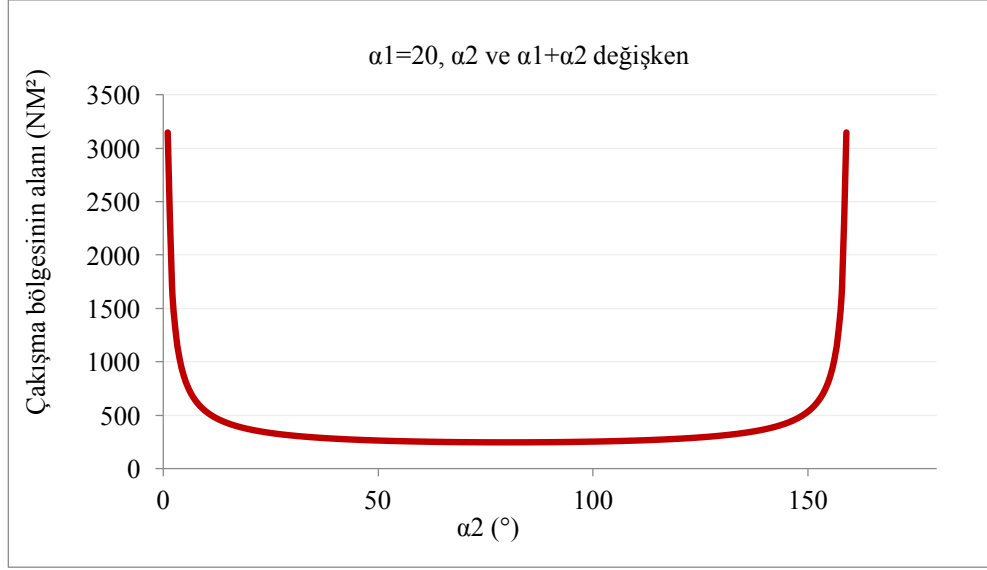
Türk hava sahasında, saha operasyonlarında uygulanan yatay ayırma miniması önceden 10NM olarak uygulanırken 2016 yılında 5NM olarak güncellenmiştir. Bu sayede çakışma bölgesinin alanında da bir azalma sağlandığı söylenebilir. Örneğin kesişim açısı her iki durum için de 40° alınırsa, yatay ayırma miniması 10NM için çakışma bölgesinin alanı 311 NM^2 iken 5NM için çakışma bölgesinin alanı 78 NM^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.8 Kesişen iki rota için kesişim açısı ile çakışma bölgesinin değişimi

Kesişim açısı küçüldükçe çakışma bölgesinin alanının artması nedeniyle, küçük kesişim açıları hava sahasının verimsiz kullanılmasına sebep olabilir. Ayrıca küçük kesişim açılarında uçakların yanlamasına ayrılması da zorlaşır. Bu yüzden, kesişim açılarının mümkün olduğunca 90 dereceye yakın olacak şekilde tasarlanması, hava sahasının verimli kullanılması açısından önemlidir. Ayrıca, (Chatterji ve Sridhar, 2001) iki rota arasındaki kesişim açısının 90 derece olarak tasarlanması hava sahası karmaşıklığını ve kontrolör iş yükünü azaltacağını belirtmişlerdir [15].

Kesişen üç rota için kesişim açılarından bir tanesi 60 dereceden küçük olması durumunda diğer iki açı daha geniş olarak belirlenebilir. Örneğin, açılardan bir tanesi keyfi olarak 20 derece alındığında diğer iki açının değişimine bağlı olarak oluşan çakışma bölgelerinin alanlarının değişimi Şekil 2.9’da gösterildiği gibi olmaktadır. Çakışma bölgesinin en az olduğu kesişim açısı diğer iki açının birbirine eşit ve 80 derece olduğu açıdır. Bu durum trafik yoğunluğunun az olduğu bir rotanın kesişim açısının minimumda tutulması ve diğer rotaların optimumda tutulması amacıyla kullanılabilir.



Şekil 2.9 Kesişen üç rota için çakışma bölgesi ($\alpha_1 = 20^\circ$)

2.3. Gecikme Süresi ve Sektör Kapasitesi

Bu çalışmada, tasarlanan sektörlere giren uçakların ortalama gecikme süresi çalışmada kullanılan parametrelerden birisidir. Çünkü ortalama gecikme süresi, bir sektördeki trafik akışının verimliliği konusunda belirleyici faktörler arasındadır. Bir uçağın gecikme süresi ise gerçekleşen geliş zamanı ile planlanan geliş zamanı arasındaki zaman farkıdır. Gecikme süresi aşağıdaki eşitlikle de ifade edilebilir:

$$\text{Gecikme} = \text{Gerçekleşen geliş zamanı} - \text{Planlanan geliş zamanı}$$

Bu çalışmada kullanılan diğer önemli parametre ise sektör kapasitesidir. Kapasitenin belirlenmesi için en uygun yöntemlerden birisi saatlik trafik akışının ölçülmesidir. Hesaplanan saatlik trafik kapasitesi, günlük, aylık ve yıllık değerlere de dönüştürülebilir [49]. Bu çalışmada, kapasite bir saatlik zaman dilimi içerisinde sektöre giren ve çıkan trafik sayısı olarak ifade edilmiştir.

2.4. Simülasyon Modeli

Çalışma kapsamında iki rota arası kesişim açısının gecikmeye bağlı olarak değişimi, kavşak yönteminin tek ve iki farklı seviyede uygulanması hızlı zamanlı simülasyonlarla incelenmiştir. Ayrıca, insan faktörü ve kontrolör iş yükü gibi faktörlerin de çalışmaya dahil edilebilmesi ve kavşak yönteminin bu açıdan da incelenebilmesi amacıyla tek sektörde kavşak yönteminin uygulanması gerçek zamanlı simülasyonlarla

da incelenmiştir. Bu bağlamda hızlı ve gerçek zamanlı simülasyonlar için belirlenen girdiler aşağıda sıralanmıştır.

2.4.1. Hızlı ve gerçek zamanlı simülasyonda kullanılacak girdilerin belirlenmesi

2.4.1.1. Uçak tipi ve kategorileri

Uçak tiplerinin maksimum irtifa, maksimum ve minimum hız gibi uçak performans özellikleri konusunda belirleyici olması nedeniyle, simülasyonda kullanılan uçak özelliklerinin gerçek uçuş operasyonlarıyla uyumlu olması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, simülasyonda kullanılan uçaklar, EUROCONTROL’ün “European Route Network Improvement Plan - European ATS Route Network” raporunda geçen ve Avrupa hava sahasında en sık kullanılan uçak tipleri baz alınarak belirlenmiştir [54]. Tablo 2.1’de Temmuz 2014-Haziran 2015 tarihleri arasında Avrupa hava sahasında en sık kullanılan 50 uçak tipi verilmiştir. Uçakların kuyruk türbülans kategorileri ve maksimum irtifaları EUROCONTROL’ün “User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA)” adlı veri tabanından elde edilmiştir [55].

Tablo 2.1 2014-2015 arasında Avrupa hava sahasında en çok kullanılan 50 uçak [54]

Sıra	Uçak Tipi	Uçuş sayısı	Yüzde (%)	Kategori	Maksimum irtifa (ft)
1	B738	1593908	16,2	M	41000
2	A320	1568015	15,9	M	39000
3	A319	960324	9,7	M	39000
4	A321	516575	5,2	M	39000
5	E190	326768	3,3	M	41000
6	DH8D	303962	3,1	M	25000
7	B737	215674	2,2	M	41000
8	CRJ9	153808	1,6	M	41000
9	A332	153125	1,6	H	41000
10	E170	145991	1,5	M	41000
11	B77W	136640	1,4	H	43000
12	B763	128526	1,3	H	43000
13	B733	127463	1,3	M	37000
14	B752	124775	1,3	M	42000
15	A333	120326	1,2	H	41000
16	AT72	116873	1,2	M	25000
17	AT75	110959	1,1	M	25000
18	B744	103068	1,0	H	45000
19	B772	101736	1,0	H	43000
20	DH8A	87217	0,9	M	25000

Tablo 2.1 (Devam) 2014-2015 arasında Avrupa hava sahasında en çok kullanılan 50 uçak [54]

Sıra	Uçak tipi	Uçuş sayısı	Yüzde (%)	Kategori	Maksimum irtifa (ft)
21	Bilinmiyor	77924	0,8		
22	E145	76720	0,8	M	37000
23	B734	76349	0,8	M	37000
24	RJ1H	74440	0,8	M	35000
25	B736	73140	0,7	M	41000
26	B735	62484	0,6	M	37000
27	BE20	56221	0,6	L	32000
28	AT76	56023	0,6	M	25000
29	C56X	54781	0,6	M	45000
30	F100	53611	0,5	M	35000
31	SB20	53073	0,5	M	31000
32	A343	50998	0,5	H	41000
33	SF34	50370	0,5	M	31000
34	F70	49469	0,5	M	37000
35	CRJX	47876	0,5	M	41000
36	B788	47662	0,5	H	43000
37	A318	43373	0,4	M	41000
38	A388	42908	0,4	H	43100
39	S92	42486	0,4	Helikopter	
40	CRJ2	40699	0,4	M	41000
41	AT45	40415	0,4	M	25000
42	B77L	39318	0,4	H	43100
43	B712	37298	0,4	M	37000
44	H25B	33990	0,3	M	43000
45	B739	32356	0,3	M	41000
46	CRJ7	31869	0,3	M	41000
47	A346	31428	0,3	H	41000
48	RJ85	29790	0,3	M	35000
49	DA42	28414	0,3	L	18000
50	F2TH	28328	0,3	M	49000

Avrupa hava sahasında en çok kullanılan ilk 50 uçak, bütün uçak tipleri arasında %86,7'lik bir paya sahiptir. Bu çalışmada, uçakların kullanım sıklığı, kategorileri ve performansları (çıkabildikleri irtifalar) göz önünde bulundurularak Tablo 2.2'de gösterilen uçak tipleri kullanılacaktır.

Tablo 2.2 Simülasyonda kullanılan uçak tipleri ve kategorileri

Sıra	Uçak Tipi	Kategori
1	B738	Orta
2	A320	Orta
3	A319	Orta
4	A321	Orta
5	B737	Orta
6	B763	Ağır
7	B733	Orta
8	B752	Orta
9	A333	Ağır
10	E145	Orta
11	B734	Orta
12	B736	Orta
13	B735	Orta
14	F70	Orta
15	H25B	Orta

Uçaklar sertifikalandırılmış maksimum kalkış kütlesine göre ağır (136 000 kg veya daha ağır), orta (136 000 kg'dan az, 7 000 kg'dan fazla) ve hafif (7 000 kg veya daha az) olmak üzere üç kategoriye ayrılır [49]. Yüksek irtifalarda daha çok orta ve ağır kategorideki uçaklar kullanıldığı için bu çalışmaya hafif kategorideki uçaklar dâhil edilmemiştir. Tablo 2.1'de gösterilen en çok kullanılan ilk 50 uçağın uçuş sayısına göre %9,6'sı ağır kategori, %75'i ise orta kategoriden oluşmaktadır. Türü bilinmeyen 21 numaralı uçak, 39 numaralı helikopter ve hafif kategorideki uçaklar çıkartıldığında ağır ve orta kategorideki uçakların yüzdesi sırasıyla %11,34 ve %88,65 olmaktadır. Bu doğrultuda, çalışmada kullanılan uçakların %13,3'ü ağır, %86,6'sı ise orta kategori olarak belirlenmiştir.

2.4.1.2. Uçak hızları

Uçaklar arası ayırmanın sağlanabilmesi için irtifa değişimi (bu çalışmada kullanılmamıştır), bekleme, vektör ve hız artırma ya da azaltma gibi teknikler uygulanmaktadır. Fakat uçakların hızları performanslarına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu yüzden, bu çalışmada kullanılmak üzere F350 ve F360 seviyeleri için uçak kategorilerine göre uçakların uçabileceği minimum, maksimum ve referans hızlar belirlenmiştir. Bu hızlar söz konusu seviyeler için gerçek hava hızı (True Airspeed, TAS) cinsinden Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Uçak kategorilerine göre kullanılan uçuş hızları (kts)

FL360			
	<i>Minimum</i>	<i>Referans</i>	<i>Maksimum</i>
Ağır	377	441	504
Orta	350	415	481
FL350			
	<i>Minimum</i>	<i>Referans</i>	<i>Maksimum</i>
Ağır	371	433	496
Orta	344	408	473

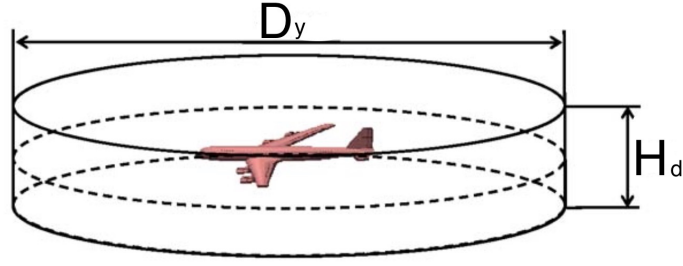
2.4.1.3. Sektör boyutu ve rota uzunlukları

Bir hava sahasında farklı boyutlarda birçok sektör ve her sektör içerisinde farklı uzunluklarda ve konfigürasyonlarda birçok rota bulunabilir. Fakat sektör boyutunu ve geometrik yapısını belirleyen faktör daha çok o sektörün trafik yükü ve trafiğin akış yönüdür. Sektör boyutu ve şekli genellikle trafik akışını kapsayacak ve kritik birleşme-çakışma noktalarının sektör sınırları içerisinde kalacak şekilde belirlenir. Buradaki amaç, kontrolörlere sektör içerisinde çakışmayı önleyebilecek yeterli zamanı kazandırmaktır [56]. Bu nedenle, rota uzunlukları önerilen yol ağ yapısının tasarlanmasına imkân verecek uzunlukta ve çakışma noktaları sektör sınırlarına yeterli uzaklıkta olacak şekilde belirlenmiştir.

Bu bağlamda, sektördeki her bir rota uzunluğu eşit ve 200NM olarak, sektör boyutu ise 200NM uzunluğundaki rotalara ve çalışmada incelenecek farklı kesişim açlarına olanak tanıyacak büyüklükte belirlenmiştir.

2.4.1.4. Ayırma minimumları

Ayırma, aynı bölgede seyahat eden uçakların çarpışma riskinden korunması için yatayda ve dikeyde kabul edilebilir bir emniyet mesafesinin sağlanmasıdır [48]. Hava sahasında hareket halinde olan bir uçak için, sağlanması gereken ayırma minimalalarının üç boyutlu uzayda gösterimi Şekil 2.10'da yer almaktadır.



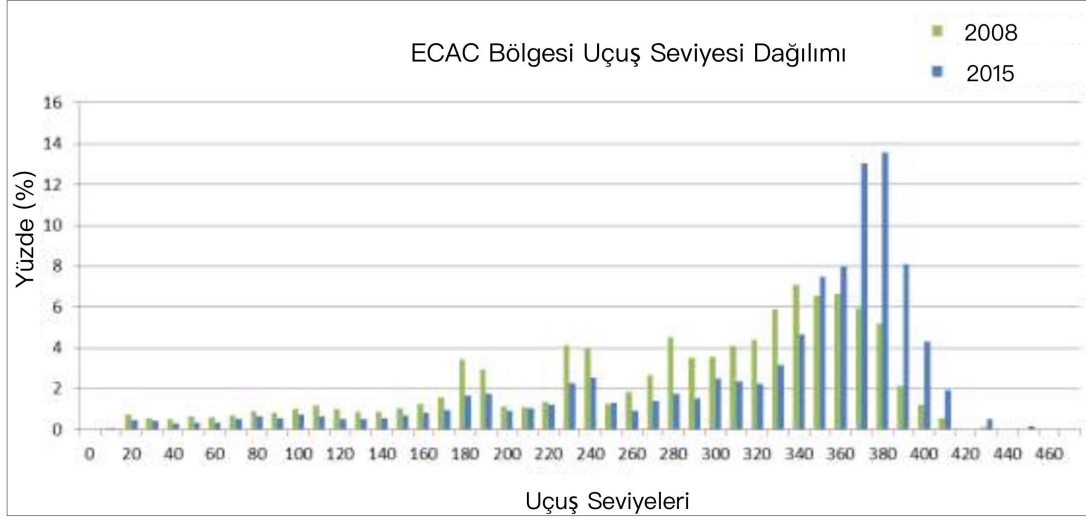
Şekil 2.10 Yatayda (D_y) ve dikeyde (H_d) sağlanması gereken ayırmalar [51]

Uçuş operasyonları sırasında hava sahasında uygulanması gereken iki çeşit ayırma mevcuttur. Bunlar dikey ayırma ve yatay ayırmadır. Yatay ayırma, yanlamasına ve uzunlamasına ayırma olmak üzere iki kısımdır [49].

Türk hava sahasında azaltılmış dikey ayırma miniması (Reduced Vertical Separation Minimum, RVSM) uygulanır. Bu kapsamda dikey ayırma miniması, FL410'a (flight level, FL) kadar 1000 ft, FL410 üzerinde ise 2000 ft olarak uygulanır. Yatay ayırma miniması ise radar kullanıldığı durumlarda uzunlamasına ve yanlamasına 5 NM olarak uygulanır [57]. Bu çalışmada Türkiye'deki uygulamaya paralel olarak yatayda 5NM yatay ayırma uygulanacaktır.

2.4.1.5. Uçuş seviyesi (Flight level, FL)

RVSM'in uygulanmaya başlanması ve yeni nesil uçakların performansı ile uçuş seviyelerinde FL330/FL360'dan FL360/FL420 arasına doğru kaymalar olmuştur. En sık kullanılan uçuş seviyeleri ise FL370/FL380 olmuştur. Düşük seviyelerde ise en sık kullanılan uçuş seviyeleri FL180/FL190 ve FL230/FL240 olmuştur [54]. Şekil 2.11'de 2008 ve 2015 yıllarına ait uçuş seviye dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 2.11 2008-2015 yılları için uçuş seviyesi dağılımı [54]

Bu çalışmada kullanılan uçuş seviyesi, Şekil 2.11’de gösterilen en çok kullanılan uçuş seviyeleri ve Tablo 2.1’de belirtilen uçakların performansları dikkate alınarak doğu yönlü (doğulu) uçuşlar için FL350, batı yönlü (batılı) uçuşlar için FL360 kullanılmıştır.

2.4.2. Kabuller

Çakışan rotalardaki uçaklar seviye ayırması ile birbirinden ayrılabilir. Ancak bu durum her zaman mümkün olmayabilir ve uçakların seviye değişikliği olmaksızın ayrılması gerekebilir. Bu durum göz önüne alınarak bu çalışmada aynı seviyeyi muhafaza eden uçaklar arasında uygulanacak yatay ayırma ile önerilen hava sahası yol yapılarının etkileri ölçülecektir. Simülasyon modeli yatay düzlemde oluşturulduğu için tırmanan ve alçalan uçaklar söz konusu değildir. Bu yüzden dikey ayırma miniması uygulanmasına gerek yoktur. Yatay ayırma miniması olarak, Türkiye’deki uygulamaya paralellik göstermesi açısından bu çalışmada 5 NM yatay ayırma kullanılmıştır. Ayrıca, rüzgar sakın kabul edilmiştir.

Bu çalışma, saha kontrol (En-route) bazında yol ağı çalışması olup radar kullanılan bir hava sahası varsayımı ile oluşturulmuştur. Ayrıca, çalışma kapsamında oluşturulan bütün senaryolarda uçaklara ilk giren ilk çıkar (first in first out, FIFO) yöntemiyle hizmet verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında öncelikle kesişen iki rota hızlı zamanlı simülasyonlarla farklı kesişim açıları için incelenmiştir. Devamında tek seviyede ve iki farklı seviyede kesişen üç rota için değerlendirmeler yapılmıştır. Son aşamada hızlı zamanlı simülasyonlarda belirlenen açı değerleri kullanılarak tek seviyede kesişen üç rota için gerçek zamanlı simülasyonlarla incelemeler yapılmıştır.

3.1. Hızlı Zamanlı Simülasyon Uygulaması

Bu simülasyon çalışması, üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, kesişen iki rota için kesişim açısının ortalama gecikmeye ve kapasiteye etkisi değerlendirilmiş ve uçuş sıklığına bağlı olarak rotalar arası kullanılabilecek minimum kesişim açısının değişimi incelenmiştir. İkinci aşamada, tek sektör içerisinde aynı yönlü ve aynı seviyedeki üç rotanın, üç farklı noktada ikişerli gruplar halinde kesişmesi ile tek noktada kesişmesinin ortalama gecikmeye ve kapasiteye etkisi değerlendirilmiştir. Üçüncü aşamada ise kavşak yöntemi kullanılarak sektörlerin iki alt sektöre ayrılmasının toplam kapasiteye ve ortalama gecikmeye etkisi değerlendirilmiştir.

3.1.1. Kesişim açısının sektör kapasitesine etkisinin değerlendirilmesi

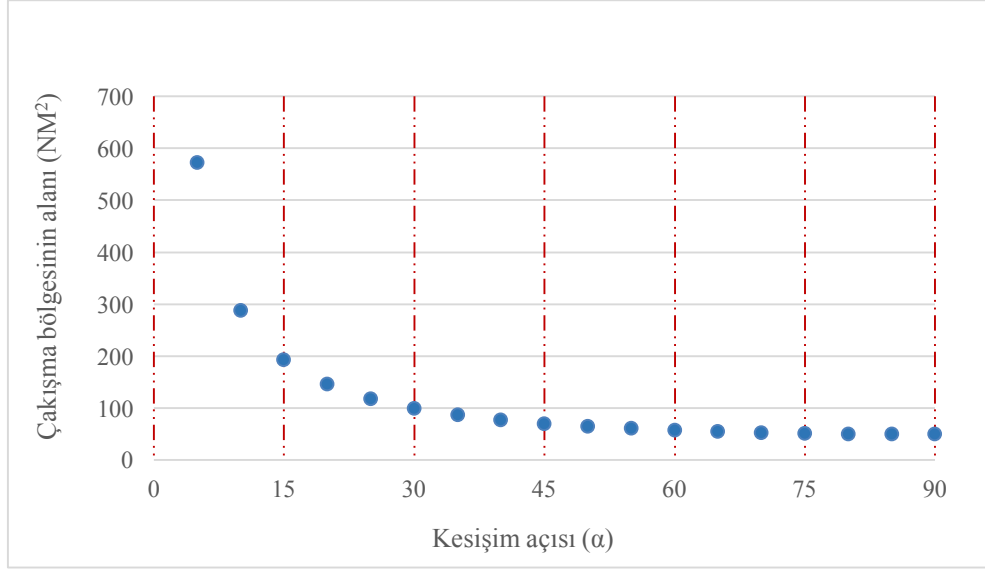
Öncelikle kesişim açısının, ortalama gecikmeye ve sektör kapasitesine etkisini incelemek amacıyla, kesişen iki rota için kesişim açısının değişimine bağlı olarak incelemeler yapılmıştır. İçerisinde sadece kesişen iki rota bulunan bir sektör varsayımı üzerine kesişim açısının 5 dereceden 90 dereceye kadar 5 derece farkla değişiminin etkileri incelenmiştir. FL360 seviyesinde, toplam 90 uçak kullanılarak farklı kesişim açılarında 18 farklı senaryo oluşturulmuştur.

Bu bağlamda, Tablo 3.1’te gösterilen kesişim açıları (α) ve yanlamasına ayırma noktasından kesişim noktasına olan uzaklıklar (ℓ) kullanılmıştır.

Tablo 3.1 Kesişim açısı (α), yatay ayırma noktasının kesişim noktasına olan uzaklığı (ℓ) ve çakışma bölgesinin alanı

Kesişim açısı ($^\circ$)	ℓ (NM)	Çakışma bölgesinin alanı (NM ²)
$\alpha=5^\circ$	57,37	573,7
$\alpha=10^\circ$	28,79	287,9
$\alpha=15^\circ$	19,32	193,2
$\alpha=20^\circ$	14,62	146,2
$\alpha=25^\circ$	11,83	118,3
$\alpha=30^\circ$	10,00	100,0
$\alpha=35^\circ$	8,72	87,2
$\alpha=40^\circ$	7,78	77,8
$\alpha=45^\circ$	7,07	70,7
$\alpha=50^\circ$	6,53	65,3
$\alpha=55^\circ$	6,10	61,0
$\alpha=60^\circ$	5,77	57,7
$\alpha=65^\circ$	5,52	55,2
$\alpha=70^\circ$	5,32	53,2
$\alpha=75^\circ$	5,18	51,8
$\alpha=80^\circ$	5,08	50,8
$\alpha=85^\circ$	5,02	50,2
$\alpha=90^\circ$	5,00	50,0

Kesişim açısı ile çakışma bölgesinin alanı arasında ters bir orantı vardır. Yanlamasına ayırma noktasının kesişim noktasına olan uzaklığının artması, çakışma bölgesinin alanının artmasına sebep olarak kesişen rotalarda uçakların daha erken ayrılmasını gerektirmektedir. Bu durum küçük kesişim açılarında uçakların gecikmesini artırarak hava sahası kapasitesini olumsuz etkileyebilir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi kesişim açısı 0-15 derece arasındayken çakışma bölgesinin alanı çok büyük, 15-30 derece arasında orta, 30 derece sonrasında ise küçük olarak sınıflandırılabilir.

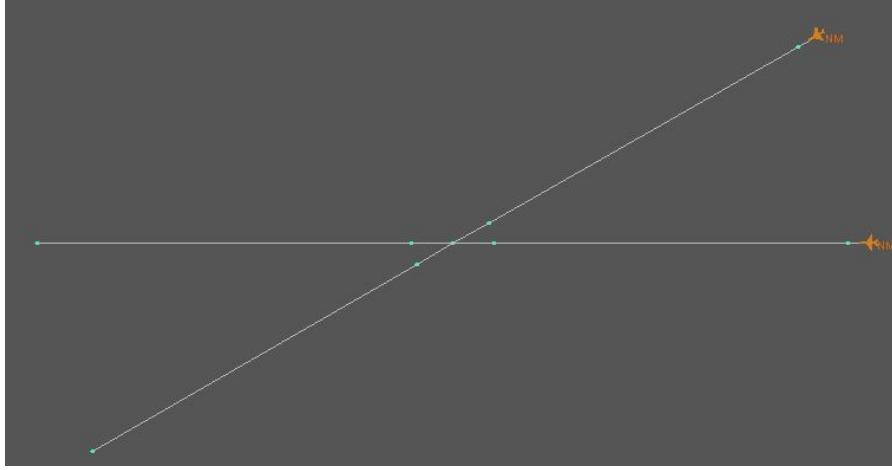


Şekil 3.1 Kesişim açısı ile çakışma bölgesinin değişimi

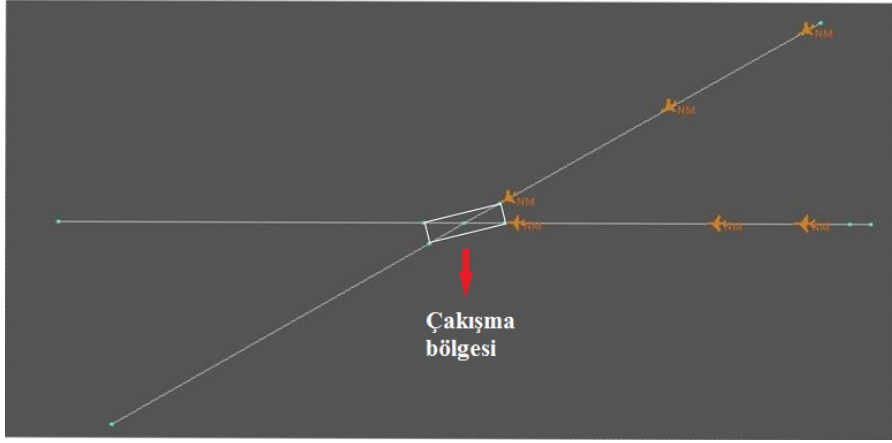
Kesişim açısının değişiminin sektör kapasitesi üzerine etkisini incelemek amacıyla hızlı zamanlı simülasyonda Tablo 3.1’de gösterilen her bir açı değeri için tasarımlar yapılmıştır.

Hava sahasında bulunan uçakların belirli bir sektöre giriş sıklığı da sektör kapasitesini ve uçakların ortalama gecikme süresini etkileyebilmektedir. Trafik yoğunluğunun az olduğu durumlarda, daha küçük kesişim açılarında bile uçuş operasyonlarının gerçekleştirilmesi mümkün olabilirken yoğun trafikelde küçük kesişim açıları sektörün aşırı yüklenmesine ve tıkanıklıklara sebep olabilir.

Uçakların geliş sıklığının yanında, iki veya daha fazla uçağın kesişim noktasında karşılaşması da bir ayırma prosedürü gerektireceğinden uçakların gecikmesini ve sektör kapasitesini etkileyebilmektedir. Bu çalışma kapsamında kesişen iki rota için tasarlanan simülasyon modelinde, uçakların aynı anda sektöre girmesi aynı performanstaki uçakların bir gecikmeye maruz kalmadığı durumlarda kesişim noktasına aynı anda gelmesi anlamına gelmektedir (Şekil 3.2 - Şekil 3.3). Böylece kesişim noktasında uçaklardan birisinin geciktirilmesi gerekmektedir. Bu sayede kesişen rotalarda kesişim açısının değişiminin etkilerinin en net bir şekilde ortaya konması amaçlanmıştır.



Şekil 3.2 Sektöre aynı anda giren iki uçak için SIMMOD ekran görüntüsü

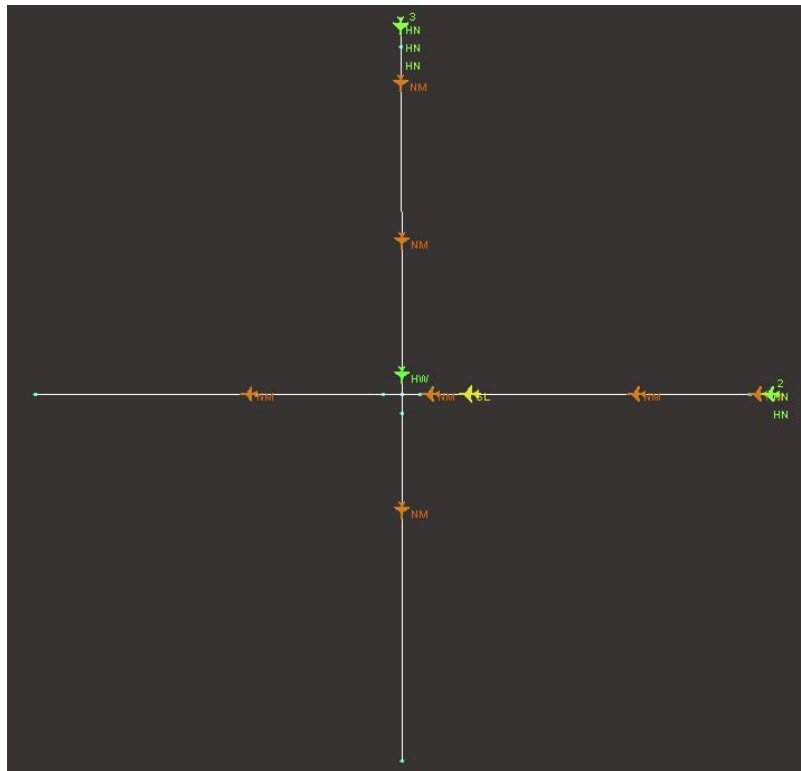


Şekil 3.3 Aynı anda sektöre giren uçakların çakışma bölgesine aynı anda gelmesini temsil eden SIMMOD ekran görüntüsü

Uçakların sektöre farklı zamanlarda girmesi durumunda ise aradaki zaman farkı önem kazanmaktadır. Eğer aradaki zaman farkı, öndeki uçağın çakışma bölgesini gerideki uçak bu bölgeye gelmeden terk edebilmesine olanak tanıyacak kadar uzunsa kesişim açısının küçük ya da büyük olmasının uçakların gecikmesine ve sektör kapasitesine bir etkisi olmadığı söylenebilir. Fakat günümüz trafik koşullarında özellikle yoğun hava sahalarında kesişim açısının optimumda ya da optimuma yakın bir değerde tutulması önemlidir.

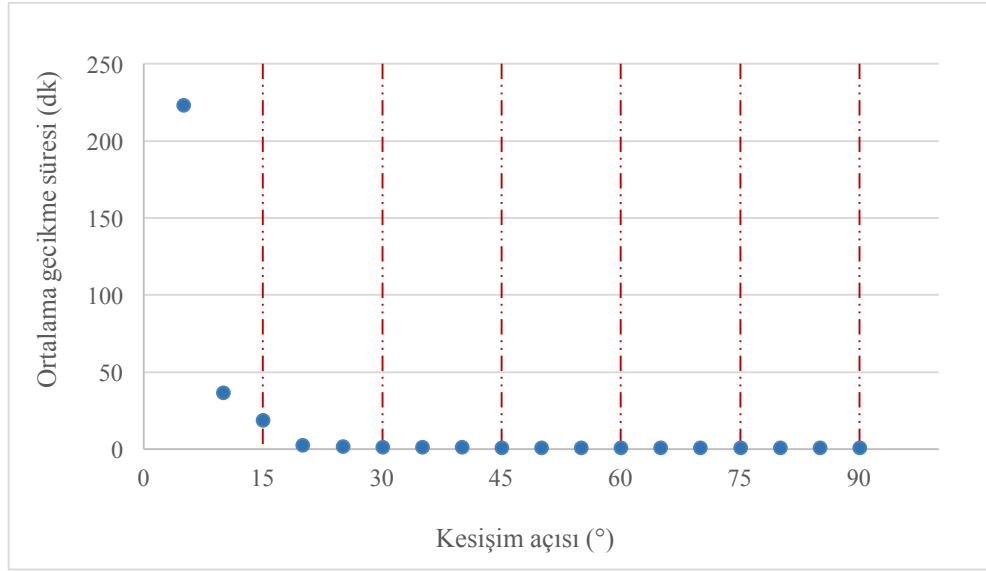
9 dakika sıklıkla gelen uçaklar için yapılan simülasyon sonucunda 5 ve 90 derecelik kesişim açısı için trafik akışları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de verilmiştir. Kesişim açısı 5 derece alınarak yapılan tasarımda, uçaklar arası yanlamasına ayırmanın (5NM) sağlanabilmesi için uçakların kesişim noktasına 57,37 NM kala ayrılması gerekmektedir. Bu durum çakışma bölgesinin alanını artırdığı için, Şekil 3.4’te görüldüğü gibi çakışma

İki rota için optimum kesişim açısı olarak ifade edilen 90 derecede ise ortalama gecikme süresi 90 dereceden daha küçük açılar için yapılan hesaplamalardan daha düşük olup 0,605 dakikadır.



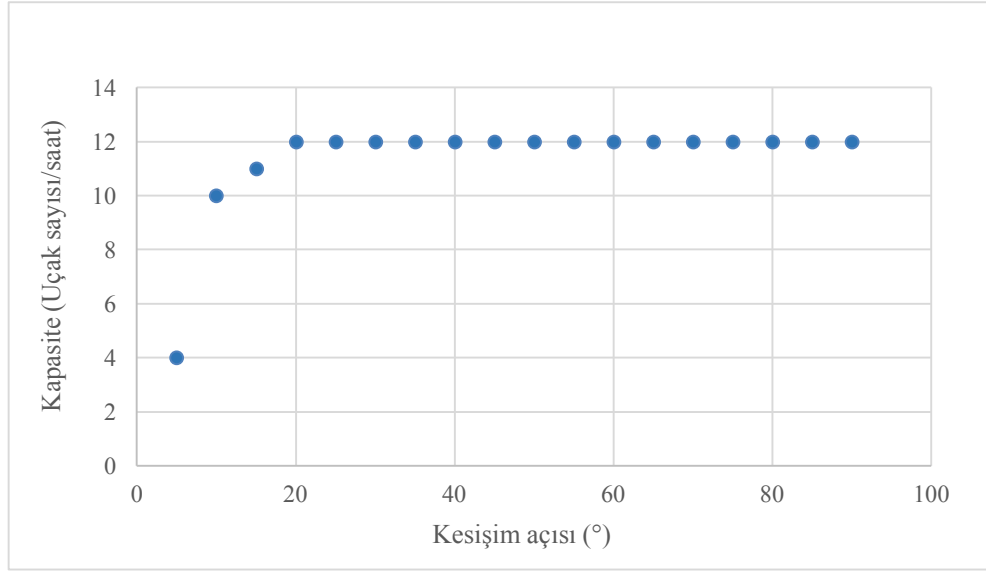
Şekil 3.6’de 9 dakika aralıklarla gelen uçaklar için ortalama gecikme süresinin kesişim açısına bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 3.1’teki kesişim açısına bağlı olarak

çakışma bölgesinin alanındaki değişimi gösteren grafik ile Şekil 3.6'daki kesişim açısının uçakların ortalama gecikme süresine etkisini gösteren grafiğin benzerliği çakışma bölgesinin alanının ortalama gecikme süresini ve dolayısıyla sektör kapasitesini etkilediğini göstermektedir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, ortalama gecikme süresi 0-20 derece arasında çok yüksek iken bu sürenin 20 dereceden sonra makul seviyelere düştüğü söylenebilir. (Chatterji ve Sridhar, 2001) kesişim açısının 19 derecenin altında olduğu durumlarda en hızlı ayırmanın hız tahdidi ile gerçekleştirilebileceğini ve dar kesişim açılarında çakışma çözümlemenin daha erken başlamak zorunda olduğunu belirtmiştir [15]. Görüldüğü gibi 20 derecenin altında hem gecikme süresi daha yüksek hem de ayırma prosedürü için gerekli zaman daha uzundur.



Şekil 3.6 Kesişim açısına bağlı ortalama gecikme süresi

Şekil 3.7'de rota kesişim açısının değişiminin sektör kapasitesine etkisi gösterilmiştir. Ortalama gecikme süresinin azalmasıyla kapasite artışı gözlemlenmiştir. Fakat 20 dereceden sonra kapasitenin sabit kaldığı görülmüştür. Kesişim açısının artmasına rağmen kapasitenin artmaması ve gecikmedeki azalmanın da yavaşlamasının sebebi çakışma bölgesinin alanındaki değişimin 20 dereceden sonra sınırlı kalmasıdır. Bir başka ifadeyle, 20-90 derece arasındaki çakışma bölgesinin alanındaki sınırlı değişim gecikmeye yansırken saatte hizmet verilen uçak sayısına yansımamıştır.



Şekil 3.7 Kesişim açısı kapasite değişimi

Küçük kesişim açılarında ortalama gecikme süresinin fazla olması ve kapasitenin sınırlanması sebebiyle trafik yoğunluğu da göz önüne alınarak 0-45 derece arası daha detaylı incelenmiştir. Böylece, farklı yoğunluktaki uçuşlarda minimum kesişim açısının değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır.

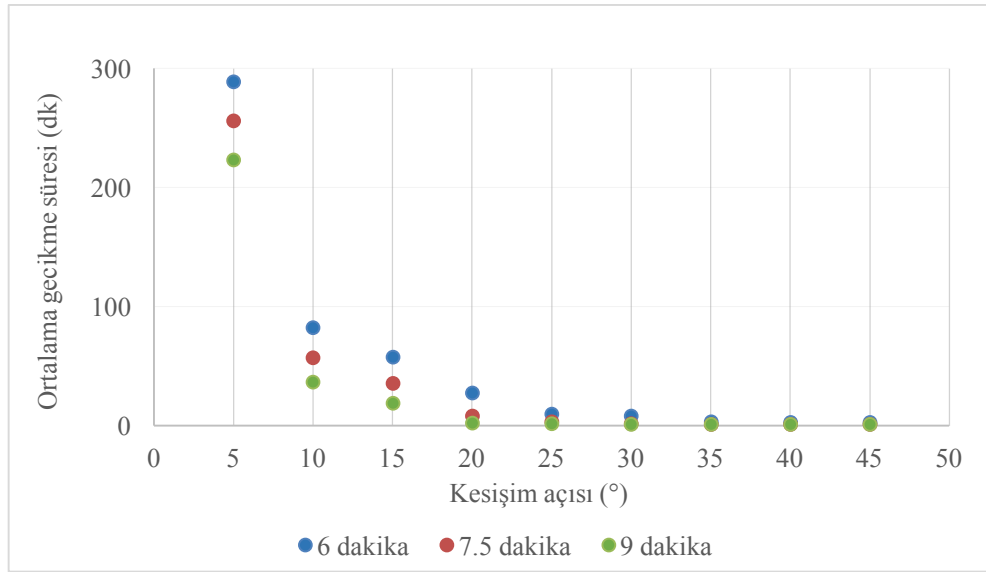
Tablo 3.2’te 6, 7,5 ve 9 dakika aralıklarla sektöre giren uçakların rota kesişim açısına bağlı olarak ortalama gecikme süreleri verilmiştir.

Tablo 3.2 Farklı yoğunluktaki trafiklerin ortalama gecikme süreleri (dakika)

Kesişim açısı (°)	6 dakika	7,5 dakika	9 dakika
5	289,2	256,2	223,2
10	82,4	57,2	36,6
15	57,7	35,9	18,8
20	27,3	8,2	2,3
25	9,9	3,2	1,7
30	8,1	1,6	1,4
35	3,1	1,4	1,2
40	2,9	1,2	1,0
45	2,5	1,1	0,9

Uçuş sıklığına bağlı olarak yapılan incelemede, uçakların simülasyona aynı anda 6, 7,5 ve 9 dakikada bir girmesi sonucu kesişim açısına bağlı olarak ortalama gecikme süresindeki değişim Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kesişim açısının artması sonucu ortalama gecikme her üç durumda da azalmıştır. Fakat trafik yoğunluğu

artıkça ortalama gecikme süreleri artmıştır. Örneğin kesişim açısı 5 derece iken ortalama gecikme süresi 6, 7,5 ve 9 dakika için sırasıyla 289,2, 256,2 ve 223,2 dakika olarak gerçekleşmiştir. Bu bağlamda, küçük kesişim açılarında ortalama gecikme süresi artmakla birlikte, rota tasarımında kullanılacak minimum kesişim açısının belirlenmesinde trafik yoğunluğunun da göz önünde bulundurulması gerektiği söylenebilir.



Şekil 3.8 Farklı kesişim açılarında uçuş sıklığına bağlı ortalama gecikme sürelerindeki değişim

Gecikme süresi, hava trafik operasyonlarının verimliliği açısından önemli parametrelerden birisidir. Bu nedenle, hava sahası, havaalanı ve pist kapasitesi ile havayollarının hizmet kalitesi gecikme süresiyle ilişkilendirilerek verilebilir. (Wang, Zhang ve Xu, 2008) kabul edilebilir uçuş gecikmesinin havaalanı ve hava sahasına bağlı olarak değişebileceğini ancak uzmanların uçuş başı ortalama gecikme süresinin maksimum 3-5 dakika arasında olduğu konusunda hemfikir olduklarını belirtmiştir [43]. Buradan yola çıkarak uçuş başı kabul edilebilir ortalama gecikmeyi 5 dakika kabul edersek 6, 7,5 ve 9 dakika için kullanılacak minimum kesişim açısının sırasıyla 30-35, 20-25 ve 15-20 derece arasında olduğu sonucuna ulaşılabilir. Görüldüğü gibi uçuş yoğunluğunun artması ortalama gecikme süresini de artırdığı için kullanılacak minimum kesişim açısını da artırmaktadır. Diğer taraftan, minimum kesişim açısı kabul edilebilir ortalama gecikme süresine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, kabul edilebilir ortalama gecikme süresi 3 dakika olarak alındığında bu açı daha geniş olacaktır.

3.1.2. Tek sektör içinde kavşak yönteminin uygulanması

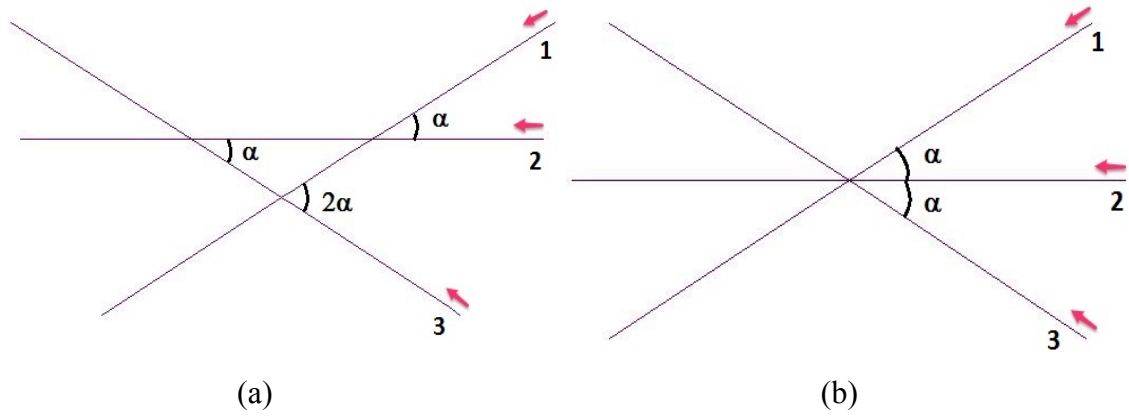
Kavşak yöntemi ile aynı seviyedeki rotalar tek noktada birleştirilir. Bu aşamada, kavşak yöntemi uygulanarak rotaların tek bir noktada birleştirilmesinin sektör kapasitesine etkisi incelenmiştir. Şekil 3.9’da sırasıyla üç farklı noktada (a) ve tek noktada (b) kesişen aynı seviyedeki rotalar gösterilmiştir. Şekil 3.9 (b)’deki yol ağ yapısı geometrik olarak, Şekil 3.9 (a)’daki 2 numaralı rotanın 1 ve 3 numaralı rotaların kesişim noktasına kadar kaydırılmasıyla oluşturulmuştur. Bu bağlamda, her iki modelin sektör kapasitesine etkisinin eşit şartlar altında karşılaştırılabilmesi amaçlanmıştır.

Şekillerde gösterilen yol ağ yapıları simülasyon ortamında tasarlanmıştır. Her bir rota uzunluğu eşit olup FL360 seviyesi için uçakların kategorilerine göre Tablo 2.3’te gösterilen hız değerleri kullanılmıştır. Her bir senaryoda aynı özelliklere sahip 90 adet uçak kullanılmıştır. Ayrıca, 1, 2 ve 3 numaralı rotalardan gelen uçak sayısı eşit ve 30 olup uçakların giriş yönü oklarla gösterilmiştir. Herhangi bir rotadan giren bir uçak aynı rotayı takip etmekte ve yine aynı rotadan çıkmaktadır.

Rotalar arası kesişim açısı α ile gösterilmiştir. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, 1 ile 2 ve 2 ile 3 numaralı rotaların kesişim açısı α iken 1 ile 3 numaralı rotaların kesişim açısı 2α ’dır.

Simülasyon başlama zamanı 10.00, bitiş zamanı ise 12.25’tir. Bu zaman aralığında uçaklar simülasyona 5 dakika arayla 1, 2 ve 3 olarak numaralandırılmış rotalardan aynı anda girmektedir.

İki rota için kesişim açısı gecikme süresi değişiminin incelendiği bölümde kabul edilebilir gecikme süresine bağlı olarak farklı yoğunluktaki uçuşlar için kullanılabilecek minimum kesişim açısının değiştiği ifade edilmişti. Ancak trafik yoğunluğu aynı olsa bile rota konfigürasyonu değiştiği için kesişen üç rota için minimum kesişim açısı kesişen iki rotadan farklı olabilir. Bu bağlamda, küçük kesişim açılarının farklı konfigürasyonlardaki etkilerini incelemek amacıyla en küçük kesişim açısı olarak 15 derece kullanılmıştır. Kesişen üç rota için kesişim açısı eşit olmak şartıyla kullanılabilecek maksimum kesim açısı ise 60 derecedir. Bu açı aynı zamanda kesişen üç rota için, homojen trafik akışında, optimum kesişim açısı olarak ifade edilmiştir. Bu bilgiler ışığında 15, 30, 45 ve 60 derecelik kesişim açılarında kavşak yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı durumlar için toplam 8 adet senaryo oluşturulmuştur.



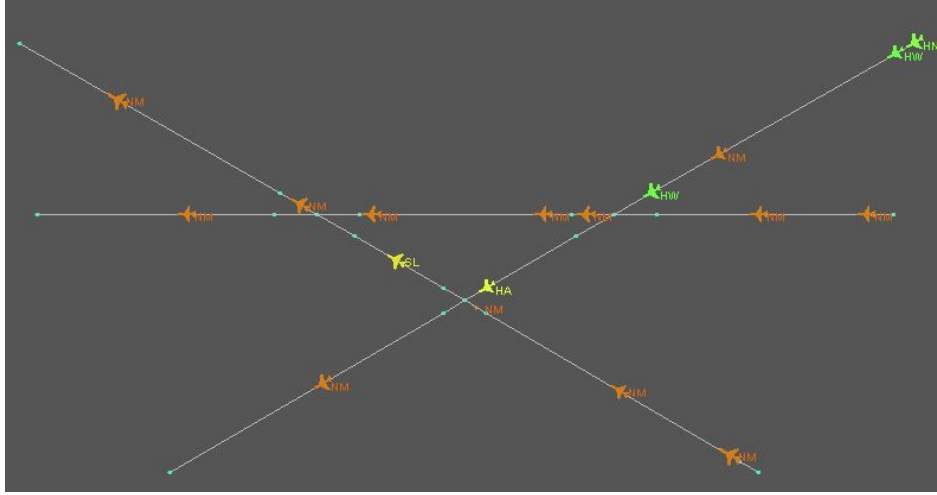
Şekil 3.9 (a) Model 1- aynı seviyedeki rotaların üç ayrı noktada kesişmesi, (b) model 2- aynı seviyedeki rotaların tek noktada kesişmesi

Tablo 3.3’da her bir modelin farklı kesişim açısı için oluşturulan senaryolar gösterilmektedir.

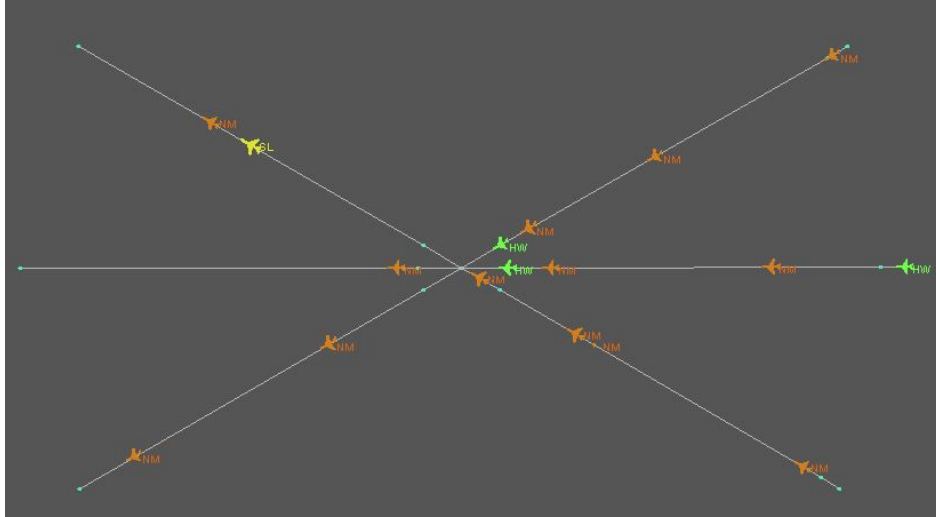
Tablo 3.3 Farklı açılar için SIMMOD’da oluşturulan senaryolar

Modeller	Kesişim açısı	Senaryolar
Model 1	$\alpha=15^\circ$	Senaryo 1
	$\alpha=30^\circ$	Senaryo 2
	$\alpha=45^\circ$	Senaryo 3
	$\alpha=60^\circ$	Senaryo 4
Model 2	$\alpha=15^\circ$	Senaryo 5
	$\alpha=30^\circ$	Senaryo 6
	$\alpha=45^\circ$	Senaryo 7
	$\alpha=60^\circ$	Senaryo 8

Örnek olarak, senaryo 2 ve senaryo 6 için oluşturulan rota yapılarındaki trafik akışları Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

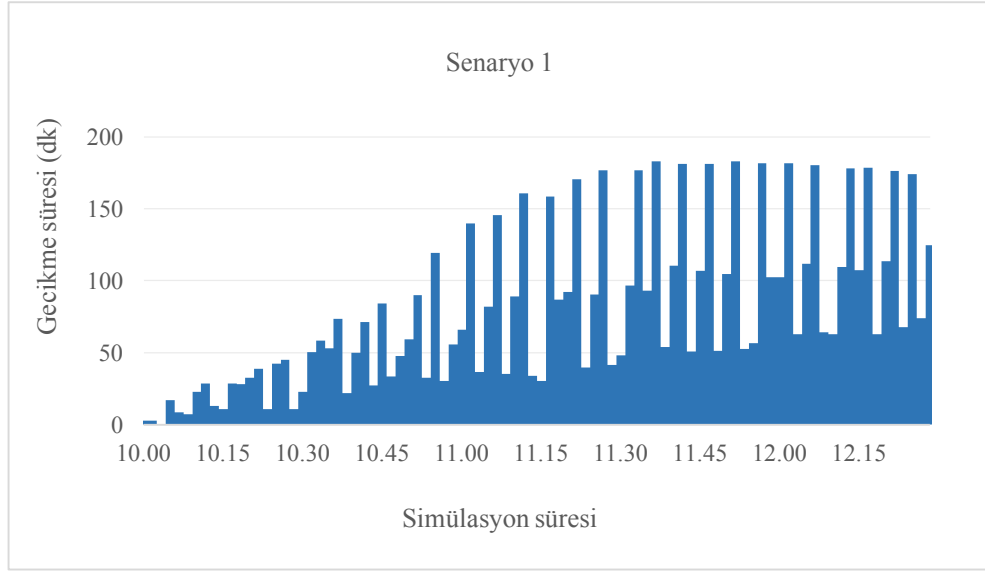


Şekil 3.10 Üç çakışma noktası bulunan tasarım

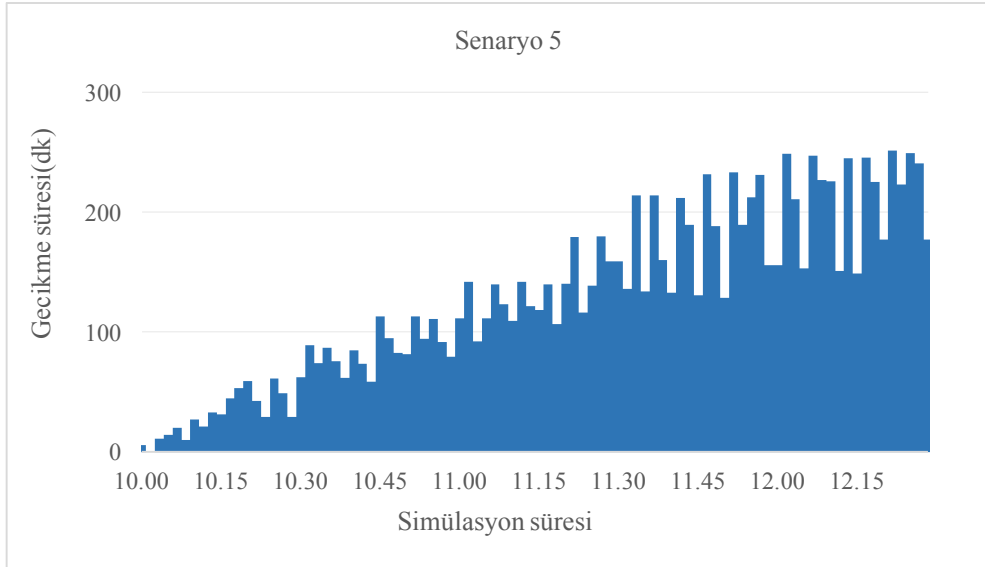


Şekil 3.11 Tek çakışma noktası olan tasarım

Senaryo 1 ve senaryo 5 için uçakların zamana bağlı gecikme dağılımı Şekil 3.12’de verilmiştir. Senaryo 1’de gecikme süresi senaryo 5’e göre genel olarak daha az olsa da her iki tasarımda da gecikme sürelerinin çok fazla olduğu ve zamanla artarak simülasyon sonlarına doğru kabul edilmez seviyelere ulaştığı görülmüştür. Bu durumun sebepleri arasında, trafik yoğunluğunun bu iki konfigürasyon için yüksek olması ve rota kesişim açılarının küçük olması gösterilebilir. Ayrıca, çalışmada seviye değişikliğinin kullanılmaması, çakışma çözümünün sadece hız kısma-artırma, bekletme ve vektör yöntemleriyle çözülmesini gerekli kılmış, bu durum gecikme sürelerinin artmasına sebep olmuştur. Sonuç olarak, bu yoğunluktaki uçuşlar için 15 derecelik kesişim açısının hava sahasında tıkanıklığa ve verimsizliğe sebep olabileceği söylenebilir.



(a)



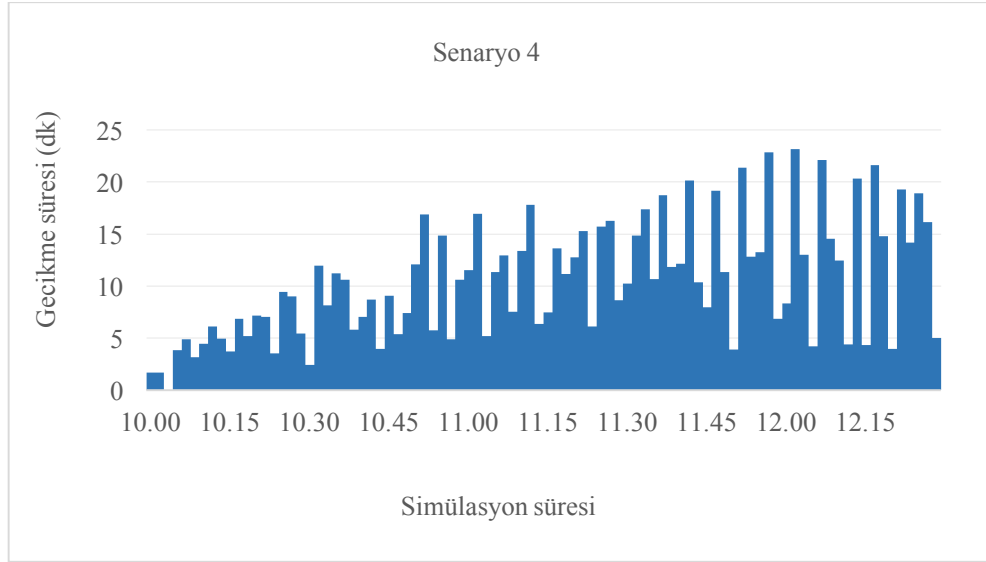
(b)

Şekil 3.12 a) Senaryo 1 için gecikme dağılımı ($\alpha = 15^\circ$), b) Senaryo 5 için gecikme dağılımı ($\alpha = 15^\circ$)

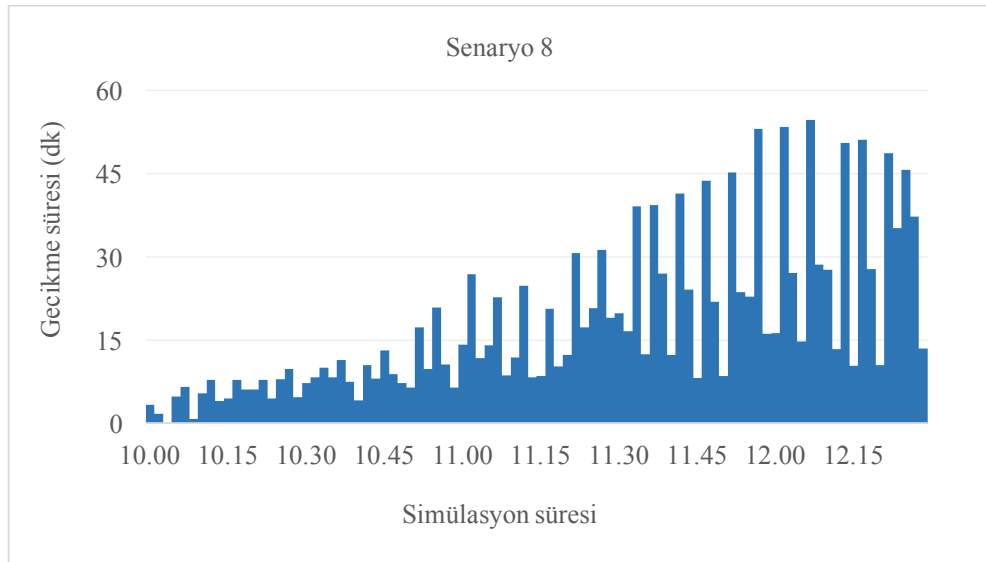
Şekil 3.13’de ise senaryo 4 ve senaryo 8 için gecikme dağılımı gösterilmiştir. Senaryo 4’de en çok gecikmeye uğrayan uçak yaklaşık 23 dakika gecikmiştir. Senaryo 8’de ise, gecikme sürelerinin senaryo 8’e göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek gecikmeye maruz kalan uçak ise yaklaşık 55 dakika gecikmiştir.

Ayrıca senaryo 4’ün gecikme dağılımının diğer senaryolara göre daha düzgün olduğu yani gecikmelerin uçaklara daha eşit bir şekilde dağıldığı söylenebilir. Ayrıca, uçakların gecikme süresindeki artışın sınırlı kalması ve 12.00’den sonra bazı uçakların

gecikme sürelerinin azalmaya başlaması bu tasarımın hava trafik açısından daha yönetilebilir bir trafik akışı sağladığı söylenebilir. Çünkü diğer tasarımlarda gecikmelerin sürekli olarak artması belli bir zamandan sonra uçakların idare edilebilmesini zorlaştırabilir.



(a)

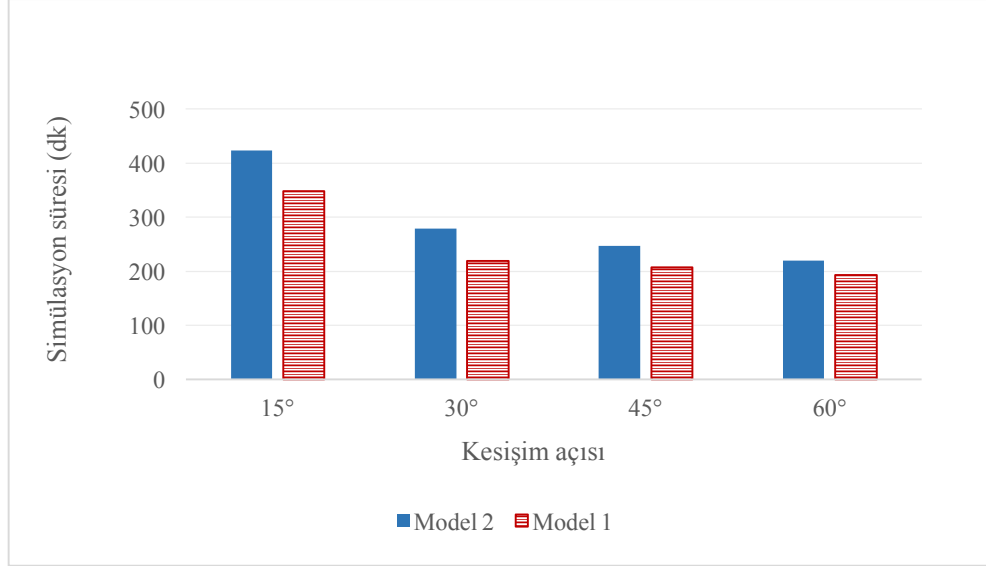


(b)

Şekil 3.13 a) Senaryo 4 için gecikme dağılımı ($\alpha = 60^\circ$), (b) senaryo 8 için gecikme dağılımı ($\alpha = 60^\circ$)

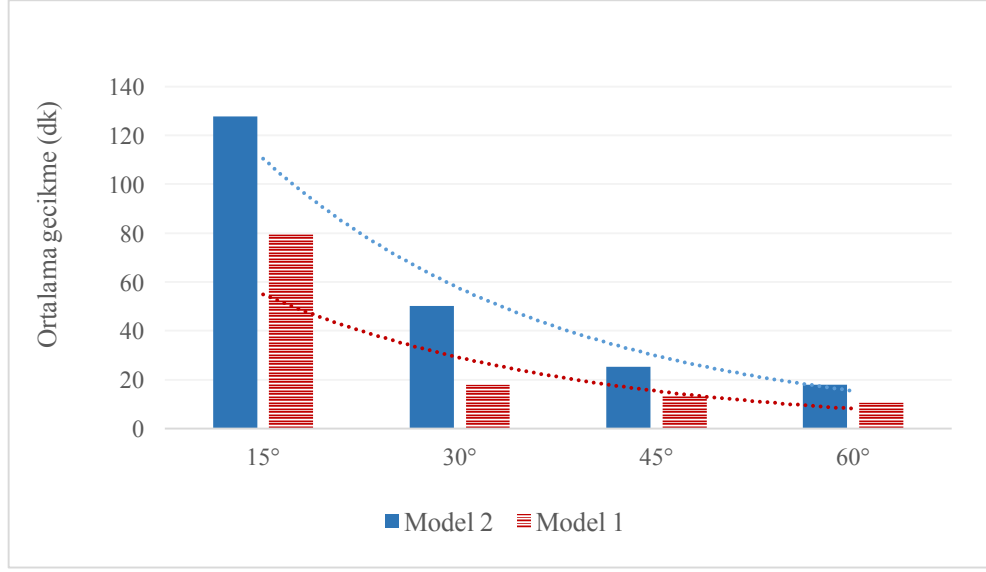
Sektördeki uçakların gecikme sürelerinin fazla olması toplam operasyon süresini de uzatabilmektedir. 15, 30, 45 ve 60 derecelik kesişim açısı için yapılan analizlerde kesişim açısının artması sonucu toplam simülasyon süresinin azaldığı görülmüştür (Şekil

3.14). Ayrıca, kavşak yönteminin kullanıldığı tasarımlarda (model 2) toplam simülasyon süresi, kavşak yönteminin kullanılmadığı tasarımlardan daha fazladır.



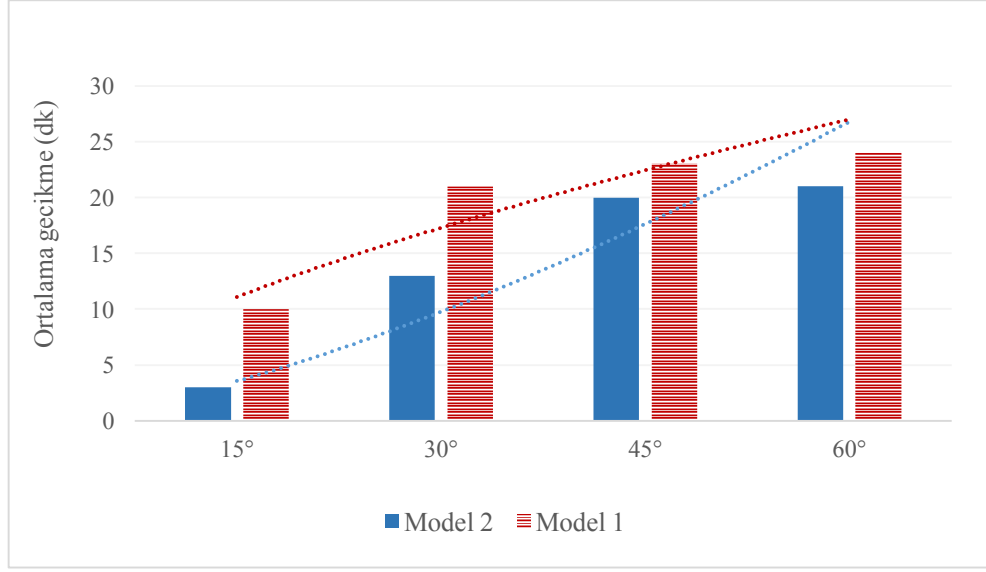
Şekil 3.14 Toplam simülasyon süresi

Şekil 3.15’de her iki tasarımın ortalama gecikme sürelerinin kesişim açısına bağlı değişimi gösterilmiştir. 15°’lik kesişim açısında ortalama gecikme süresi, tek çakışma noktası olan tasarımda 128 dakika iken üç çakışma noktası olan tasarımda 80 dakikadır. Kesişim açısı optimuma doğru yaklaştıkça ortalama gecikme süresinde önemli ölçüde azalma olduğu görülmektedir. Ayrıca, 15, 30, 45 ve 60 derecelik kesişim açıları ile oluşturulan üç ayrı çakışma noktasının kullanıldığı tasarımda ortalama gecikme süresi, diğer tasarımın aynı açı değerine karşılık gelen gecikme sürelerinden daha düşüktür. Diğer taraftan 45 ve 60 derecelik kesişim açılarında tek çakışma noktası olan tasarımın ortalama gecikme süresi sırasıyla 25 ve 18 dakika iken üç ayrı çakışma noktası olan tasarımın aynı açı değerlerindeki ortalama gecikme süresi 13 ve 10 dakikadır. Bu durum, özellikle üç çakışma noktası olan tasarım için, kesişim açısının 45 dereceden 60 dereceye çıkmasının ortalama gecikmeyi çok fazla düşürmediğini göstermektedir.



Şekil 3.15 Kesişim açısına bağlı ortalama gecikme süresi

Şekil 3.16’de her iki tasarım için farklı kesişim açılarının kapasiteye etkisi verilmiştir. Küçük kesişim açılarında kapasiteler çok düşük iken kesişim açısı arttıkça kapasitelerde önemli ölçüde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, Şekil 3.15’deki ortalama gecikme grafiği ile Şekil 3.16’deki kapasite grafiğinin ters yönlü değiştiği görülmektedir. Bu durum, bu çalışmadaki varsayımlar altında, ortalama gecikmenin azalmasının kapasiteyi artırdığını göstermektedir. Öte yandan, kesişim açısı 45 dereceden 60 dereceye çıkartıldığında her iki tasarımda da kapasite artışı yalnızca 1’dir. Kapasitedeki artışın belli bir açı değerinden sonra azalması rota tasarımlarında optimum kesişim açısı kullanılamasa bile optimuma yakın bir değer kullanılmasının maksimuma yakın bir sektör kapasitesine ulaşmak için yeterli olabileceğini göstermektedir. Ek olarak, 15 ve 30 derecelik kesişim açılarında, kapasiteler arasındaki fark sırasıyla 7 ve 8 iken bu fark 45 ve 60 derecelik tasarımlarda 3’tür. Yani, kesişim açısının optimuma doğru yaklaşması tasarımlar arasındaki kapasite farkını azaltmıştır. Bu durum Şekil 3.16’de gösterilen eğim çizgilerinin 60 dereceye doğru birbirine yaklaşmasından da anlaşılabılır. Bu bağlamda, bir sektörde kavşak yöntemi uygulanmak isteniyorsa seçilecek açılar optimum kesişim açısına yakın belirlenmesi, maksimum sektör kapasitesine ulaşabilmek için önemlidir.



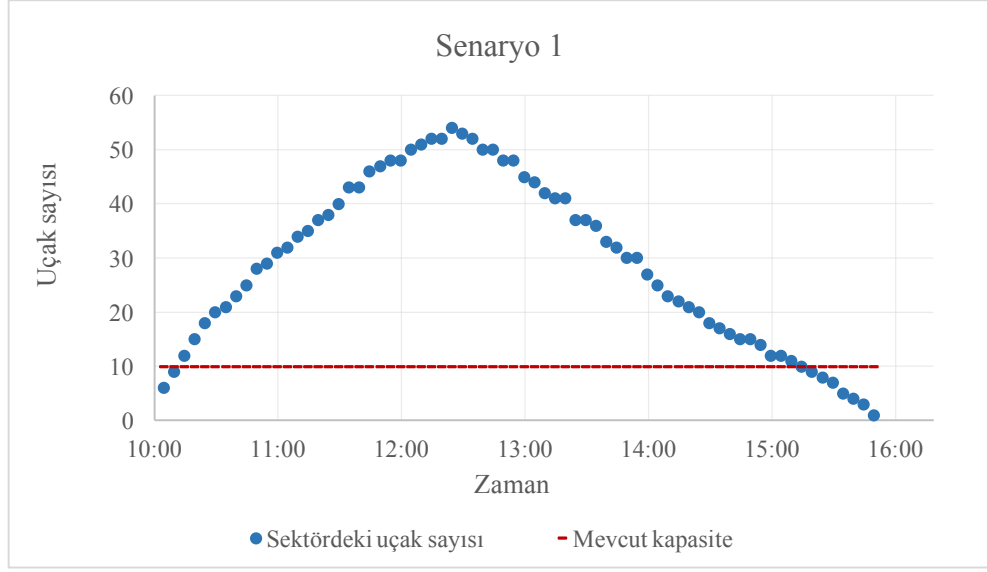
Şekil 3.16 Kesişim açısına bağlı kapasite karşılaştırması

Çalışmanın devamında, modellerin sektör meşguliyetlerini karşılaştırmak amacıyla 15 ve 60 derece için oluşturulan senaryolar incelenmiştir. Bütün senaryolarda uçaklar, saat 10.00 ile 12.25 arası her beş dakikada bir sektöre girmektedir.

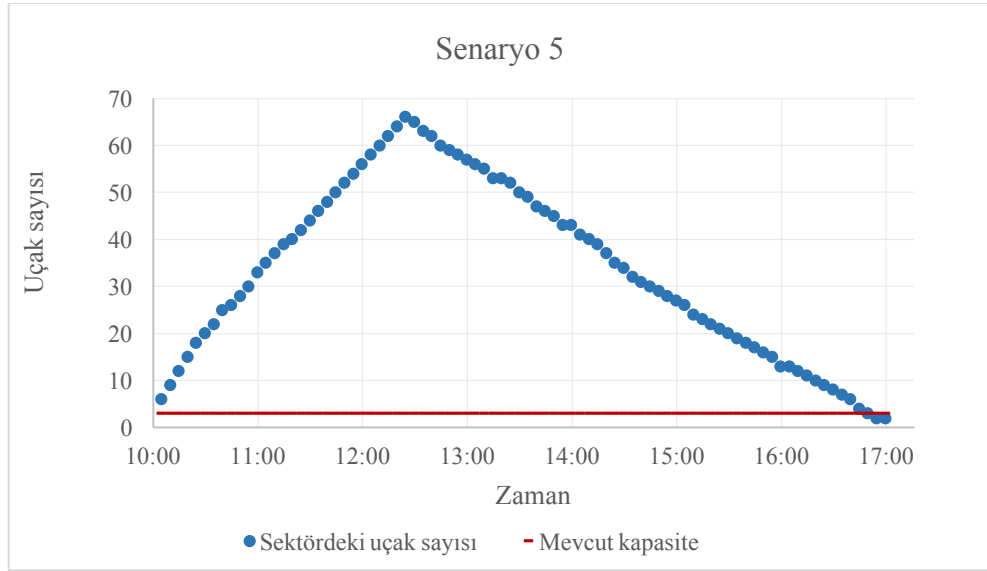
Senaryo 1 ve senaryo 5 için sektörde bulunan uçak sayısının simülasyon süresi boyunca değişimi Şekil 3.17’de verilmiştir. Senaryo 1 ve senaryo 5 için sektörlerin saatlik trafik kapasitesi sırasıyla 10 ve 3 olarak elde edilmişti (Şekil 3.16). Bu kapasite değerleri de grafikte gösterilmektedir. Her iki senaryoda da uçak girişi devam ettiği sürece sektörde bulunan uçak sayısı sürekli olarak artmıştır. Senaryo 1’de sektörde bulunan uçak sayısı, saat 12.25’de 54’e kadar çıkmış bu süreden sonra sektöre yeni uçak girişi olmadığı için uçak sayısı düşmeye başlamıştır. Senaryo 5’de ise sektördeki uçak sayısı sürekli olarak artmış ve 12.25’de 66’ya çıkmıştır.

Tek çakışma noktası bulunan bu tasarımda saatlik kapasitenin 3’e düşmesi, sektörde biriken uçak sayısının daha fazla olmasına neden olmuştur. Diğer bir ifadeyle, sektör kapasitesinin artması sektördeki trafik akışını hızlandırırken kapasitenin düşmesi trafik akışını yavaşlatmakta ve bu durum sektördeki uçak sayısının baş edilemeyecek seviyelere ulaşmasına sebep olmaktadır.

Fakat her iki senaryoda da uçak girişi olduğu sürece sektördeki uçak sayısı artmaya devam etmektedir. Bu durum, 15 derecelik kesişim açısı için hem tek noktada hem de üç ayrı noktada kesişen tasarımların mevcut trafik yükünü kaldıramadığını göstermektedir.



(a)



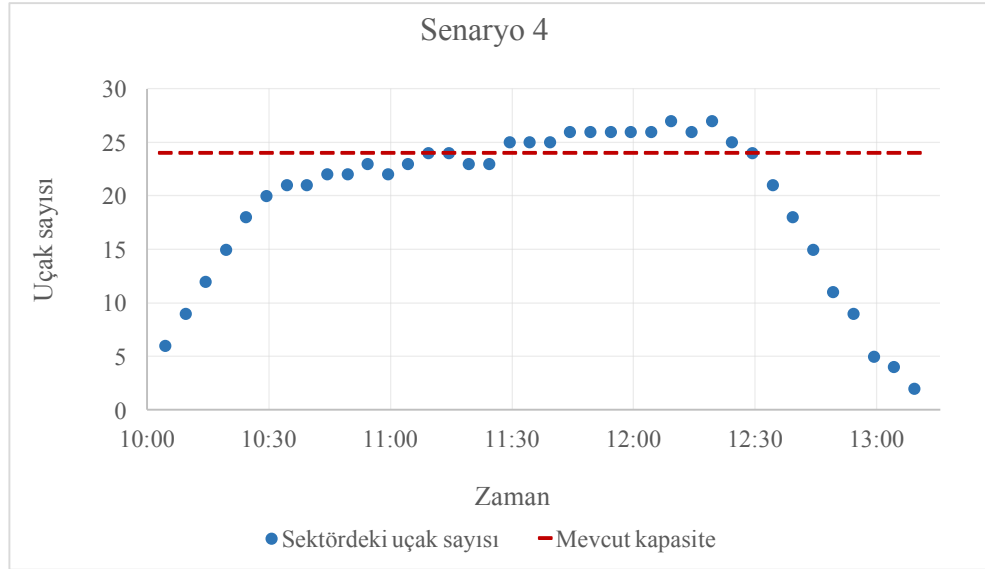
(b)

Şekil 3.17 a) Senaryo 1 için sektör meşguliyeti, b) Senaryo 5 için sektör meşguliyeti

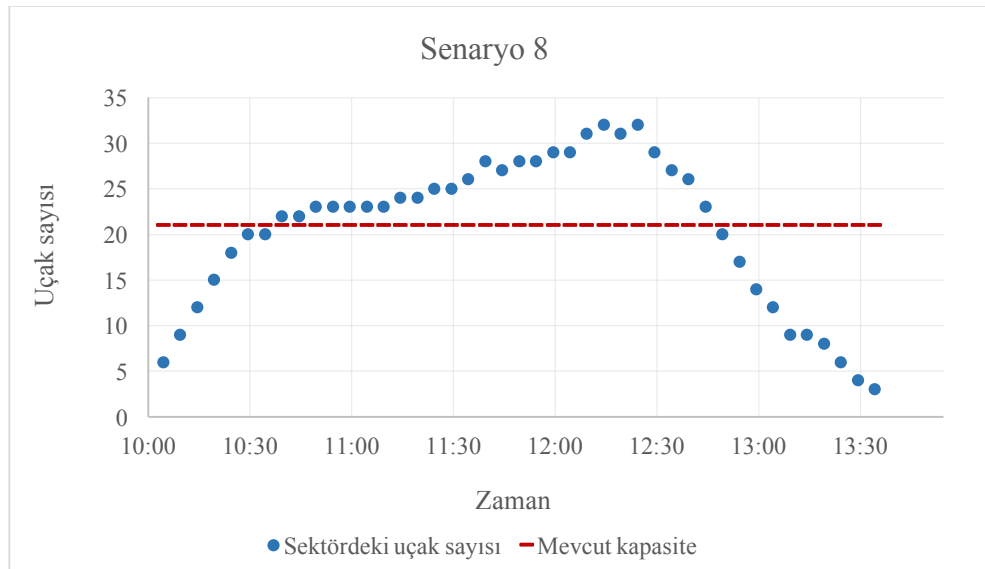
Senaryo 4 ve senaryo 8 için sektörde bulunan uçak sayısı Şekil 3.18’de verilmiştir. Senaryo 4’te sektörde bulunan uçak sayısı 11.10-12.30 arasında 23-27 arasında değişmiştir. Senaryo 8’de ise sektörde bulunan uçak sayısı sürekli olarak bir artış göstermiş ve 12.25’te maksimum seviyesi olan 32 uçağa kadar ulaşmıştır.

Senaryo 4’te, sektörde bulunan uçak sayısındaki artış diğer tasarımlara göre çok daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Ayrıca, sektördeki uçak sayısı 12.20’de 27’ye kadar çıkmıştır. Bu sayı diğer bütün tasarımlardaki pik saatteki uçak sayısından daha azdır. Öte

yandan, diğer tasarımlarda en yüksek uçağa ulaşılan saat olan 12.25'deki uçak sayısı ise 25 olarak gözlemlenmiştir. Bu durum, sektörde bulunan uçak sayısının artış eğiliminde olmadığını göstergesidir.



(a)



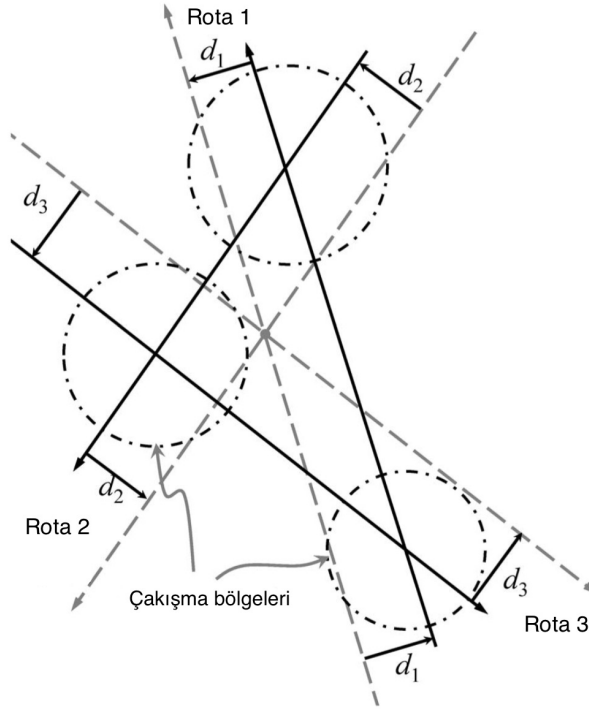
(b)

Şekil 3.18 a) Senaryo 4 için sektör meşguliyeti, b) Senaryo 8 için sektör meşguliyeti

Görüldüğü gibi, farklı kesişim açıları sektör kapasitesine ve uçakların gecikme süresinde etkili olabilmektedir. Ayrıca, kavşak yönteminin uygulandığı durumda ortalama gecikmenin arttığı ve sektör kapasitesinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Diğer taraftan çakışma algılama ve çözümleme çalışmalarında ikiden fazla rotanın tek bir noktada birleştirilmesi yerine ikişerli olarak birleştirilmesinin çakışma çözümünün kolaylığı açısından önemli olduğu belirtilmiştir [51, 52, 58].

(Huang vd., 2014) aynı noktada kesişen üç veya daha fazla rotanın farklı noktalarda ikişerli gruplar halinde kesişmesini önererek çakışma probleminin daha kolay çözüleceğini belirtmişlerdir [51]. Şekil 3.19’da görüldüğü gibi tek noktada kesişen rotaların, yeniden düzenlenmesiyle ikişerli kesişim noktaları belirlenmiştir. Kesikli çizgiler orijinal rotayı düz çizgiler ise düzenlenme sonrasındaki rotayı göstermektedir. Yatay düzlemde orijinal rotadan kaydırılma miktarları ise d_1 , d_2 ve d_3 ile gösterilmiştir.



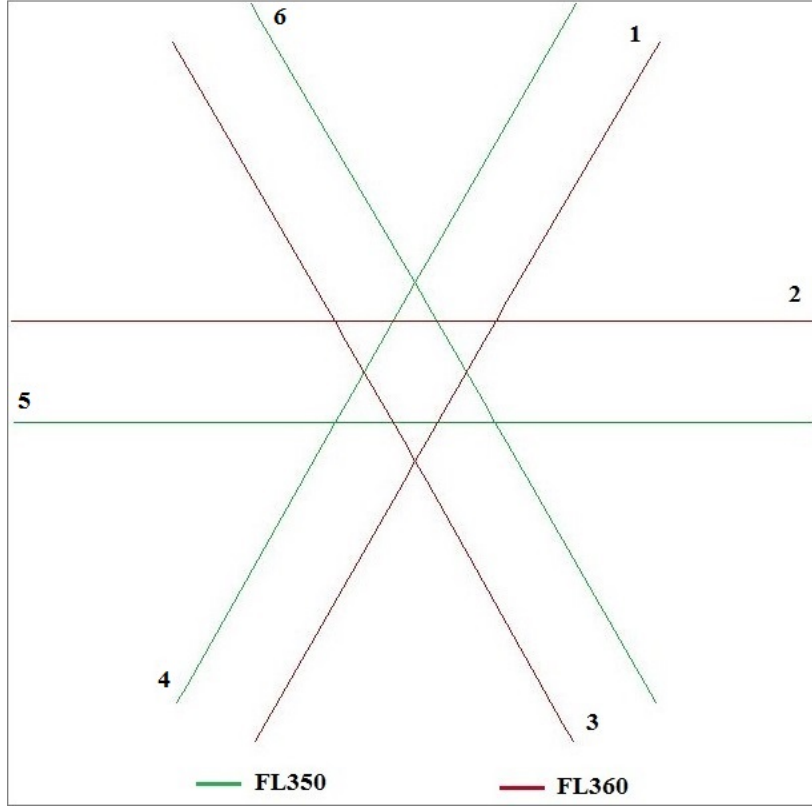
Şekil 3.19 Tek noktada kesişen rotaların ikişerli olarak düzenlenmesi [51]

(Huang vd., 2014)’nin önerdiği bu düzenleme, simülasyon çalışması sonucu elde edilen bulguları desteklemektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla literatürdeki mevcut çalışmalar göstermiştir ki, aynı seviyedeki ikiden fazla rotanın bir noktada birleştirilmesi sektör kapasitesini düşürmesinin yanında çakışma çözümünü de zorlaştırmaktadır.

3.1.3. Kavşak yöntemi ile bir sektörün iki alt sektöre bölünmesi

Kavşak yöntemi ile farklı noktalarda kesişen üç rotanın tek noktada kesişmesiyle çakışma noktalarının azaltılması amaçlanmakta ve böylece yol yapısından dolayı alt sektörlere ayrılamayan sektörlerin iki farklı sektöre bölünmesi mümkün hale gelmektedir. Sektörleri alt sektörlere bölmekteki amaç kontrolör iş yükünün farklı sektörlere yayılmasını sağlamaktır. Böylece, başlangıçta tek bir kontrolör tarafından yönetilen bir sektörün ikiye bölünmesiyle iki farklı kontrolör tarafından yönetilebilmesi mümkün hale gelebilir. Bu çalışmada, kavşak yönteminin kullanılması ile iki farklı sektöre ayrılan bir simülasyon modeli tasarlanmış ve ilk durumdaki sektör kapasitesi (S1 sektörü) ile son durumdaki iki sektörün (S1 ve S2) toplam sektör kapasitesi karşılaştırılmıştır. Tek sektör içerisinde kavşak yönteminin uygulamasıyla kesişim açısının 60 dereceye doğru yaklaşması sonucu kapasitenin arttığı ve bu açı değerinde kavşak yönteminin uygulanmadığı tasarım ile kapasite farkının en aza indiği görülmüştür. Bu nedenle bu kısımda kesişim açısı olarak 60 derece alınmıştır.

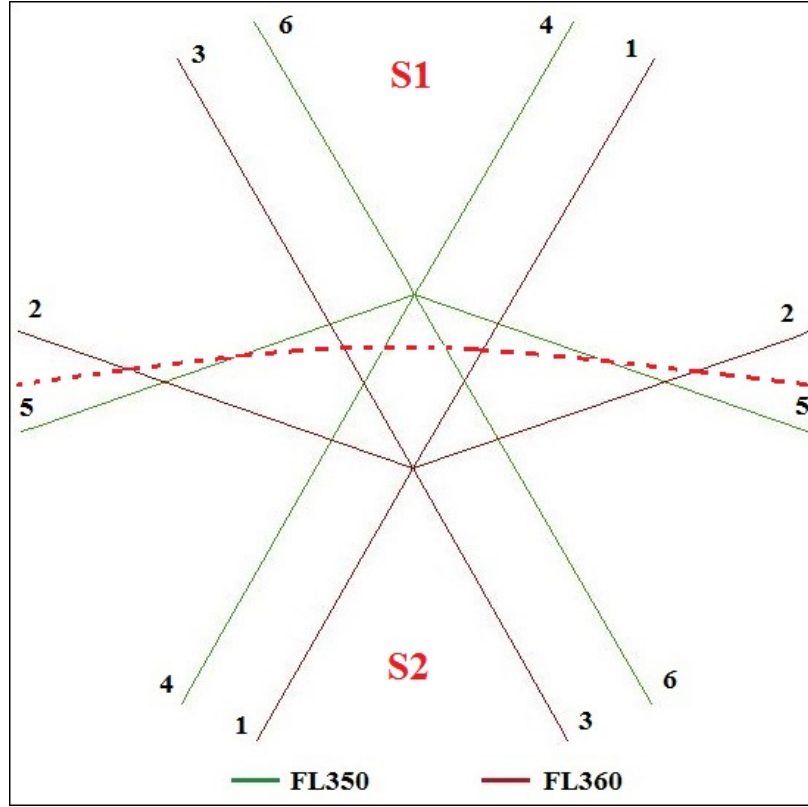
Kesişim açısı 60 derece alınarak kavşak yönteminin uygulanmadığı ve ilk durumu Şekil 3.20'deki gibi olan yol ağ yapısı simülasyon ortamında tasarlanmıştır. Bu tasarım çalışmanın devamında model 3 olarak adlandırılacaktır. Şekilde görülen 1-2, 2-3 ile 4-5, 5-6 rotaları arası kesişim açısı 60 derece iken 1-3 ile 4-6 numaralı rotaların kesişim açıları 120 derecedir. Şekilde, iki farklı seviyedeki rotalar gösterilmiştir. Kırmızı rotalar FL360, yeşil rotalar ise FL350 seviyesindedir.



Şekil 3.20 Model 3: FL360 ve FL 350'daki aynı yönlü rotalar

Şekil 3.20'deki rotalardan aynı seviyede olanlar tek bir noktada birleştirilmesi sonucu yeni bir tasarım oluşturularak Şekil 3.21'deki tasarım elde edilmiştir. Kavşak yönteminin uygulandığı bu tasarım ise çalışmada model 4 olarak kullanılmıştır. Elde edilen yeni tasarımda Şekil 3.20'de gösterilen rotaların başlangıç ve bitiş koordinatları değiştirilmemiştir. Aksi halde, çevre sektördeki yol ağ yapılarının da değiştirilmesi gerekebilir. Böylece kavşak yönteminin ilk durumdaki sektör içerisinde uygulanması ve çevre sektörleri etkilememesi amaçlanmıştır.

FL360 seviyesindeki rotalardan 2 numaralı rota, 1 ve 3 numaralı rotaların kesişim noktasına; FL350 seviyesindeki rotalardan ise 5 numaralı rota, 4 ve 6 numaralı rotaların kesişim noktasına gelecek şekilde yeniden düzenlenmiştir. Bu durumda, sadece 2 ve 5 numaralı rotalarda düzenleme yapılmış diğer rotaların uzunlukları ve konumları değişmemiştir. Ayrıca, Şekil 3.21'deki gibi bir tasarım yapılması durumunda sektörün ikiye bölünebileceği yer kesikli çizgi ile gösterildiği gibi olması durumunda FL360 ve FL350'daki yolların kesişim noktaları sırasıyla S2 ve S1 sektörlerinde kalmaktadır. Şekilde yer alan kesikli kırmızı çizgi örnek olarak gösterilmiş olup sektörün bölüneceği yer operasyonel şartlar göz önünde tutularak belirlenebilir.



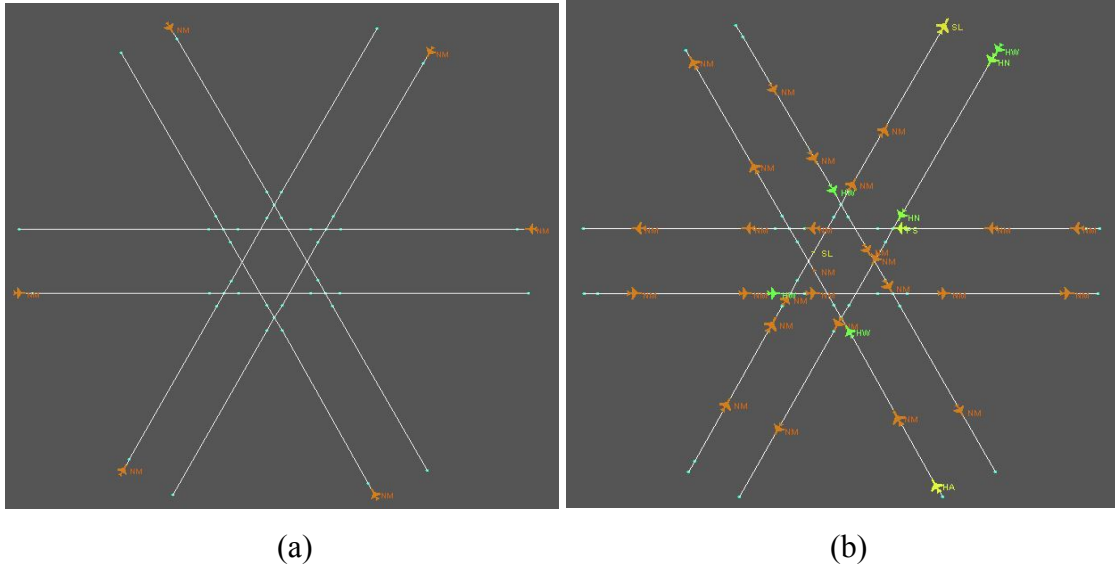
Şekil 3.21 Model 4: FL360 ve FL350'daki rotaların tek noktada birleştirilmesi

Kavşak yönteminin uygulanması sonucu meydana gelen değişimler Tablo 3.4'de verilmiştir. Kavşak yönteminin uygulanabilmesi amacıyla 2 ve 5 numaralı rotaların yeniden düzenlenmesi sonucu kesişim açılarında da değişim olmuştur. FL360'da bulunan rotalardan 1 ve 2 numaralı rotalar arası kesişim açısı 41 dereceye düşerken 2 ve 3 numaralı rotalar arası kesişim açısı 79 dereceye çıkmıştır. 1 ve 3 numaralı rotalarda herhangi bir düzenleme yapılmadığı için bu iki rota arası kesişim açısı değişmemiştir. FL350 seviyesinde ise, 4 ve 5 numaralı rotalar arası kesişim açısı 41 dereceye düşerken 5 ve 6 numaralı rotalar arası kesişim açısı 79 dereceye çıkmıştır. 4 ve 6 numaralı rotalarda herhangi bir düzenleme yapılmadığı için bu iki rota arası kesişim açısı değişmemiştir.

Tablo 3.4 Kavşak yönteminin uygulanması sonucu kesişim açısı ve rota uzunluklarının değişimi

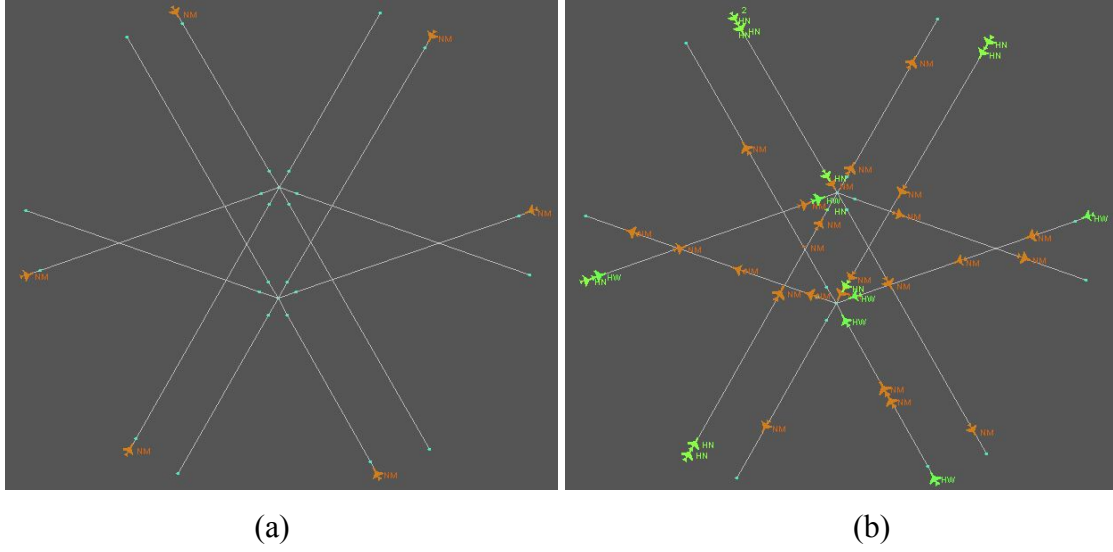
	Rotalar	Model 3	Model 4 (Kavşak yöntemi)	Değişim
Kesişim açısı (°)	1-2	60	41	Azaldı
	2-3	60	79	Arttı
	1-3	120	120	Değişmedi
	4-5	60	41	Azaldı
	5-6	60	79	Arttı
	4-6	120	120	Değişmedi
Rota uzunlukları (NM)	1	200	200	Değişmedi
	2	200	212	Arttı
	3	200	200	Değişmedi
	4	200	200	Değişmedi
	5	200	212	Arttı
	6	200	200	Değişmedi

Model 3 için FL350 ve FL360 seviyelerinde tasarlanmış yol yapılarındaki trafik akışı Şekil 3.22’da gösterilmiştir.



Şekil 3.22 Model 3 için (a) uçakların aynı anda sektöre girişi, (b) FL350 ve FL360’daki trafik akışı

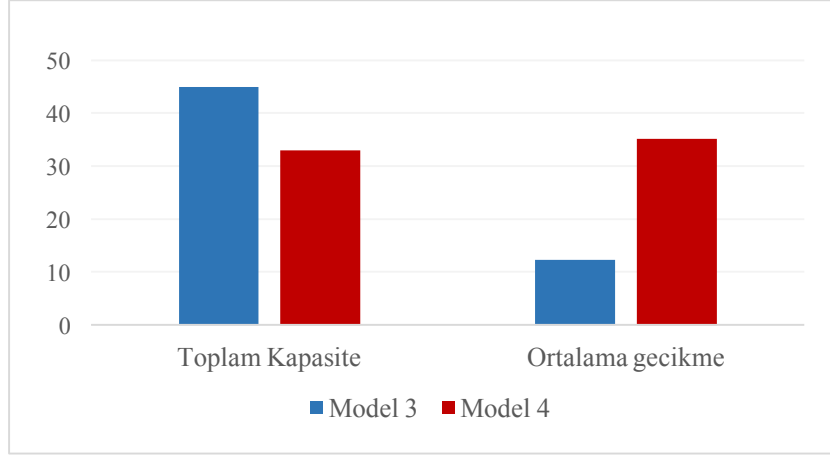
Model 4 için FL350 ve FL360 seviyelerinde tasarlanmış yol yapılarındaki trafik akışı Şekil 3.23’da gösterilmiştir. Şekil 3.22b ile Şekil 3.23b’de gösterilen trafiklerden yeşil renkli uçaklar, herhangi bir andaki gecikmeye uğrayan uçakları, turuncu renkli uçaklar ise gecikmeye uğramayan uçakları temsil etmektedir.



Şekil 3.23 Model 4 için (a) uçakların aynı anda sektöre girişi, (b) FL350 ve FL360'daki trafik akışı

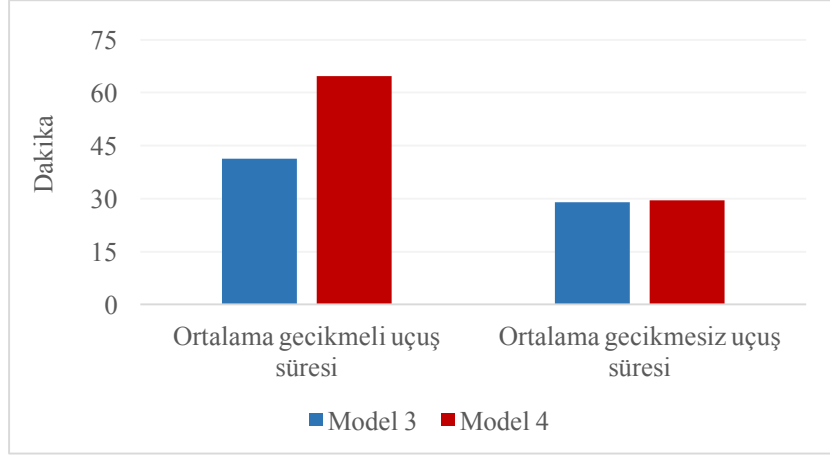
Simülasyon sonuçları analiz edildiğinde model 3 ve model 4 için kapasite ve ortalama gecikme süreleri Şekil 3.24'da verilmiştir. Her iki model için toplam kapasite ve ortalama gecikme FL360 ve FL350'daki toplam 180 uçuş için elde edilmiştir. Model 3 ve model 4 için toplam kapasite sırasıyla saatte 45 ve 33 uçak olarak elde edilmiştir. Tek sektör içinde sadece FL360 seviyesi için yapılan analizde kapasite kavşak yönteminin uygulanmadığı ve uygulandığı durumlar için (kesişim açısı 60 derece olarak alınan tasarım için) saatte 24 ve 21 uçak olarak elde edilmiştir. Burada ise FL360 ve FL350 için her iki seviyede eşit ve 90 uçuş kullanılmıştır. Sonuç olarak FL360 için 24 ve 21 olarak elde edilen kapasitelerin bu analizde 48 ve 42 olarak elde edilmesi beklenebilir. Fakat uçuş seviyesinin azalması sonucu uçuş hızları da azalmış bu durum ortalama gecikmenin artmasına ve kapasitenin azalmasına sebep olmuştur.

Diğer taraftan model 3 için elde edilen kapasite beklenen kapasiteden %6,25 daha azken kavşak yönteminin uygulandığı model 4'de ise %21,43 daha azdır. Model 4'deki azalmanın fazla olması, kavşak yönteminin uygulanması sonucu bazı rota uzunluklarının artmasından ve kesişim açılarının optimum değerden uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, kavşak yönteminin uygulanması ile aynı seviyedeki üç rotanın tek noktada toplanması, hava sahasında tıkanıklığın artmasına sebep olmasının yanında, rota uzunluklarının artması ve kesişim açılarının optimumdan uzaklaşması da kapasiteyi sınırlayan bir faktör olarak karşımıza çıkabilir.



Şekil 3.24 Model 3 ve Model 4 için gecikme ve kapasite karşılaştırması

Uçuş hızının azalması uçukların sektörü daha geç terk etmesine sebep olarak uçuş süresini artırmaktadır. Ayrıca, uçuş hızının azalması çakışma bölgesinde bulunan bir uçağın bu bölgeyi terk etme süresini de artıracaktır. Dolayısıyla eğer varsa çakışma bölgesine girmeyi bekleyen diğer uçağın gecikme süresi de artacaktır. Şekil 3.25’de, FL350 seviyesinde uçuş hızının azalması sonucu uçuş süresinin artmasını göstermek amacıyla her iki model için gecikmeli ve gecikmesiz uçuş süreleri verilmiştir. Gecikmeli uçuş süresi, uçakların sektöre giriş ve çıkış zamanı arasındaki farkı ifade etmektedir. Gecikmesiz uçuş süresi ise gecikmeli uçuş süresinden gecikme süresi çıkarılarak elde edilmiştir. Model 3 ve model 4’ün ortalama gecikmeli uçuş süresi sırasıyla 41,25 ve 64,69 dk. olarak elde edilmiştir. Model 4’nin ortalama gecikmeli uçuş süresi model 3’den 23,44 dakika daha fazla olduğu görülmüştür. Ortalama gecikmesiz uçuş süresi ise sırasıyla 28,95 ve 29,52 dk. olarak elde edilmiştir. Yani uçaklar hiçbir gecikmeye uğramasaydı model 4’ün ortalama uçuş süresi model 3’den 0,57 dk. fazla olacaktı. Bu durumun nedeni model 4’deki 2 ve 5 numaralı rotaların uzunluğunun artmasıdır.



Şekil 3.25 Model 3 ve Model 4 için gecikmeli ve gecikmesiz uçuş süresi

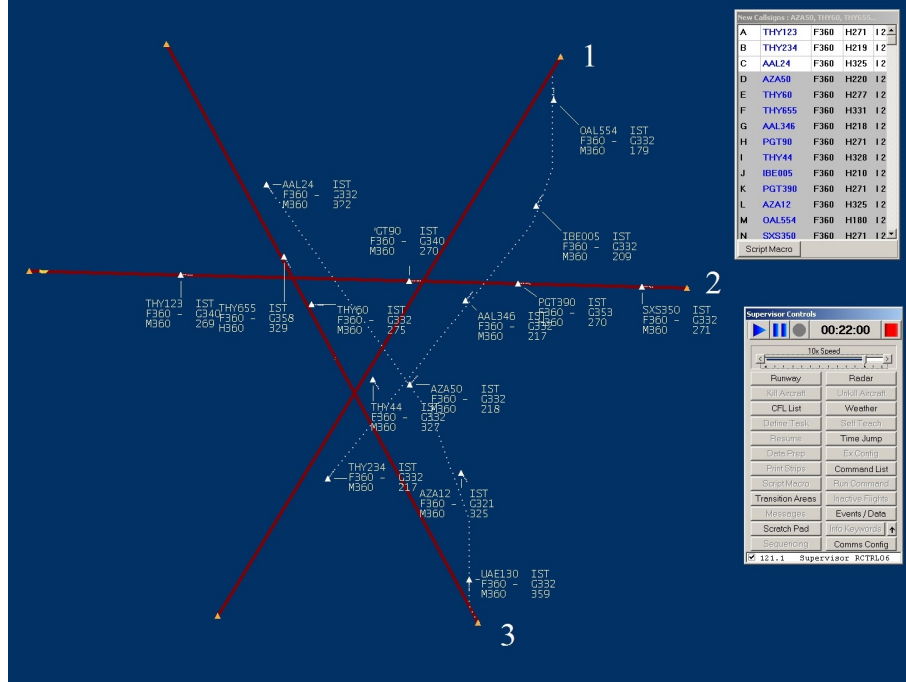
3.2. Gerçek Zamanlı Simülasyon Uygulaması

Hızlı zamanlı simülasyonlarda elde edilen sonuçların gerçek zamanlı simülasyonlarla uyumlu olup olmadığını incelemek için tek sektör içerisinde uygulanan model gerçek zamanlı simülasyon ortamında da incelenmiştir. Gerçek zamanlı simülasyon uygulaması, Anadolu Üniversitesi Hava Trafik Kontrol bölümünde bulunan BEST simülatörü ile yapılmıştır. Simülasyonlar hava trafik kontrol bölümü mezunu, işbaşı eğitiminde olan ve öğrenci hava trafik kontrolörü lisansına sahip kontrolörler tarafından gerçekleştirilmiştir.

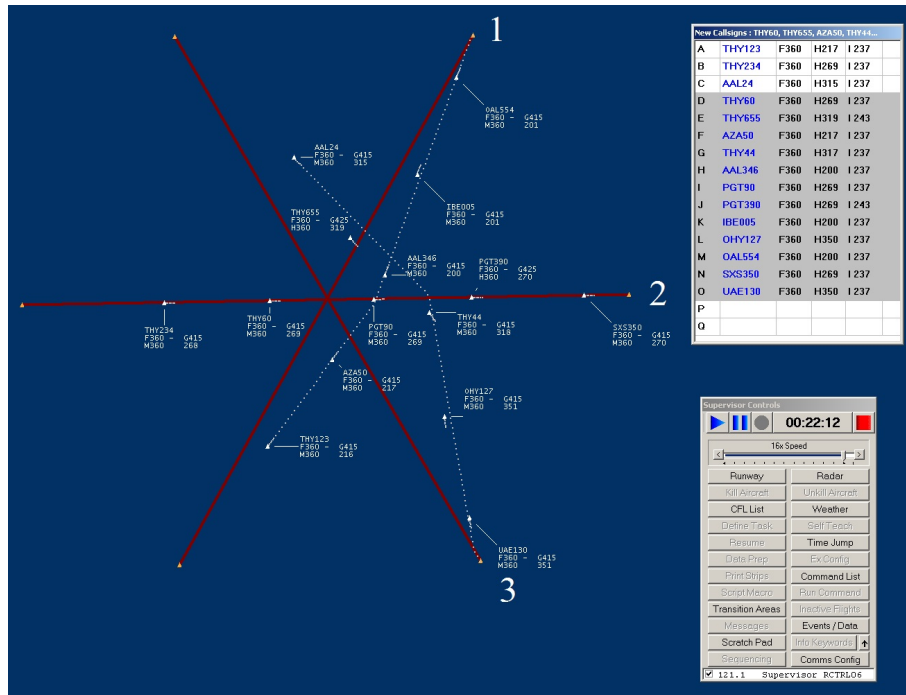
Çalışma kapsamında 60 derecelik kesişim açısı için rotaların üç ayrı noktada kesiştiği tasarım ile bu rotaların tek bir noktada toplanmasıyla elde edilen tasarım FL360 seviyesi için incelenmiştir. Tek sektör içerisinde hızlı zamanlı simülasyonlarla yapılan incelemede sırasıyla senaryo 4 ve senaryo 8 olarak adlandırılan bu tasarımlar gerçek zamanlı simülasyon uygulamasında model 1 ve model 2 olarak kullanılmıştır.

Gerçek zamanlı simülasyonlarda kullanılan uçak sayısı 15 olarak belirlenmiş olup, uçaklar beş dakikada bir, her üç rotadan aynı anda gelmektedir. Ayrıca, hızlı zamanlı simülasyonlar için kabul edilen varsayımlar gerçek zamanlı simülasyonlar için de geçerlidir. Şekil 3.26 ve 3.27’de gerçek zamanlı simülasyon ortamında tasarlanmış modeller ve örnek bir çalışmadan alınmış trafik akışları gösterilmektedir. Beyaz üçgen şekiller uçakları temsil etmekte her uçağın yanında uçak çağrı adı, uçak tipi ve uçuş irtifası gibi bilgiler yer almaktadır. Ayrıca uçakların giriş yaptığı rotalar 1, 2 ve 3 olarak numaralandırılmıştır. Şekillerde görüldüğü gibi bazı uçaklar kendi rotasında uçarken

bazılarının rotasından çıktığı görülmektedir. Bu uçakların takip ettiği yollar kesikli beyaz çizgilerle gösterilmiştir.

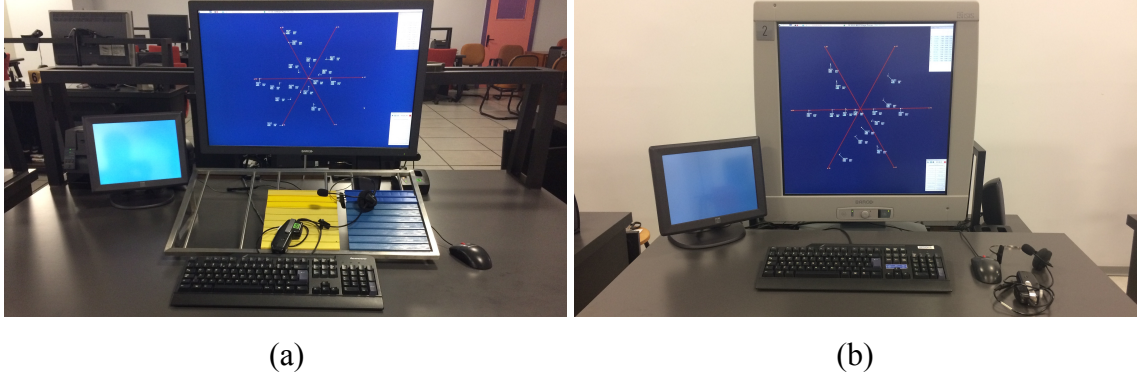


Şekil 3.26 Model 1-trafik akışı



Şekil 3.27 Model 1-trafik akışı

Şekil 3.28’de gerçek zamanlı simülasyon ortamından alınmış kontrolör ve sanal pilot pozisyonları gösterilmektedir.



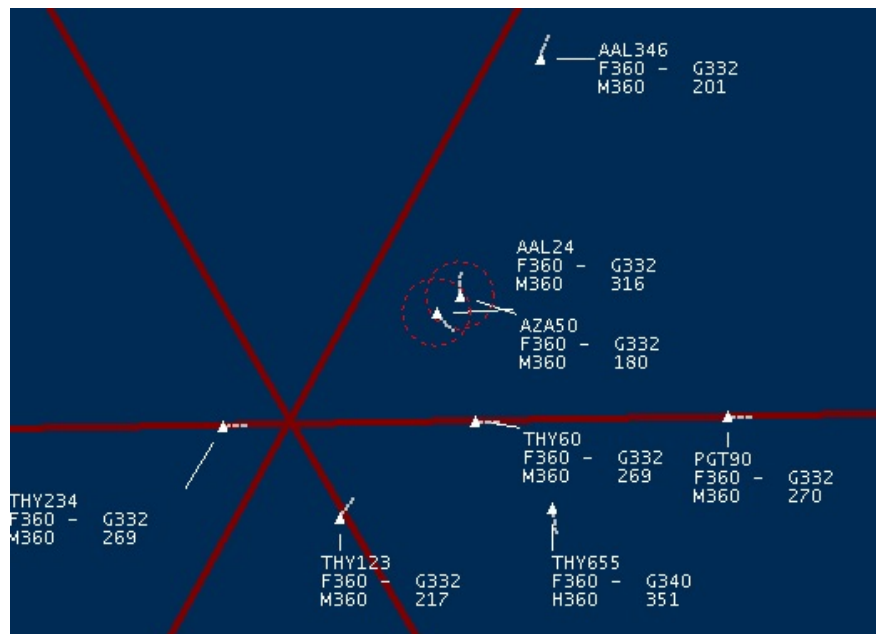
Şekil 3.28 Gerçek zamanlı simülasyonda kullanılan (a) kontrolör pozisyonu, (b) sanal pilot pozisyonu

Gerçek zamanlı simülasyon uygulaması sırasında yaşanabilecek sorunları görmek ve daha doğru sonuçlar elde etmek için gerçek çalışmalara geçmeden önce pilot bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda gözlemlenen sorunlar ve kontrolör görüşleri göz önüne alınarak aşağıdakiler uygulanmıştır:

- a) Pilot çalışma kapsamında, önce model 1 sonra model 2 çalıştırılmış ardından başka bir değerlendirmede önce model 2 sonra model 1 çalıştırılmıştır. Bu iki farklı uygulama sonucunda kontrolörlerin modellerden bağımsız olarak ilk çalışmalarında daha fazla talimat kullandıkları ikinci çalışmalarında bu sayıların azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca ikinci çalışmalarında çakışma sayılarının da azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni iki modelin birbirine benzemesi nedeniyle, ilk çalışma kontrolörün modeli tanımasına ve böylece ikinci çalışmada trafiği daha rahat yönetmesine bağlanmaktadır. Bu durumun önüne geçebilmek için kontrolörlerin yarısı başlangıç olarak model 1’i ardından model 2’yi çalışmış, kalan yarısı ise önce model 2’yi sonra model 1’i çalışmıştır. Böylece ilk çalışma ile ikinci çalışma arasındaki farklılıkların ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.
- b) Çalışma öncesinde, kontrolörlere ilgili sektörü incelemesi ve çözüm stratejisi geliştirmesi için 10 dakika süre verilmiştir.
- c) Gerçek zamanlı simülasyonlarda hızlı zamanlı simülasyonlardan farklı olarak kontrolör-pilot tepki süresi, uygulanan tekniklerin kişiden kişiye değişebilmesi gibi insan davranışlarının etkilerini en aza indirmek için her bir tasarım (model 1 ve model 2) 10 farklı kontrolör tarafından çalışılmıştır.

- Vektör tekniği: Bir uçağın rotasından çıkarılarak çarpışma tehlikesi geçtikten sonra tekrar kendi rotasına dönmesini sağlamaktır.
- Hız tahdidi: Uçağın hızının kısılması ya da artırılmasıdır.

Uçaklar arası mesafenin yatay ayırma minimasının (bu çalışmada 5NM olarak uygulanmıştır) altına düşmesi durumunda çarpışma riski ortaya çıkar. Bu durumda, simülatör çarpışma uyarısı vermektedir ve bu durum çarpışma riski altındaki iki uçağın etrafında beliren kırmızı halkalarla gösterilmektedir. Şekil 3.29’da çakışma pozisyonundaki AAL24 ile AZA50 çağrı adlı uçaklar gösterilmektedir.



Şekil 3.29 Çakışma riskindeki uçakların gösterimi

Talimat sayısı, uçulan mesafe ve çakışma uyarısı gerçek zamanlı simülasyonlar ile elde edilebilecek önemli bulgular olup incelenen modeller bu bulgular açısından karşılaştırılacaktır.

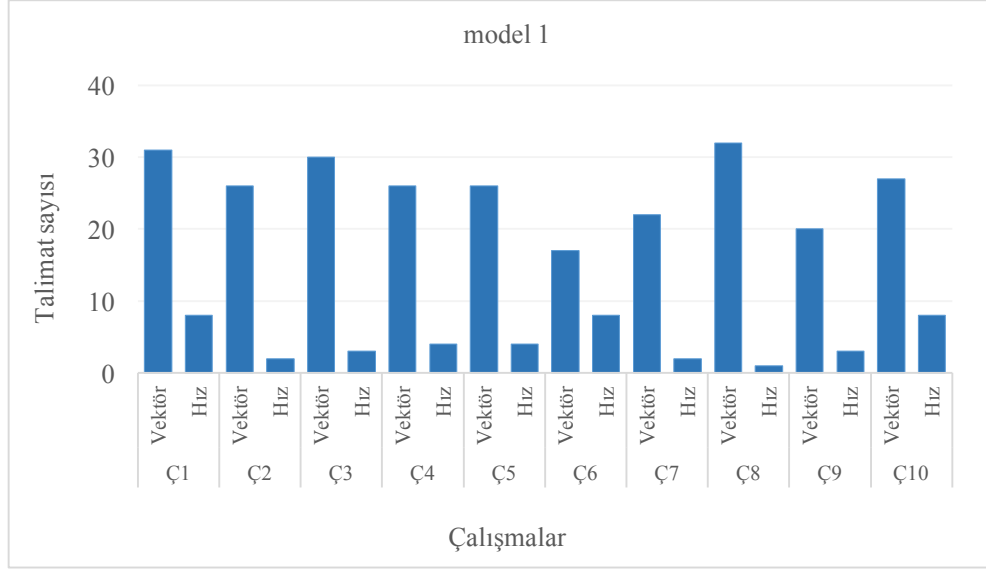
3.2.1. Talimat sayıları

Modeller yatay düzlemde oluşturulduğu için kontrolörlerden alçalma-tırmanma talimatı dışındaki talimatlar kullanılarak trafiğin yönetilmesi istenmiştir. Bu talimatlar ise hız tahdidi, vektör ve bekleme talimatlarıdır. Ancak çalışmanın FL360 seviyesinde gerçekleştirilmesi nedeniyle bekleme talimatı uygulanmamıştır. Kontrolörler potansiyel bir çakışmayı çözmek için bu talimatlardan yalnızca bir tanesini ya da her ikisini de uygulayabilmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, çakışma çözümü için tek başına hız tahdidinin genellikle yetersiz kaldığı görülmüştür. Çünkü hız kısıma ve artırma talimatları belirli sınırlar içerisinde uygulanabilmekte olup bu durum uçaklar arasındaki mesafenin yeteri kadar açılmasını önlemektedir.

Ancak, ağır kategorideki uçaklar orta kategorideki uçaklardan daha hızlı oldukları için, bir ağır ve bir orta kategori içeren bir çakışma problemi, ağır kategorideki uçaklara hız artırma orta kategorideki uçaklara hız azaltma verilerek çözülebilmektedir. Ancak, çalışmadaki ağır kategorideki uçakların sayısının az olması ve bu durumun orta kategorideki uçaklardan farklı bir uygulama gerektirmesi, çalışmaya katılan birçok kontrolörün standart bir prosedür uygulamak adına, ağır kategorideki uçağın hızını azaltıp orta kategorideki uçağın hızını artırarak bu uçakların hızlarını eşitleme yoluna gittiği görülmüştür.

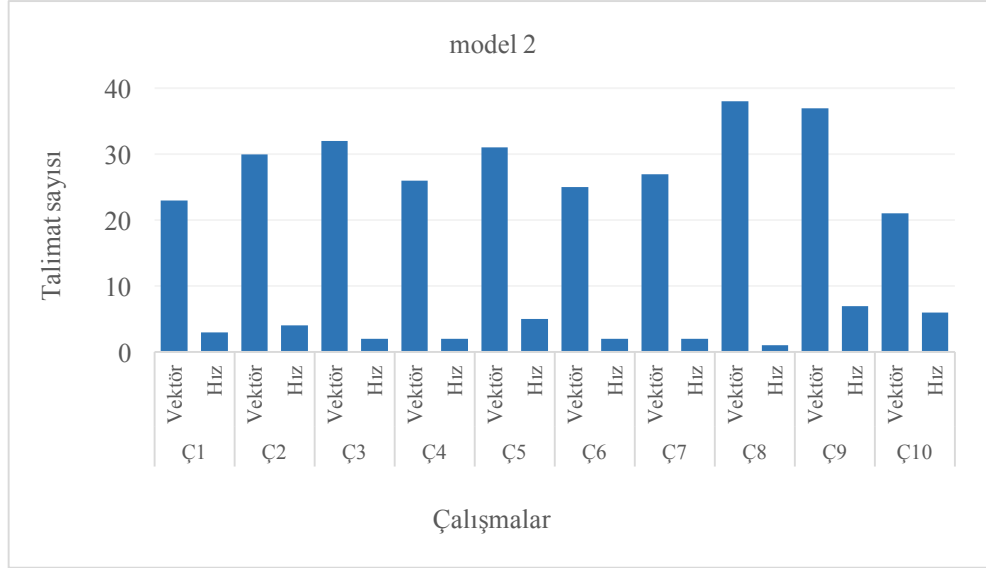
Şekil 3.30'da model 1 için verilen talimat sayıları gösterilmektedir. Model 1 için yapılan çalışmalarda en az 17 en fazla 32 vektör talimatı ve en az 1 en fazla 8 hız tahdidi kullanılmıştır. Vektör talimatının az kullanılması durumunda (Ç6) hız talimatı sayısının diğerlerine göre daha fazla kullanıldığı, vektör talimatının fazla kullanılması durumunda ise (Ç8) hız talimatı sayısının daha az kullanıldığı görülmüştür. Bu durum bazı kontrolörlerin çakışma problemlerini daha çok vektör tekniği kullanarak çözmeyi tercih ettiklerini bazılarının ise hız tahdidi tekniğinden de önemli ölçüde faydalandıklarını göstermektedir.



Şekil 3.30 Model 1-taliimat sayıları

Model 2’de ise en az 21 en fazla 38 vektör talimatı ve en az 1 en fazla 6 hız tahdidi kullanılmıştır. Şekil 3.31’de de görüldüğü gibi model 2’de kullanılan vektör talimatı sayısı artarken hız tahdidi sayısında bir azalma söz konusudur. Bunun nedeni model 2’nin hız tahdidi uygulamak için çok uygun bir tasarım olmamasıdır. Çünkü rotaların tek noktada toplanması ve kesişim noktasından uçakların sektöre girdiği noktalar arası mesafelerin her bir rota için eşit olması (100 NM) bu mesafe boyunca sadece hız talimatının çakışmayı çözmek için yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Fakat model 1’de üç farklı noktada çakışma problemi meydana gelmekte ve bu noktalara yaklaşmakta olan uçakların çakışma noktasına olan mesafeleri farklılık göstermektedir. Örneğin, 1 ve 2 numaradan sektöre giren uçakların çakışma noktasına gelene kadar kat etmesi gereken mesafe eşit ve 80NM, 1 ve 3 numaradan girenler için ise sırasıyla 120NM ve 80NM, 2 ve 3 numaradan girenler için ise bu mesafeler eşit ve 120NM’dir. 1 ve 2 numaralı rotalardan gelen uçaklar için hız tahdidi uygulamak çakışmayı önlemek için yeterli olmamakta fakat 2 ve 3 numaradan girenler için hız tahdidi çakışmayı önleyebilmektedir. 1 ve 3 numaradan gelen ilk uçaklar ise mesafelerin farklı olması nedeniyle bir çakışma riski taşımamakla birlikte 1 numaradan giren ilk uçakla 3 numaradan giren ikinci uçak çarpışma riski taşımaktadır. Bu nedenle 1 ve 3 numaralı rotalardan gelen uçaklar için de hız tahdidi uygulaması bazı durumlarda kullanılabilmektedir. Ancak hız tahdidinin uygulanabileceği bir durumda kontrolör kendi çözüm stratejisi dahilinde hız tahdidi yerine vektör tekniğini

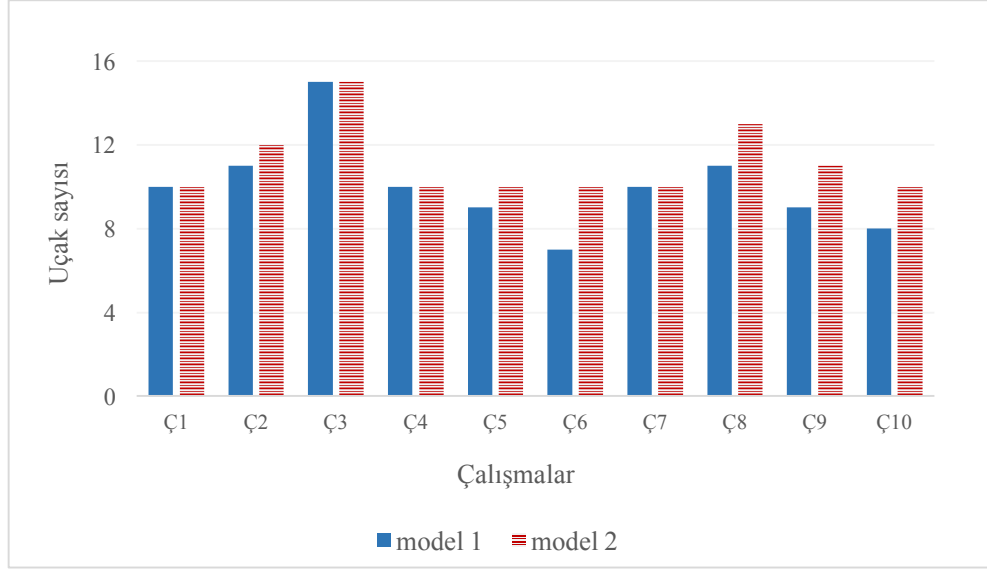
de tercih edebilmektedir. Örneğin, model 1 ve model 2'deki 8 numaralı çalışmalara bakıldığında, kontrolör her iki modelde de sadece 1 defa hız tekniği kullanmıştır.



Şekil 3.31 Model 2-taliimat sayıları

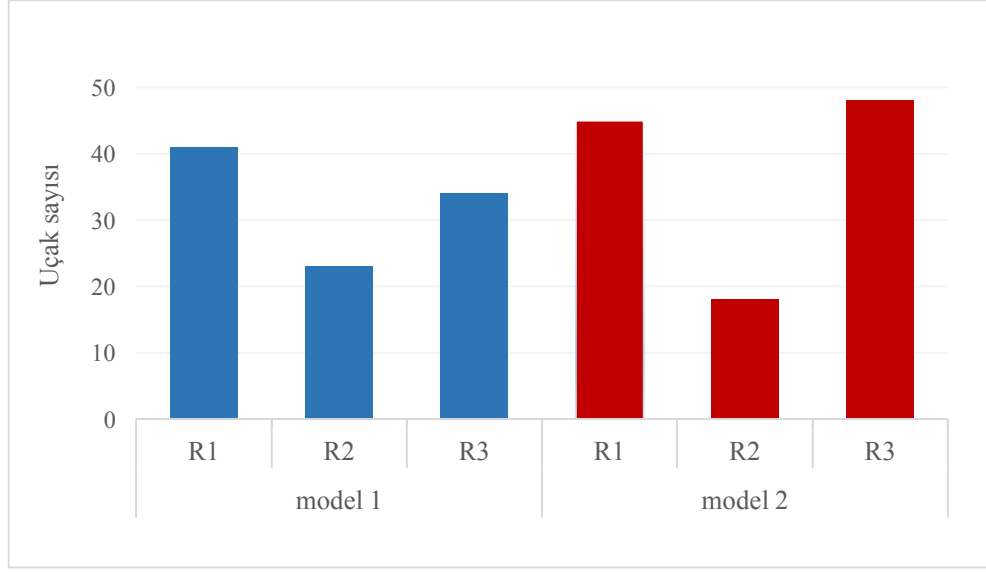
3.2.2. Rotasından çıkarılan uçak sayıları

Çakışmaları önlemek için sıklıkla kullanılan vektör yöntemi, çakışma riski geçene kadar uçağın rotası dışında uçmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, uçağın uçuş mesafesini kısaltmak amacıyla kullanılan direkt rota (direct routing) haricinde, uçağın rotasından çıkarılması ve bu şekilde uzun süre uçuşu hava sahasında verimsizliklere yol açabilir. Çalışmada incelenen modellerdeki rotaların düz olması nedeniyle direkt rota uygulaması uygun olmamaktadır. Dolayısıyla rotasından çıkarılan uçakların hepsi daha fazla mesafe almak durumunda kalmıştır. Şekil 3.32'de, çalışma bazında rotadan çıkarılan uçak sayıları verilmiştir. Ç3'de kontrolör, her iki modelde de uçakların tamamını rotasından çıkarmayı tercih etmiş, Ç6'da ise rotasından çıkarılan uçak sayısı daha azdır. Model 1'de rotasından çıkan uçakların ortalaması 9,8 iken model 2'de 11,1 olarak gerçekleşmiştir. Model 2'de rotaların tek noktada birleşmesi, daha fazla uçağın rotasından çıkarılmasını gerektirmiştir.



Şekil 3.32 Model 1 ve model 2 için talimat sayıları

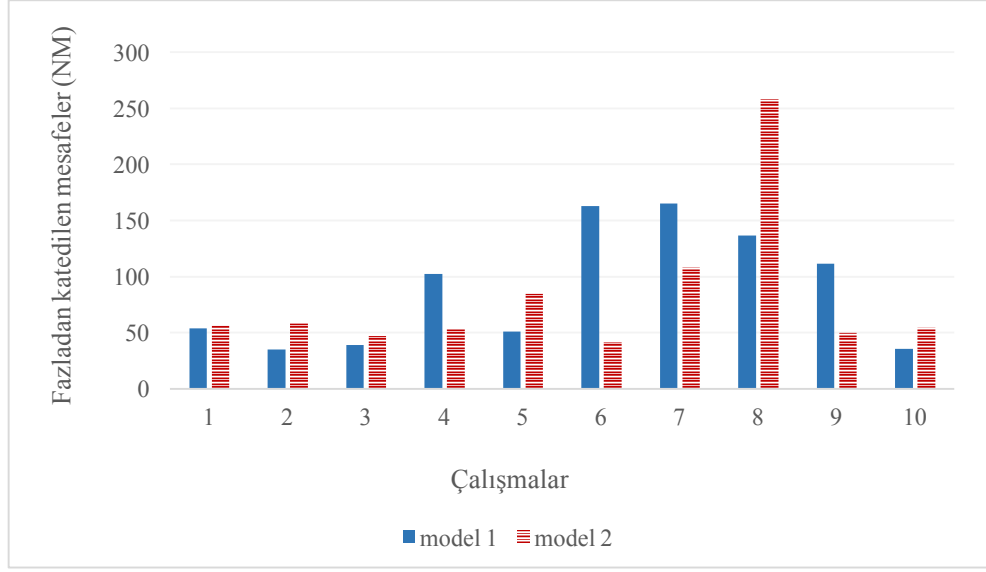
Diğer taraftan, iki modelde de rotasından çıkan uçakların 10 civarında olması kontrolörlerin toplam 15 uçaktan yaklaşık 10 tanesini rotasından çıkararak kalan uçakları rotasında bırakmayı tercih ettiklerini göstermektedir. Şekil 3.33'te model bazında rotadan çıkan uçak sayılarının rotalara göre dağılımını göstermektedir. Genel olarak bakıldığında ikinci rotadan (R2) gelen uçakların rotadan çıkma sayısının diğer rotalardan (R1, R3) gelen uçaklara göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durum, kontrolörlerin daha çok ikinci rotadan gelen uçakları rotasında bırakmayı tercih ettiklerini yani bu rotadan gelen uçaklara daha az vektör tekniği uyguladıklarını göstermektedir.



Şekil 3.33 Rotasından çıkan uçak sayısının rotalara göre dağılımı

3.2.3. Fazladan kat edilen mesafeler

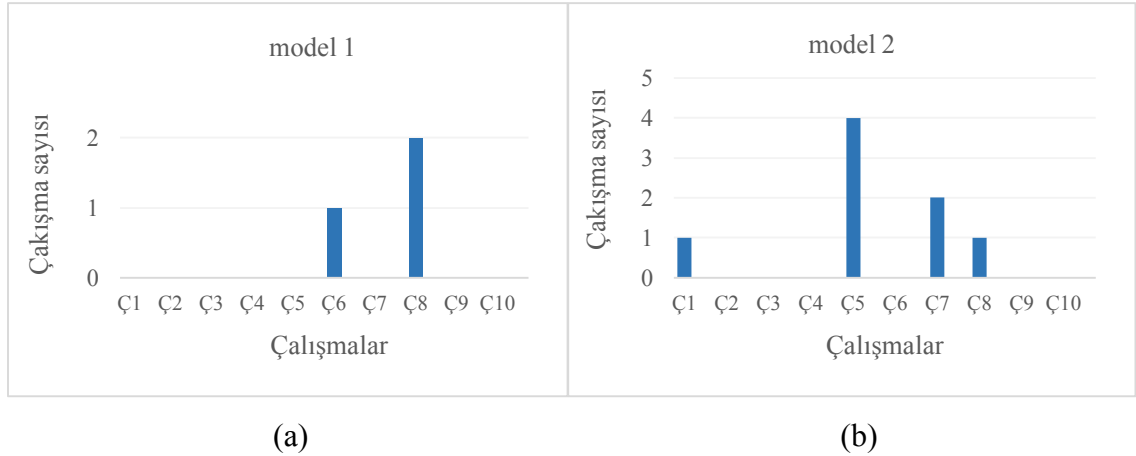
Çalışmada incelenen modelleri eşit şartlar altında karşılaştırmak için her iki modeldeki rotaların uzunlukları eşit ve 200NM olarak belirlenmiştir. Eğer bir uçak kendi rotasından çıkmadan seyahatini tamamlarsa toplam kat ettiği mesafe 200NM olacaktır. Fakat bazı durumlarda, çakışmaları önlemek ve gerekli emniyetli ayırmayı sağlamak için uçakların rotasından çıkarılması gerekmektedir. Bu durumda, söz konusu uçağın toplam seyahat mesafesi artabilir. Şekil 3.34’da çalışma bazında, uçakların fazladan kat ettikleri toplam mesafeler verilmiştir. Örneğin 1 numaralı çalışmayı yapan kontrolör, çakışmaları çözmek için model 1’de uçaklara fazladan 53,60NM, model 2’de ise fazladan 56,10NM mesafe aldırarak durumunda kalmıştır. Çalışma bazında bakıldığında 4 çalışmada model 1’de daha fazla mesafe kat edilmiş 6 çalışmada ise model 2 de daha fazla mesafe kat edilmiştir. En az mesafe 34,80NM ile Ç2’de model 1 için, en fazla mesafe ise 258,3NM ile Ç8’de model 2 için görülmüştür. Bu durumun aksine, ortalama kat edilen fazladan mesafeler model 1 için uçak başına 89,12NM, model 2 için ise 81,12NM olarak elde edilmiştir. Bu durum genel olarak, model 1’deki trafiği yönetmek için uçakların rotası dışında daha uzun süre uçurulduğunu göstermektedir.



Şekil 3.34 Çalışmalara göre fazladan kat edilen mesafeler

3.2.4. Gözlenen çakışma sayısı

Uçaklar arası ayırma minimumlarının ihlal edildiği yani iki uçak arası mesafenin 5NM'ın altına düştüğü çalışmalar ve bu olayın yaşanma sayısı Şekil 3.35'de verilmiştir. Görüldüğü gibi model 1'de 4 farklı çalışmada toplam 8 çakışma tehlikesi yaşanırken model 2'de sadece 2 çalışmada toplam 3 çakışma tehlikesi yaşanmıştır. Bu durum farklı rota konfigürasyonlarının çarpışma riski üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 3.35 (a) Model 1 için çakışma sayıları, (b) model 2 için çakışma sayıları

3.3. Hızlı ve Gerçek Zamanlı Simülasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Herhangi bir hızlı zamanlı simülasyon aracında modelleme işlemi tamamlandıktan sonra birçok farklı değişkenin farklı değerleri için senaryolar çok kısa bir süre içerisinde

düzenlenip sonuçlar hızlı bir şekilde elde edilebilir. Ancak gerçek zamanlı simülasyonlarda, modelleme işlemi tamamlandıktan sonra ilgili senaryoyu en az bir kontrolör ve bir pilot ile çalışmak gerekmektedir. Ayrıca kontrolörler arası çalışma farklılıklarının da göz önünde tutularak ilgili çalışmanın birden fazla yapılması gerekebilir. Bu durumda gerçek zamanlı simülasyonların yürütülmesi, modelleme işlemine göre çok daha fazla zaman alabilmektedir. Ayrıca, gerçek zamanlı simülasyonda çalışacak kişilerin hava trafik kontrolörlüğü eğitimi almış olması gibi bazı şartları da sağlaması gerekmektedir. Bu gibi durumlarda öncelikle hızlı zamanlı simülasyonların tercih edilmesi büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada farklı kesişim açısı, farklı geliş sıklığı ve farklı rota konfigürasyonları hızlı zamanlı simülasyonlarla incelenmiş ve hızlı zamanlı simülasyonlardan elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak belirlenen senaryo gerçek zamanlı simülasyonlarla da incelenmiştir.

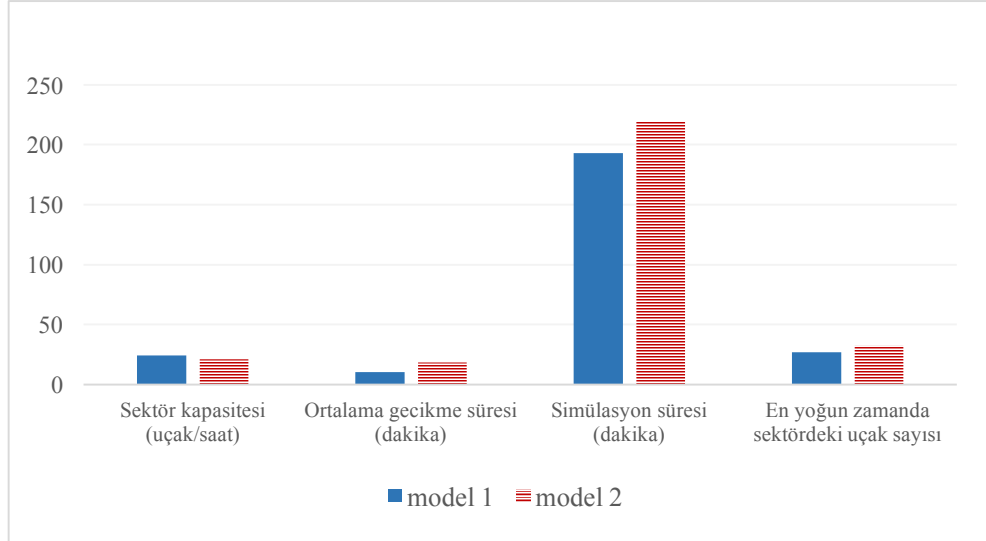
Tablo 3.5’de model 1 ve model 2 için hızlı ve gerçek zamanlı simülasyonlardan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 3.5 Hızlı ve gerçek zamanlı simülasyon sonuçları

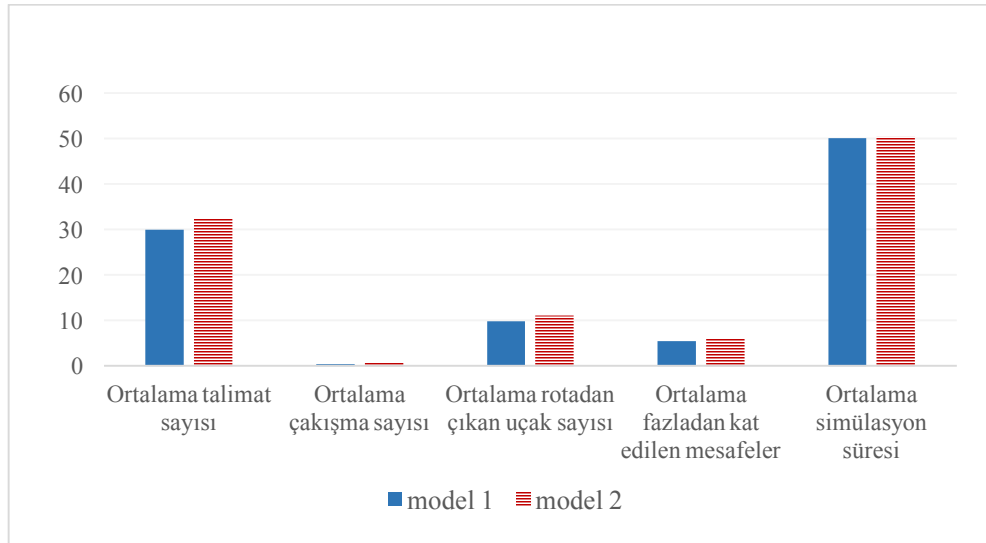
Hızlı zamanlı simülasyon sonuçları		
Ölçümler	Model 1	Model 2
Sektör kapasitesi (uçak/saat)	24	21
Ortalama gecikme süresi (dakika)	10	18
Simülasyon süresi (dakika)	193	220
En yoğun zamanda sektördeki uçak sayısı	27	32
Gerçek zamanlı simülasyon sonuçları		
Ölçümler	Model 1	Model 2
Ortalama talimat sayısı	30	32,4
Ortalama çakışma sayısı	0,3	0,8
Rotadan çıkan ortalama uçak sayısı	9,8	11,1
Ortalama fazladan kat edilen mesafeler (NM)	5,41	5,94
Ortalama simülasyon süresi (dakika)	50,1	50,37

Modeller için hızlı ve gerçek zamanlı simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de verilmiştir. Hızlı zamanlı simülasyonda ölçülen kapasite, ortalama gecikme süresi, simülasyon süresi ve sektördeki maksimum uçak sayısı bakımından model 1’in daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Gerçek zamanlı simülasyonlarda ölçülen ortalama talimat sayısı, çakışma sayısı, rotadan çıkan uçak sayısı, fazladan kat edilen mesafeler ve simülasyon süresi bakımından da model 1’in daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu

nedenle, gerçek zamanlı simülasyon sonuçlarının hızlı zamanlı simülasyon sonuçlarını destekler nitelikte olduğu söylenebilir.



Şekil 3.36 Hızlı zamanlı simülasyon sonuçları



Şekil 3.37 Gerçek zamanlı simülasyon sonuçları

4. SONUÇ

Hava sahasındaki trafik akışının verimli bir şekilde sürdürülebilmesi için hava sahası tasarımında rotaların uygun konum, açısı ve sayıda olması, kesişen rota sayısının ve kesişim noktalarının sektörizasyona uygun bir şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Böylece tıkanıklık ve gecikmeler en aza indirilerek hava sahası kapasitesinin artırılması mümkün olabilir. Bu çalışmada hava sahasındaki farklı rota konfigürasyonlarının sektör kapasitesine ve uçakların ortalama gecikme sürelerine etkisi hızlı ve gerçek zamanlı simülasyonlarla incelenmiştir.

Çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiş olup ilk aşamada kesişen iki rota için kesişim açısı ile gecikme süresi arasındaki ilişki incelenmiştir.

Kesişim açısının artmasının çakışma bölgesinin alanını azalttığı ve bu nedenle kesişim açısı ile ortalama gecikme süresi arasında ters yönlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Özellikle, küçük kesişim açılarında uçakların gecikme sürelerinin çok yüksek olması hava sahasının verimsiz kullanılmasına sebep olabilir. Bu yüzden, rotalar arası kullanılabilecek minimum kesişim açısının belirlenmesi ve söz konusu hava sahası için belirlenen kesişim açısından daha küçük bir kesişim açısının kullanılmaması hava sahası verimliliği açısından önemlidir. Fakat minimum kesişim açısı hava sahasının yapısına ve trafik koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. Ayrıca, trafik yoğunluğu, uçuş hızları, uçuş seviyesi, uçak kategorileri gibi birçok faktör minimum kesişim açısını etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, belirlenen kabuller altında farklı yoğunluktaki trafik koşullarına göre kabul edilebilir gecikme süresi baz alınarak kullanılabilecek minimum kesişim açısı için öneriler geliştirilmiştir.

Uçuş sıklığına bağlı olarak yapılan incelemede, uçakların simülasyona aynı anda 6, 7,5 ve 9 dakikada bir girmesi sonucu kesişim açısına bağlı olarak ortalama gecikme süresindeki değişim incelenmiştir. Kesişim açısının artması sonucu ortalama gecikme süresi her üç durumda da azalırken trafik yoğunluğu arttıkça ortalama gecikme sürelerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, rota tasarımında kullanılabilecek minimum kesişim açısının belirlenmesinde trafik yoğunluğunun da göz önünde bulundurulması gerektiği ortaya konmuştur.

Rotalar arasındaki minimum kesişim açısı, kabul edilebilir gecikme süresi ile ilişkilendirilerek incelenmiştir. Kabul edilebilir gecikme süresi hava sahası, sektörlerin durumu ve trafik yoğunluğu gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmekle birlikte bu süreyi 5 dakika kabul edersek 6, 7,5 ve 9 dakika aralıklarla gelen uçaklar için kullanılabilecek

minimum kesişim açısının sırasıyla 30-35, 20-25 ve 15-20 derece arasında olduğu sonucuna varılmıştır.

İkinci aşamada, tek sektör içerisinde aynı seviyedeki üç rotanın farklı açılarda tek noktada ve üç ayrı noktada ikişerli olarak kesişmesinin sektör kapasitesine ve ortalama gecikme süresine etkisi ölçülmüştür. Çalışma 15, 30, 45 ve 60 derecelik kesişim açıları için kavşak yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı durumlar için gerçekleştirilmiştir.

Kesişim açısı optimuma doğru yaklaştıkça ortalama gecikme süresinde önemli ölçüde azalma olduğu görülmüştür. Ayrıca, 15, 30, 45 ve 60 derecelik kesişim açıları ile oluşturulan üç ayrı çakışma noktasının kullanıldığı tasarımda ortalama gecikme süresi, diğer tasarımın aynı açı değerine karşılık gelen gecikme sürelerinden daha düşük olduğu saptanmıştır. Diğer taraftan kesişim açısı optimuma doğru yaklaştıkça, ortalama gecikme süresindeki azalma hızının düştüğü görülmüştür.

Kapasitedeki artışın belli bir açı değerinden sonra azalması, rota tasarımlarında optimum kesişim açısı kullanılamasa bile optimuma yakın bir değer kullanılmasının maksimuma yakın bir sektör kapasitesine ulaşmak için yeterli olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

İkinci aşamanın devamında hızlı zamanlı simülasyonlarda kapasite ve gecikme süresi bakımından en iyi sonuçların 60 derecelik kesişim açısında elde edilmiş olması nedeniyle, bu açı değeri kullanılarak oluşturulan modeller gerçek zamanlı simülasyonlarla da değerlendirilmiştir. Böylece insan davranışlarının da değerlendirmeye katılması sağlanmıştır. Belirlenen modeller, gerçek zamanlı simülasyonlarda talimat sayısı, çakışma sayısı, rotasından çıkarılan uçak sayısı, fazladan kat edilen mesafeler ve simülasyon süresi bakımından değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçların hızlı zamanlı simülasyon sonuçlarını destekler nitelikte olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, aynı seviyedeki üç rotanın tek noktada birleştirilmesinin hava sahası verimliliğini düşürdüğü hem hızlı zamanlı hem de gerçek zamanlı simülasyonlarla gösterilmiştir. Bu bağlamda, hava sahası tasarımında rotaların mümkün olduğunca ikişerli gruplar halinde kesişmesinin daha yüksek bir sektör kapasitesi açısından önemli olduğu görülmüştür.

Son aşamada ise FL360 ve FL350 seviyesindeki rotalardan oluşan iki farklı sektör, kavşak yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda incelenmiştir. Kavşak yöntemi uygulanması sonucu ilk duruma göre bazı rota uzunluklarının arttığı ve kesişim açılarının değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kavşak yönteminin uygulanması sonucu,

sektör kapasitenin ilk duruma göre %26,67 azalmasına ve ortalama gecikme süresinin 22,87 dakika artmasına sebep olmuştur.

Bu durum kavşak yönteminin dezavantajı olarak nitelendirilebilir. Ancak kavşak yöntemi sayesinde mevcut sektörün iki farklı sektöre bölünmesi sağlandığı için iş yükünün iki farklı sektöre yayılması mümkün olabilir. Bu sayede, kapasiteden bir miktar feragat ederek kontrolör iş yükünün azaltılması sağlanabilir.

Diğer taraftan bazı durumlarda, sektör kapasitesini sınırlayan birincil faktör kontrolör iş yükü ya da kontrolör kapasitesi olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, kontrolörün kapasiteyi sınırlayıcı bir etken olmaması durumunda söz konusu sektörün daha fazla trafik yükünü kaldırabileceği durumlar olabilmektedir. Bu durumda, mevcut sektörün iki farklı sektöre bölünmesi bazı rotaların birleştirilmesini gerekli kılabilir. Kavşak yöntemi sayesinde, önceden tek bir kontrolörün yönettiği sektör artık iki farklı kontrolör tarafından yönetilebilir. Bu durumda, sektör kapasitesini sınırlayan kontrolör iş yükü faktörünün etkisi azaltılarak kapasitede iyileşmeler mümkün olabilir.

KAYNAKÇA

- [1] Majumdera, A., Ochienga, W. Y., Benthamb, J. and Richards, M. (2005). En-route sector capacity estimation methodologies: An international survey. *Journal of Air Transport Management*, 11 (6), 375-387.
- [2] Cavcar, A. (1998). *Temel hava trafik yönetimi*. Anadolu Üniversitesi Yayınları. Eskişehir.
- [3] Dmochowski, P. A. and Skorupski, J. (2016). Air traffic smoothness as a universal measure for air traffic quality assessment. *Procedia Engineering*, 134, 237-244.
- [4] International Civil Aviation Organization (ICAO). (1984). Air traffic services planning manual (Doc 9426). First edition.
- [5] EUROCONTROL. (2016). European route network improvement plan ERNIP (part 1)-European airspace design methodology guidelines. Edition number : 1.6.
- [6] Baric, D., Pilko, H. and Strujic, J. (2016). An analytic hierarchy process model to evaluate road section design. *Transport*, 31 (3), 312-321.
- [7] Hassannejad, H., Medici, P., Cardarelli, E. and Cerri, P. (2015). Detection of moving objects in roundabouts based on a monocular system. *Expert Systems with Applications*, 42 (9), 4167-4176.
- [8] Alkhaledi, K. (2015). Evaluating the operational and environmental benefits of a smart roundabout, *South African Journal of Industrial Engineering*, 26 (2), 191-202.
- [9] Chang, I., Ahn, S. Y. and Hahn, J. S. (2013). Analysis of delay reduction effects on modern roundabouts according to the entry traffic volume. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 17 (7), 1782-1787.
- [10] Frazzoli, E., Mao, Z.H., Oh, J.H. and Feron, E. (2001). Resolution of conflicts involving many aircraft via semidefinite programming. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 24 (1), 79-86.
- [11] Idris, H., Shen, N., El-Wakil, T. and Wing, D. (2009). Analysis of trajectory flexibility preservation impact on traffic complexity. In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. Chicago, Illinois, USA: AIAA.
- [12] Lehouillier, T., Nasri, M. I., Omer, J., Soumis, F. and Desaulniers, G. (2015). Solving the air conflict resolution problem under uncertainty as an iterative bi-objective mixed integer linear program. *Les Cahiers du GERAD*, 111, 1-21.
- [13] Peyronne, C., Conn, A.R., Mongeau, M. and Delahaye, D. (2015). Solving air traffic conflict problems via local continuous optimization. *European Journal of Operational Research*, 241 (2), 502-512.
- [14] Ramamoorthy, K., Crassidis, J. L. and Singh, T. (2004). Potential functions for en-route air traffic management and flight planning. In: *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Providence, Rhode Island, USA: AIAA.
- [15] Chatterji, G. B. and Sridhar, B. (2001). Measures for air traffic controller workload prediction. In: *1st AIAA Aircraft, Technology, Integration, and Operations Forum*. Los Angeles, USA: AIAA.

- [16] Qu, Y.L., Dong, X.H., Li, C. and Zhong, W.Q. (2015). Collision risk estimation in terminal area airspace. In: *12th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*. Guangzhou, China: IEEE.
- [17] Özdemir, M. and Usanmaz, Ö. (2017). Investigation of the impact of the air traffic route configurations on sector capacity. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi A-Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 18 (5), 1031-1041.
- [18] Schier, S., Papenfuss, A., Lorenz, S., Walther, J. and Moehlenbrink, C. (2011). An approach to support controller work-place design in a multi-airport environment using fast and real-time simulations. *CEAS Aeronautical Journal*. 2 (1), 185-193.
- [19] Cetek, C., Cinar, E., Aybek, F. and Cavcar, A. (2014). Capacity and delay analysis for airport manoeuvring areas using simulation. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 86 (1), 43-55.
- [20] Özdemir, M. ve Usanmaz, Ö. (2017). Simülasyon araçlarının hava trafik kontrol alanında kullanımı. 7. *Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon Konferansı*'nda sunulan bildiri. Ankara: ODTÜ.
- [21] Odoni, A.R., Bowman, J., Delahaye, D., Deyst, J.J., Feron, E., Hansman, R.J., Khan, K., Kuchar, J.K., Pujet, N., Simpson, R.W. (1997). Existing and required modeling capabilities for evaluating atm systems and concepts. International Center for Air Transportation Massachusetts Institute of Technology. Final report.
- [22] Wei, G. and Taobo, W. (2010). A Simulation study on airport capacity and the factors. In: *Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*. Chengdu: IEEE.
- [23] ATAC Corporation. (2012). Simmod PLUS reference manual-section 1: introduction. Santa Clara, USA: ATAC.
- [24] Bazargan, M., Fleming, K. and Subramanian, P. (2002). A simulation study to investigate runway capacity using TAAM. In: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. San Diego, CA, USA: IEEE
- [25] Boesel, J. Gladstone, C.X., Hoffman, J., Massimini, P.A., Shiotsuki, C. and Simmons, B. (2001). (2001). TAAM best practices guidelines-MITRE technical report. McLean, Virginia: The MITRE Corporation.
- [26] The AirTOp fast time simulator. (Erişim tarihi: 16.05.2017) <http://www.eurocontrol.int/>.
- [27] <http://airtopsoft.com/>. (Erişim tarihi: 16.05.2017).
- [28] Federal Aviation Administration (FAA). (2014). Initial airspace and procedures feasibility analysis for the proposed south suburban airport. The MITRE Corporation.
- [29] Krammer, P., Junker, O. and Scholz, D. (2010). Aircraft design for low cost ground handling-the final results of the ALOHA project. In: *27th International Congress of The Aeronautical Sciences*. Nice, France.
- [30] CAST Simulation (Erişim tarihi: 17.05.2017). <http://www.airport-consultants.com/cast-simulation>.

- [31] Morlang, F. (2006). Validation facilities in the area of ATM bottleneck investigation. In: *IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference*. Portland, OR, USA: IEEE.
- [32] Majumdar, A., Ochieng, W. Y., McAuley, G., Lenzi, J. M. and Lepadatu, C. (2004). The factors affecting airspace capacity in Europe: A cross-sectional time-series analysis using simulated controller workload data. *Journal of Navigation*, 57 (3) 385-405.
- [33] Kaltenhauser, S. (2003). Tower and airport simulation: flexibility as a premise for successful research. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11 (3), 187-196.
- [34] Vagner, J. and Pappová, E. (2014). Comparison of radar simulator for air traffic control. *NAŠE MORE: Znanstveno-stručni časopis za more i pomorstvo*, 61 (1-2), 31-35.
- [35] Pavlinović, M., Juričić, B. and Antulov-Fantulin, B. (2017). Air traffic controllers' practical part of basic training on computer based simulation device. In: *40th jubilarni međunarodni skup za informacijsku i komunikacijsku tehnologiju*, Croatia: MIPRO.
- [36] Cinar, E., Aybek, F. Cetek, C. and Cavcar, A. (2011). Radar simülâtöründe yeni teknolojilerin kullanımı ve hava trafik kontrol eğitimine katkıları. 4. *Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon Konferansı*'nda sunulan bildiri. Ankara: ODTÜ.
- [37] Li, X., Chen, X.Q., Li, D.B. and Wei, D.X. (2015). Simulation study on runway threshold stagger and utilization pattern of closely spaced parallel runways. In: *Proceedings of the 2015 International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation*. Guangdong Province, China: Atlantis Press.
- [38] Simic, T.K. and Babic, O. (2015). Airport traffic complexity and environment efficiency metrics for evaluation of ATM measures. *Journal of Air Transport Management*, 42, 260-271.
- [39] Yang, P., Gao, W. and Sun, J.Q. (2013). Capacity analysis for parallel runway through agent-based simulation. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1-8.
- [40] Bubalo, B. and Daduna, J. R. (2011). Airport capacity and demand calculations by simulation-the case of Berlin-Brandenburg International Airport. *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking*, 12 (3), 161-181.
- [41] Lee, H. and Balakrishnan, H. (2012). Fast-time simulations of detroit airport operations for evaluating performance in the presence of uncertainties. In: *IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. Williamsburg, VA: IEEE.
- [42] Wei, G. and Siyuan, J. (2010). Simulation study on closely spaced parallel runway analysis using SIMMOD Plus. In: *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Changsha, China: IEEE.
- [43] Wang, C., Zhang, X.Y. and Xu, X.H. (2008). Simulation study on airfield system capacity analysis using SIMMOD. In: *Proceedings of the 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design*. Wuhan, China: IEEE.

- [44] Forbes, S.J. (2008). The effect of air traffic delays on airline prices. *International Journal of Industrial Organization*, 26 (5), 1218-1232.
- [45] Muller, C. and Santana, E.S.M. (2008). Analysis of flight-operating costs and delays: The Sao Paulo terminal maneuvering area. *Journal of Air Transport Management*, 14 (6), 293-296.
- [46] Gao, W., Xu, X.H., Diao, L. and Ding, H.J. (2008). SIMMOD based simulation optimization of flight delay cost for multi-airport system. In: *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Hunan, China: IEEE.
- [47] Lai, C.F. and Zelinski, S. (2009). Simplified dynamic density based capacity estimation. In: *IEEE/AIAA 28th Digital Avionics Systems Conference*. Orlando, USA: IEEE.
- [48] International Civil Aviation Organization (ICAO). (1998). Manual on airspace planning methodology for the determination of separation minima (Doc 9689). First edition.
- [49] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2007). Procedures for air navigation services air traffic management (Doc 4444). Fifteenth edition.
- [50] Özdemir, M. and Usanmaz, Ö. The effect of air route intersection angle on the efficiency of air traffic control operations. In: *9th Ankara International Aerospace Conference*. Ankara: METU.
- [51] Huang, S.M., Feron, E., Reed, G. and Mao, Z. H. (2014). Compact configuration of aircraft flows at intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15 (2), 771-783.
- [52] Devasia, S., Iamratanakul, D., Chatterji, G. and Meyer, G. (2011). Decoupled conflict-resolution procedures for decentralized air traffic control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12 (2), 422-437.
- [53] Iamratanakul, D., Meyer, G., Chatterji, G. and Devasia, S. (2004). Quantification of airspace sector capacity using decentralized conflict resolution procedures. In: *43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Nassau, Bahamas: IEEE.
- [54] EUROCONTROL. (2016). European route network improvement plan (part 2)- European ATS route network. Edition number: 1.0
- [55] NUIC A. (2003). User manual for the base of aircraft data (BADA). Eurocontrol Experimental Centre. Revision 3.5.
- [56] Sabhnani, G., Yousefi, A. and Mitchell, J.S. (2010). Flow conforming operational airspace sector design. In: *10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*. Texas, USA: AIAA.
- [57] Aeronautical Information Public (IAP). (Erişim tarihi: 28.10.2016). <http://ssd.dhmi.gov.tr/>
- [58] Treleven, K. and Mao, Z.H. (2008). Conflict resolution and traffic complexity of multiple intersecting flows of aircraft. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9 (4), 633-643.