

Hava Trafik Yönetiminde Yapay Zekâ Uygulama Süreci

Seda Çeken¹

Özet

Bu kitap bölümü, hava trafik yönetiminde (Air Traffic Management – ATM) yapay zekâ tabanlı dönüşümün kapsamını bütüncül bir yaklaşımla incelemektedir. Öncelikle ATM'nin temel bileşenleri, operasyonel süreçleri ve sistem mimarisi açıklanmakta ve yapay zekânın sisteme entegrasyonunun oluşturduğu paradigma değişimi ele alınmaktadır. Otomasyon düzeyleri, karar destek sistemleri, insan–makine etkileşimi, bilişsel yük ve emniyet yönetimi bağlamında yapay zekâ uygulamalarının gelişen rolü değerlendirilmektedir. Makine öğrenmesi, derin öğrenme, doğal dil işleme, bilgisayarla görme, kestirimci analitik ve çok etmenli pekiştirmeli öğrenme gibi yöntemlerin trafik akışı, kapasite planlaması, operasyonel verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. Bölümün merkezinde ise SESAR (Single European Sky ATM Research) kapsamında yürütülen DIALOG, ORCI, AWARE, SynthAIR, JARVIS, DARWIN, ASTRA ve TRUSTY projeleri yer almaktadır. Bu projelerin teknik yenilikleri, operasyonel çıktıları ve insan faktörleri açısından önemi analiz edilmektedir. Dijital asistanlar, hotspot öngörüsü, karmaşıklık yönetimi, emniyet kestirimi, açıklanabilir yapay zekâ (XAI) ve insan-merkezli tasarım gibi alanlarda bu projelerin ATM dönüşümüne nasıl yön verdiği ortaya konmuştur. Tartışma ve sonuç kısmında ise güvenilirlik, etik yönetim, iş gücü uyumu, beceri kaybı ve siber dayanıklılık gibi kritik unsurlar ele alınmakta ve geleceğe yönelik insan–yapay zekâ iş birliğini güçlendirecek politika ve araştırma önerileri sunulmaktadır.

1 Dr., Öğr. Gör., İstanbul Üniversitesi Havacılık Psikolojisi Araştırmaları Enstitüsü, Havacılık Psikolojisi Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye, sedaceken@istanbul.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5870-2246

1. Giriş

Havacılık sektörü, yapay zekânın (YZ) giderek artan biçimde temel operasyonel sistemlere entegre edilmesiyle beraber hızlı bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Uçuş operasyonlarından bakım faaliyetlerine, havaalanı yönetiminden hava trafik kontrolüne kadar uzanan geniş bir yelpazede YZ verimliliği artırmakta, emniyeti güçlendirmekte ve operasyonel süreçleri yeniden tanımlamaktadır. Güncel piyasa analizlerine göre, YZ artık havacılıkta dijital dönüşümün merkezinde yer almakta ve kestirimci analitik, otomasyon ve uyarlanabilir karar destek mekanizmalarıyla sektörün rekabet gücünü ve sürdürülebilirliğini desteklemektedir (Fortune Business Insights, 2025). Intel, NVIDIA, IBM, Microsoft, Airbus ve Thales gibi küresel teknoloji ve havacılık şirketleri ile Jeppesen, Skywise ve TAV Technologies gibi uzman firmalar uçuş yörüngesi optimizasyonu, bakım süreçlerinin tahmin edilmesi ve kişiselleştirilmiş yolcu deneyimi gibi alanlarda veri temelli çözümler geliştirmektedir. Bu gelişmeler teknolojiyi yalnızca operasyonel bir araç olmaktan çıkarmakta ve sürdürülebilir büyümenin ve stratejik avantajın temel unsuru hâline getirmektedir. COVID-19 pandemisi bu dönüşüm sürecinde hızlandırıcı bir rol oynamıştır. Başlangıçta yaşanan mali kısıtlamalar ve seyahat yasakları nedeniyle teknolojik yatırımlar yavaşlamış olsa da yaşanan kriz dönemi insan gücüne dayalı sistemlerin kırılganlığını açık biçimde ortaya koymuştur. Bu durum, hava yolu şirketlerini ve havalimanlarını otomasyon ve veri temelli karar alma süreçlerine öncelik vermeye yöneltmiştir. YZ destekli kestirimci bakım sistemleri, kalabalık yönetimi ve sağlık tarama teknolojileri bu dönemde öne çıkan uygulamalardan olmuştur. Bugün hava trafik bağlamında da oldukça ön plana çıkan makine öğrenimi (ML) tabanlı hava trafik yönetimi (ATM) araçları, trafik sıkışıklıklarını önceden tahmin ederek çevresel etkileri azaltmakta ve uçuşların zamanında gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Makine öğrenimi (ML) ve derin öğrenme (DL) algoritmaları sayesinde meteoroloji, seyrüsefer ve operasyonel veriler gerçek zamanlı olarak analiz edilmekte ve bu sayede uçuş rotaları dinamik biçimde yeniden düzenlenmektedir. Örneğin, Alaska Airlines 2025 yılında devreye aldığı YZ tabanlı rota optimizasyon sistemiyle yalnızca altı ayda yaklaşık 480.000 galon jet yakıtı tasarrufu sağlamış, bunun hem çevresel hem de ekonomik açıdan ölçülebilir bir kazanım olduğunu raporlamıştır (Fortune Business Insights, 2025).

Uluslararası düzeyde Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO) YZ'yi, havacılıkta verimliliği, emniyeti ve yolcu deneyimini artıran dönüştürücü bir unsur olarak tanımlamaktadır (ICAO, 2025). Otoritenin yayımladığı güncel dokümanlarda dijital dönüşümün artık havacılığın çevresel sürdürülebilirliği kadar operasyonel emniyetin de ayrılmaz bir

parçası olduğu vurgulanmaktadır. Potansiyel YZ uygulamaları ile hava trafik yönetiminde Haberleşme–Seyrüsefer–Gözetim/Hava Trafik Yönetimi / Meteoroloji (CNS/ATM/MET) sistemleri bütününde yer almakta ve büyük veri analitiği ve örüntü tanıma yöntemleri sayesinde hava trafik sıkışıklıkları, potansiyel çakışmalar veya hava koşullarına bağlı riskler önceden belirleneceği öngörülmektedir. Bu potansiyel gelişmeler ile hava trafik kontrolörleri çoklu veriye dayalı karar destek sistemlerinden yararlanarak daha hızlı ve isabetli kararlar alabileceklerdir. Bu gelişmeler, durumsal farkındalığın yalnızca insan merkezli bir gözlem süreci olmaktan çıkarak, insan–makine iş birliğine dayalı bilişsel sistemlere dönüşmesini sağlamaktadır. Ancak bu teknolojik dönüşüm, beraberinde yeni riskler ve etik tartışmaları da getirmektedir. ICAO (2025) ve Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (EASA, 2024a), ileri düzey otomasyonun insan–makine etkileşimini, hava trafik kontrolörlerinin dikkat düzeyini ve durumsal farkındalığını olumsuz etkileyebileceğine dikkat çekmektedir. YZ sistemlerine aşırı güven duyulması, olağandışı ya da acil durum senaryolarında yeni tür operasyonel riskler yaratma gücüne sahiptir. Bu nedenle, YZ'nin ATM'e entegrasyonu yalnızca teknik bir konu değil, aynı zamanda etik, güvenlik ve yönetim meselesidir. ICAO'nun yanı sıra Federal Havacılık İdaresi (FAA) ve EASA, YZ tabanlı sistemlerin sertifikasyonu ve denetlenmesi için özel yol haritaları hazırlayarak insan merkezli ve şeffaf bir yaklaşımın önemini vurgulamaktadır (EASA, 2024a; FAA, 2024). Bu bakış açısı, otomasyonun insanın yerini almak yerine insanın karar alma yetkinliğini desteklemesi gerektiği anlayışına dayanmaktadır.

Operasyonel düzeyde bakıldığında, YZ tabanlı çözümler hava trafiğinde hem emniyet hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından somut iyileşmeler sağlamaktadır. EUROCONTROL (2025), YZ'nin havacılığın iki temel sorununa —*kapasite ve çevresel etki*— aynı anda çözüm üretebileceğini belirtmektedir. Hava trafiği yoğunluğu, meteorolojik veriler ve hava sahası yapılandırılmaları gibi değişkenlerin analiz edilmesiyle YZ sistemleri uçuş rotalarını optimize etmekte, yakıt tüketimini ve gecikmeleri azaltabilir. Bu gelişmeler, Avrupa Yeşil Mutabakatı ve SESAR (Single European Sky ATM Research) programının hedefleriyle de uyum göstermektedir. Ayrıca, YZ destekli karar destek sistemleri, kontrolörlerin iş yükünü azaltırken trafik akışını daha verimli biçimde yönetmelerine olanak tanımaktadır.

Bu bağlamda, SESAR JU (2025a) raporuna göre Avrupa'da ATM bugün önemli bir kavşak noktasındadır. Avrupa hava sahası, artan uçuş sayıları ve yeni hava aracı türlerinin (örneğin sıfır emisyonlu hava araçları, insansız hava araçları ve yüksek irtifa platformları) aynı gökyüzünü paylaşması nedeniyle her zamankinden daha karmaşık bir yapıya bürünmektedir. 2019'da yaklaşık 11 milyon uçuşla rekor seviyeye ulaşan hava trafiği, 2024 itibarıyla yeniden bu

düzeyin üzerine çıkmış ve 2030'a kadar yıllık %5 oranında artış göstereceği, 2050'ye gelindiğinde ise 16 milyon uçuşa ulaşacağı öngörülmektedir. Bu artış, kapasiteyi artırma çabalarının yanı sıra iklim değişikliği, jeopolitik krizler ve güvenlik tehditleri gibi çok boyutlu baskıları da beraberinde getirmektedir. Özellikle 2025 yılı itibarıyla Rusya-Ukrayna savaşı sonucunda Avrupa hava sahasının yaklaşık %20'sinin sivil uçuşlara kapanmış olması, sistemin esnekliğini test eden kritik bir örnektir. ATM'de önemli rol oynayan SESAR girişimleri, bu zorlukların yalnızca ulusal kurumların değil, tüm paydaşların ortak hareket etmesini gerektirdiğini belirtmiştir. Bu doğrultuda SESAR girişimleri ile Avrupa ATM Ana Planı (European ATM Master Plan) ile modernizasyonun yol haritasını oluşturulmuştur. Bu plana göre, 2045 yılı itibarıyla tüm uçuşların kapıdan kapıya (gate-to-gate) optimize edilmesi, hava-yer ve yer-yer bağlantılarının kesintisiz hâle getirilmesi ve karbon nötr bir hava sahası yönetimi vizyonuna ulaşılması hedeflenmektedir. Böylece Avrupa hava sahası emisyonları en aza indiren, gürültü kirliliğini azaltan, yakıt tüketimini optimize eden ve aynı zamanda değişken trafik taleplerine uyum sağlayabilecek ölçeklenebilir, dayanıklı ve çok modlu bir yapıya dönüştürülecektir.

Bununla birlikte, dijitalleşme sürecinde insan faktörü vazgeçilmezdir. EUROCONTROL (2024) ve Uluslararası Hava Trafik Kontrolörleri Federasyonu (IFATCA) hava trafik kontrolörlerinin sahip olduğu deneyim, esneklik ve yargılama gücünün hiçbir otomasyon sisteminde tam olarak ikame edilemeyeceğini vurgulamaktadır. Deneyimli kontrolörler, belirsiz durumlarda sezgisel karar alma, bağlamsal düşünme ve etkili iletişim becerileriyle sistemin emniyet unsurlarındadır. Bu nedenle, YZ'nin ATM'ye entegrasyonu sırasında kontrolörlerin dijital okuryazarlık, adaptasyon yeteneği ve bilişsel dayanıklılık gibi becerilerinin geliştirilmesi kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, açıklanabilir YZ (Explainable AI – XAI) yaklaşımları, insan-YZ iş birliğinde güven ve şeffaflığın artırılmasında temel bir araç olarak öne çıkmaktadır.

YZ ayrıca hava sahası yönetiminin yapısal mimarisini de dönüştürmektedir. Günümüzde akıllı sistemler yalnızca geleneksel rota ve terminal yönetiminde değil, Gelişmiş Hava Hareketliliği (Advanced Air Mobility- AAM) ve Kentsel Hava Hareketliliği (Urban Air Mobility- UAM) gibi yeni operasyonel kavramların entegrasyonunda da rol üstlenmektedir. Bu yeni kavramlar veri yoğunluklu iletişim ve denetim gerektiren karmaşık hava sahası senaryolarını gündeme getirmekte ve YZ'nin gerçek zamanlı algılama, planlama ve öğrenme kabiliyeti bu süreçte belirleyici olmaktadır. Ancak bu teknolojik evrim hesap verebilirlik, veri gizliliği ve etik sorumluluk gibi yeni düzenleyici

sorular doğurmaktadır. ICAO (2025), bu nedenle küresel ölçekte “YZ/CNS/ATM” çerçevesinin oluşturulması gerektiğini vurgulamaktadır.

Bu kitap bölümünde, ATM’de YZ temelli dönüşümün kuramsal çerçevesi ile uygulamadaki yansımaları bütüncül bir perspektiften ele alınmaktadır. ATM’nin bileşenleri ve işlevlerine ilişkin temel kavramsal altyapı sunulduktan sonra, YZ’nin bu sistemde üstlendiği roller, ortaya çıkardığı fırsatlar ve yol açtığı zorluklar disiplinler arası bir bakış açısıyla incelenmektedir. Avrupa’nın tek hava sahasını modernize etmeyi amaçlayan SESAR girişimleri ise bu dönüşümün somut ve operasyonel örneklerini oluşturarak, YZ ’nin akıllı otomasyon, durumsal farkındalık, hava sahası yönetimi, kapasite optimizasyonu ve emniyet artırımı gibi alanlarda nasıl konumlandığını göstermektedir. Bu kapsamda seçilen sekiz proje—DIALOG, ORCI, AWARE, SynthAIR, JARVIS, DARWIN, ASTRA ve TRUSTY—güncel araştırma ve yenilikçilik faaliyetlerinin yönünü belirleyen kritik uygulama alanlarını temsil etmekte olup, ATM’de insan–makine iş birliğinin geleceğine dair önemli bir çerçeve sunmaktadır. Bölümün devamında, bu projelerden elde edilen bulgular doğrultusunda ATM’de YZ teknolojilerinin uygunluk düzeyi, insan faktörleri etkileri, emniyet ve etik gereklilikleri ile sürdürülebilir bir entegrasyonun nasıl sağlanabileceğine ilişkin tartışmalar yürütülmekte ve geleceğe yönelik araştırma ile politika önerileri geliştirilmektedir.

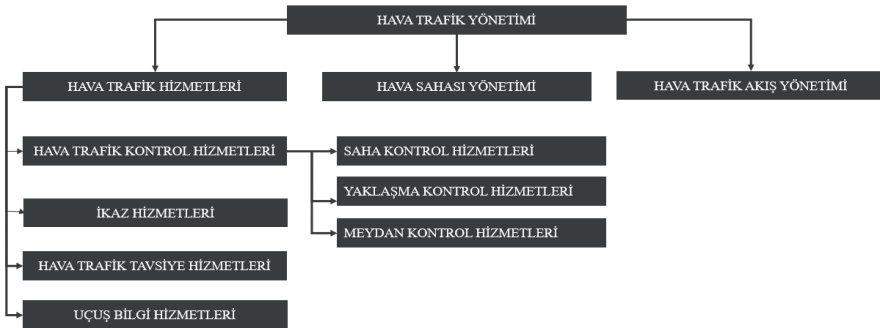
2. Hava Trafik Yönetimi

Hava trafik yönetimi (Air Traffic Management – ATM), hava sahasının ve hava trafiğinin bütüncül biçimde emniyetli, düzenli, verimli ve ekonomik olarak yönetilmesini amaçlayan dinamik bir sistemdir. ICAO’nun 4444 sayılı dokümanında yapılan tanımla ATM hava trafik hizmetleri (Air Traffic Service- ATS), hava sahası yönetimi (Air Space Management-ASM) ve hava trafik akış yönetimi (Air Traffic Flow Management- ATFM) süreçlerinin bütünleşik biçimde yürütülmesini kapsar (ICAO, 2016). Bu süreçler, hem havadaki hem de yerdeki fonksiyonların koordinasyonunu gerektirir ve hava aracı, pilot, kontrolör, havayolu işletmesi, askeri birimler ve havaalanı otoriteleri arasında kesintisiz bir iş birliği üzerine kuruludur (Royal Aeronautical Society, t.y.).

ATM sisteminin temel amacı hava araçlarının tüm uçuş aşamalarında emniyetli ve verimli biçimde hareket etmesini sağlamaktır. Bu sistem uçuş öncesi planlama, hava sahasının tahsisi, uçuşun yürütülmesi ve iniş sonrası süreçleri içeren çok katmanlı bir yapıya sahiptir (Budd, 2020; Sridhar ve Chatterji, 2015; Fewings, 2010). ATM kapsamında görev yapan hava trafik kontrolörleri hava araçlarının çarpışmasını önlemek, trafik akışını düzenlemek ve uçuşların emniyetli bir biçimde gerçekleşmesini sağlamakla yükümlüdür.

Kontrolörler telsiz aracılığıyla pilotlara talimat, bilgi ve izinler verirler. Ayrıca meteorolojik koşulları aktarma, tırmanma ve alçalma seviyelerini belirleme, hava sahasındaki asgari mesafe standartlarını koruma ve olağandışı durumlarda yönlendirme yapma gibi görevleri vardır (SHGM, t.y.).

Avrupa ATM sisteminin merkezinde yer alan EUROCONTROL Pan-Avrupa ölçekte hem sivil hem de askerî havacılığı destekleyen, araştırma-geliştirme, ağ yönetimi, düzenleyici destek ve performans izleme alanlarında uzmanlaşmış bir uluslararası kuruluştur. Üye devletler, hava seyrüsefer hizmet sağlayıcıları, hava yolu işletmeleri, havalimanları ve üretici firmalarla iş birliği içinde çalışan ve ATM hizmetlerini sürdüren EUROCONTROL, Avrupa Komisyonu, EASA ve ulusal denetim otoritelerine teknik ve operasyonel destek sağlamakta ve aynı zamanda Tek Avrupa Hava Sahası (Single European Sky- SES) vizyonunun uygulanmasına doğrudan katkı sunmaktadır. *Network Manager* rolü kapsamında EUROCONTROL, eski Merkezi Akış Yönetim Birimi'nin görevlerini genişleterek Avrupa ATM ağını proaktif biçimde yönetmekte, yaklaşık on milyon yıllık uçuşun planlanması ve optimize edilmesini koordine etmektedir. Buna ek olarak Maastricht Upper Area Control Centre aracılığıyla dört ülkenin üst hava sahasında hava trafik kontrol hizmeti sağlamakla beraber emniyet yönetimi, performans değerlendirme, SESAR Ar-Ge faaliyetleri ve hava-yer/sivil-asker entegrasyonu gibi kritik alanlarda Avrupa çapında standartların geliştirilmesine öncülük etmektedir (EUROCONTROL, t.y.). Türkiye'de hava trafik kontrol hizmetleri, Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü (DHMİ) tarafından yürütülmektedir. Bu kapsamda, saha kontrol (Area Control), yaklaşma kontrol (Approach Control) ve meydan kontrol (Aeorodrome Control) üniteleri ulusal ve uluslararası düzenlemelere uygun şekilde faaliyet göstermekte ve hava araçlarının yer ve hava hareketlerini koordineli biçimde yönetmektedir (DHMİ, t.y.).



Şekil 1: ATM Yapısı

Kaynak: (Tuncal, 2025a)

2.1. ATM'nin Bileşenleri ve İşlevleri

ATM bileşenleri Şekil 1'de gösterilmektedir.

2.1.1. Hava Trafik Hizmetleri (ATS)

ATS hava araçlarının emniyetli ve düzenli biçimde hareket etmesini sağlamak amacıyla verilen temel hizmetlerdir. Bu hizmetler, hava trafik kontrol hizmeti (Air Traffic Control- ATC), uçuş bilgi hizmeti (Flight Information Service- FIS) ve ikaz hizmetini (Alerting) kapsamaktadır. Kontrolörler, uygun ayırma standartlarını uygulayarak çarpışma riskini ortadan kaldırır, tırmanma ve iniş izinlerini verir, hava durumu ve trafik bilgilerini paylaşırlar. Ayrıca, uçuş ekibinin taleplerini değerlendirerek optimum uçuş seviyelerini sağlar ve bekleme sürelerini azaltarak uçuşun sürekliliğini desteklerler (Aditya vd., 2024; Vossen vd., 2011;).

2.1.2. Hava Trafik Akış Yönetimi (ATFM)

ATFM'in amacı, hava trafiğinin kapasiteyle uyumlu biçimde akmasını sağlamak ve yoğunluk kaynaklı gecikmeleri en aza indirmektir. Bu kapsamda, belirli sektörlerde aşırı trafik birikiminin önüne geçmek için uçuş zamanları (Calculated Take-off time- CTOT), yönlendirme kısıtlamaları veya kapasite artırıcı sektör planlamaları yapılmaktadır (Chen vd., 2024; Xu vd., 2020). Bu süreç, mevcut durumun ötesine geçerek geleceğe yönelik planlamalar içerdiği için “*pretaktik*” bir yaklaşımdır. FAA (2025) akış yönetimi ve hava trafik kontrolü arasındaki farkı vurgulayarak, kontrolörlerin taktiksel müdahalelerde bulunduğunu, akış yöneticilerinin ise sistemin bütünsel performansını optimize eden stratejik kararlar aldığını belirtmektedir.

2.1.3. Hava Sahası Yönetimi (ASM)

ASM sınırlı bir kaynak olan hava sahasının sivil ve askerî kullanıcılar arasında etkin biçimde tahsis edilmesini hedeflemektedir (Galotti, 2019; García-Heredia vd., 2019). Bu kapsamda hava yolları, irtifa seviyeleri, kontrol bölgeleri ve geçici tahsisli sahalar belirlenmektedir. ASM, yalnızca yapısal düzenleme değil, aynı zamanda esnek hava sahası kullanımı (Flexible Use of Airspace – FUA) prensibini de içermekte ve böylece sivil-asker koordinasyonu güçlendirerek hava sahasının toplam kapasitesi artırılmaktadır (Budd, 2020).

3. Hava Trafik Yönetiminde Yapay Zekâ

Son yıllarda hava trafiğindeki artış, hava sahasının karmaşıklığı ve iklim kriziyle bağlantılı çevresel hedefler, ATM alanında YZ ve ML uygulamalarını

stratejik bir gereklilik hâline getirmiştir. YZ, hem emniyet ve kapasiteyi artırmak hem de gecikmeleri, yakıt tüketimini ve emisyonları azaltmak için kullanılan temel bir dönüştürücü teknoloji olarak konumlanmaktadır. Alanyazındaki güncel derleme çalışmaları, YZ yöntemlerinin ATM'in tüm ana alt alanlarında artan ölçüde benimsendiğini ortaya koymaktadır (Abdillah vd., 2024; Tang vd., 2022).

EASA'nın yol haritasında ATM/ANS alanında MÖ tabanlı uygulamaların “önemli konuşlandırmalar” düzeyine ulaştığı ve operasyonlarda YZ destekli asistanların hâlihazırda kullanılmaya başlandığı vurgulanmaktadır (EASA, 2024a). Bu asistanlar, özellikle hava trafik kontrolörleri ve akış yönetim pozisyonlarına yönelik karar destek işlevleri sunmakta ve dört boyutlu (4D) uçuş profili tahminlerini iyileştirerek yerel ve ağ düzeyindeki durum değerlendirmelerinin doğruluğunu artırmaktadır. Sektör konfigürasyonları, trafik yoğunluğu, meteorolojik koşullar ve hava sahası kısıtlamaları gibi çoklu faktörlerin YZ/DL modelleri ile birlikte işlenmesi, uçuş rotalarının dinamik olarak optimize edilmesini ve uçuş süresinin, yakıt tüketiminin ve işletme maliyetlerinin azaltılmasını mümkün kılmaktadır (EASA, 2024a; SESAR JU, 2025a). Bu tür optimizasyonlar, gecikmeleri ve ortaya çıkabilecek diğer sorunları azaltarak hem ağ kapasitesini artırmakta hem de çevresel etkiyi sınırlamaya katkı sağlamaktadır.

YZ'nin ATM'deki en görünür kullanım alanlarından biri trafik akış tahmini ve optimizasyonudur. DL modelleri, özellikle uzun-kısa süreli bellek (LSTM) yapıları, sektörel ve ağ düzeyinde trafik akışı tahmini, yoğunluk analizi ve slot planlamasında kullanılmaktadır. Bu sayede daha isabetli talep-kapasite dengesi kurulabilmektedir (Da Cruz, 2024; Gui vd., 2020; Kaczorowski, 2025; Moreno vd., 2024; Taylor vd., 2024;). Diğer bir kritik alan çakışma tespiti ve çözümüdür. Pekiştirmeli öğrenme ve çok-etmenli sistemler karmaşık ve yüksek yoğunluklu hava sahalarında otomatik çakışma algılama ve çözüm stratejileri geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu durum, kontrolörlerin taktik kararlarına destek veren öngörücü araçlar ortaya çıkartmaktadır (Guleria vd., 2024; Nilsson vd., 2025; Papadopoulos vd., 2023). Dand vd. (2019) ile Ortner vd. (2022), LSTM tabanlı dijital asistanların hem çatışma öngörüsü hem de hava durumuna bağlı kapasite kayıplarının yönetimi açısından denetleyici iş yükünü azalttığını göstermektedir.

YZ aynı zamanda denetleyici destek sistemlerinin kapsamını ve doğasını dönüştürmektedir. Farklı araştırmalarda, denetleyici iş yükü, dikkat düzeyi ve performansını değerlendirmek amacıyla göz izleme gibi fizyolojik göstergelerin ve operasyonel verilerin birlikte analiz edildiği ve bu analiz

sonuçlarıyla görev dağılımı, şerit sıralama veya sektör açma-kapama kararlarının uyarlanabildiği gösterilmiştir (Liu vd., 2024; Pang vd., 2023). YZ tabanlı sistemler, gerçek zamanlı karar destek araçlarına gömülü şekilde potansiyel çakışmalar, kapasite aşımı veya anormal durumlar için uyarılar ve çözüm önerileri sunmaktadır. Bu öneriler, denetleyicinin alışkın olduğu prosedürlerle uyumlu seçenekler hâlinde arayüze yansıtılmaktadır (EASA, 2024a). Bununla birlikte, Degas vd. (2022) ile Tang vd. (2022) ATM'de YZ sistemlerinin kalıcı olarak benimsenebilmesi için XAI yaklaşımlarının, otorite ve son kullanıcı tarafından güvenilirliğin temel koşulu hâline geldiğini vurgulamaktadır.

Çevresel sürdürülebilirlik boyutu, YZ tabanlı ATM uygulamalarının stratejik önemini daha da artırmaktadır. SESAR'ın Avrupa ATM Ana Planı CO₂ verimsizliklerinin yaklaşık %9'luk bir kısmının ATM iyileştirmeleriyle azaltılabileceğini ve bunun büyük ölçüde optimizasyon odaklı YZ çözümlerine dayanacağını öngörmektedir (SESAR JUA, 2025). 2050 perspektifinde yolcu sayısında beklenen %57'lik artış hidrojen ve elektrikli uçaklar, insansız hava araçları ve yüksek irtifa operasyonları ile birlikte hava sahasını hem yoğun hem de heterojen bir yapıya dönüştüreceği öngörülmektedir. Bu tablo, ağ genelinde her bir uçuşun bireysel hava aracı performansı, kullanıcı tercihleri, yerel koşullar ve meteoroloji dikkate alınarak *“sistematik ve son derece hassas”* biçimde optimize edildiği, yüksek otomasyon düzeyine sahip bir ATM mimarisini gerektirmektedir (SESAR JU, 2025a). Bu vizyonda, insan operatörler ağırlıklı olarak, otomasyonun yönetemediği karmaşık ve beklenmedik durumlara odaklanan *“üst düzey karar verici”* rolüne evrilmektedir.

Bu dönüşüm, insan-makine iş birliğinin doğasını kökten değiştirmekte ve literatürde insan-YZ takımları (Human-AI Teaming, HAT) kavramıyla ele alınmaktadır. IFATCA'nın çalışmalarında, iş birliği ile birlikte çalışma arasında ayırım yapılarak etkili bir HAT yapısında YZ sisteminin durumsal farkındalık unsurlarını paylaşabilen, anormal durumları tanıyan, kullanıcının çözümünü değerlendirebilen ve gerektiğinde müzakereye girebilen uyarlanabilir bir ortak olarak tasarlanması gerektiği vurgulanmaktadır (IFATCA, 2025a). EASA'nın HAT için ortaya koyduğu tasarım ilkeleri de YZ sistemlerinin kullanıcıdan çapraz kontrol talep edebilmesi, reddedilen önerilere uyum sağlayabilmesi ve zaman-kritik durumlarda insanın hatalı kararlarını tespit ederek destek sağlayabilmesi gibi işlevleri içermektedir. Bu yaklaşım, denetleyicinin sistem üzerindeki otoritesini korurken YZ'nin *karar destek* rolünü pekiştiren insan-merkezli bir tasarımı zorunlu kılmaktadır.

Diğer taraftan, YZ'nin ATM'ye entegrasyonu beraberinde önemli emniyet, etik ve hukuki tartışmaları getirmektedir. IFATCA YZ/ML tabanlı sistemlerin yalnızca karar destek aracı olarak kullanılmasını, kontrolör kararının yerine geçmemesini ve otomasyon düzeyi arttıkça denetleyicinin sorumluluğunun özellikle müdahale edebilme kapasitesiyle orantılı biçimde yeniden tanımlanmasını savunmaktadır (IFATCA, 2025a). YZ sisteminin hatalı ya da öngörülemeyen davranışlarda bulunabilme olasılığı, sorumluluğun işletmeci, üretici, yazılım geliştirici ve denetleyici arasında nasıl paylaştırılacağına ilişkin yeni sorular doğurmaktadır. Bu çerçevede, hem EASA'nın YZ yol haritasında hem de IFATCA dokümanlarında, YZ sistemlerinin sertifikasyonu, test-doğrulama süreçleri, açıklanabilirlik ve sorumluluk zincirinin açık biçimde tanımlanması kilit başlıklar olarak öne çıkmaktadır (Degas vd., 2022; IFATCA, 2025a).

YZ'nin ATM'deki ikinci önemli rolü, eğitim ve simülasyon ortamlarının dönüştürülmesidir. IFATCA (2025b), YZ'nin simülatörlerde konuşlandırılmasının, konuşma tanıma destekli sahte pilot uygulamaları, gerçek trafik verilerine dayalı senaryo üretimi, performans analitiği ve doğal dilde sonuç raporlama gibi fonksiyonlarla hem eğitim kalitesini artırabileceğini hem de eğitmen iş yükünü azaltabileceğini belirtmektedir. Bununla birlikte, bu tür uygulamalar için yüksek hacimli ve nitelikli veri ihtiyacı, veri gizliliği ve maliyet öngörüsündeki belirsizlikler önemli kısıtlar olarak ortaya çıkmaktadır. Yine de YZ destekli simülasyonlar hava trafik kontrolörlerinin YZ araçlarıyla birlikte çalışmaya hazırlanmasında ve yeni yetkinliklerin kazandırılmasında vazgeçilmez bir bileşen olarak görülmektedir.

Tüm bu gelişmeler, hava trafik kontrolörlüğü mesleğinin yetkinlik profilini de yeniden şekillendirmektedir. Klasik olarak öne çıkan hızlı karar verme, mekânsal farkındalık, önceliklendirme ve çoklu görev yönetimi gibi becerilerin yanı sıra veri analizi ve görselleştirme, sistem ve tasarım odaklı düşünme, veri temelli karar verme, sürekli öğrenme ve gelişmiş iletişim becerileri, YZ ile birlikte çalışabilmek için kritik hâle gelmektedir (IFATCA, 2025a). Öte yandan, yoğun otomasyonun beceri kaybı (skill fade) ve iş doyumu üzerindeki olası olumsuz etkileri de vurgulanmakta ve YZ sistemlerinin denetleyici iş doyumunu ve mesleki özerkliği destekleyecek şekilde tasarlanması gerektiği ifade edilmektedir. Bu nedenle, ICAO'nun denetleyici yeterlilik çerçevesi, beklenmedik ve acil durumların yönetimi gibi insanın vazgeçilmez rolünü öne çıkaran alanlarda güncellenmekte ve YZ ile desteklenen bir ortamda dahi insan-merkezli emniyet kültürünün korunması hedeflenmektedir.

ATM’de YZ, hem operasyonel hem çevresel hem de sosyo-teknik boyutlarıyla çift yönlü bir rol oynamaktadır: (1) bir yandan kapasite, emniyet ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için benzersiz olanaklar sunarken, (2) diğer yandan insan–makine etkileşimi, açıklanabilirlik, sorumluluk ve eğitim alanlarında yeni riskler ve araştırma soruları doğurmaktadır. Alanyazındaki araştırmalar (Degas vd., 2022; Tang vd., 2022), bundan sonraki çalışmaların yalnızca daha güçlü modeller geliştirmeye değil, aynı zamanda belirli ATM görevleri için hangi mimarinin neden uygun olduğuna dair açık gerekçeler sunmaya ve YZ çözümlerini denetleyici perspektifinden değerlendirerek kabul edilebilir, güvenilir ve insan-merkezli bir ATM ekosistemi inşa etmeye odaklanması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, ATM’de YZ’nin geleceği, teknolojik kapasitenin ötesinde, düzenleyici çerçeveler, örgütsel adaptasyon ve insan faktörleri alanındaki bütüncül yaklaşımlara bağlı olarak şekillenecektir.

4. SESAR (Single European Sky ATM Research) Girişimleri ve Yapay Zekâ Uygulamaları

Avrupa’da ATM’de bütüncül bir modernizasyon hedefleyen Tek Avrupa Hava Sahası (Single European Sky- SES) girişimi, Avrupa Komisyonu tarafından 2004 yılında ATM’deki parçalı yapıyı azaltmak ve performansı artırmak amacıyla oluşturulan kapsamlı bir politika çerçevesidir. SES ekonomik performans, hava sahası organizasyonu ve ağ yönetimi, teknolojik inovasyon, emniyet ve insan faktörleri olmak üzere beş temel faktöre dayanmaktadır (SESAR JU, 2025a). SES kapsamındaki teknolojik inovasyonların koordinasyonundan ise SESAR (Single European Sky ATM Research) sorumludur ve SES’in diğer tüm sütunlarını destekleyen teknolojik çekirdeği oluşturmaktadır.

SESAR, Avrupa’da yüksek performanslı, dijitalleşmiş, standartlaştırılmış ve birlikte çalışabilir bir ATM altyapısı geliştirmeyi amaçlayan Dijital Avrupa Hava Sahası (Digital European Sky) vizyonunu yürütmektedir. Bu modernizasyon süreci, tanımlama, geliştirme ve yaygınlaştırma olmak üzere döngüsel bir inovasyon yapısı üzerine kuruludur.

- Tanımlama aşaması, uzun vadeli ATM dönüşümünü belirleyen Avrupa ATM Ana Planının hazırlanmasını içermektedir.
- Geliştirme aşaması, SESAR Joint Undertaking tarafından yürütülen araştırma, geliştirme ve doğrulama faaliyetlerini kapsamaktadır.
- Yaygınlaştırma aşaması ise SESAR Deployment Manager tarafından yönetilmekte olup, olgunlaşmış SESAR çözümlerinin

standardizasyonu, sertifikasyonu ve operasyonel sistemlere entegrasyonunu içermektedir.

SESAR'ın geniş kapsamlı modernizasyon faaliyetleri EASA, EUROCONTROL/Network Manager, European Defence Agency, EUROCAE, SESAR 3 JU ve SESAR Deployment Manager gibi kurumsal paydaşlarla koordineli bir şekilde yürütülmektedir. Bu paydaşlar, düzenleyici uyum, hava sahası ağı yönetimi, sivil-askeri koordinasyon ve standardizasyon alanlarında kritik roller üstlenmektedir (SESAR JU, 2025a). Avrupa Birliği, ICAO ve küresel paydaşlarla iş birliği yaparak ATM modernizasyonunun uluslararası standartlarla uyumlu hale gelmesini ve küresel düzeyde birlikte çalışabilirliğin sağlanmasını hedeflemektedir.

Tarihsel olarak, Avrupa'daki gecikme krizleri –özellikle 1980'ler ve 1990'lardaki yoğunluk artışı– ATM alanında kurumsal ve teknolojik dönüşüm ihtiyacını ortaya koymuş; bu bağlamda EUROCONTROL bünyesinde *Central Flow Management Unit*'in kurulması, dikey ayırma standartlarının azaltılması (Reduced Vertical Separation Minima- RVSM) ve ilk saha navigasyon (RNAV) uygulamaları önemli kapasite iyileştirmeleri sağlamıştır (Bolić ve Ravenhill, 2021). Artan trafik ve gecikmeler, 2000'li yıllarda SES girişimini, 2008'de ise kapsamlı bir Ar-Ge çerçevesi olarak SESAR programını ortaya çıkarmıştır. SESAR, ATM araştırmalarının dağınık yapısını ortadan kaldırmayı, yinelenen Ar-Ge yatırımlarını azaltmayı ve tüm Avrupa için ortak bir ATM vizyonu geliştirmeyi hedeflemiştir.

Bu çerçevede SESAR bir girişim olarak, uzaktan kule (remote tower), zaman temelli ayırma (Times Based Separation- TBS), gelişmiş yaklaşma yönetimi (Arrival Manager- AMAN), sistem çapında bilgi yönetimi (System Wide Information Management- SWIM) tabanlı bilgi yönetimi, serbest rota operasyonları (Free Route Airspace- FRA), sanal merkezler, gelişmiş meteoroloji, uydu tabanlı iletişim ve küresel uygu seyrüsefer sistemi (Global Navigation Satellite System- GNSS) tabanlı yaklaşımlar gibi kritik teknolojilerin olgunlaştırılmasını ve Avrupa çapında yaygınlaştırılmasını sağlamıştır. 2025 Kasım ayı SESAR Proje Web Portalı'nda 154 projenin tamamlandığı, 79 projenin devam ettiği ve 300'den fazla lokasyonda SESAR çözümlerinin uygulamaya geçtiği raporlanmaktadır (SESAR JU, 2025b). Ayrıca, havaalanı operasyonlarının bütüncül optimizasyonu, kullanıcı odaklı uçuş planlaması ve işbirlikçi karar verme modelleri de projenin temel bileşenleri arasındadır (Mannino vd., 2021; Drupka vd., 2018; Karahasanovic, 2019).

SESAR Master Planının güncel versiyonunda, 2035'e kadar tamamlanması hedeflenen 10 Stratejik Yaygınlaştırma Hedefi (Strategic

Deployment Objectives - SDO) tanımlanmıştır. Bu hedefler arasında pist/taksi yolu ihlallerinin azaltılmasından çevresel etkinliğin artırılmasına, kapasite ve ölçeklenebilirliğin iyileştirilmesinden yenilikçi hava araçlarının entegrasyonuna kadar geniş bir yelpaze yer almaktadır. Hava-yer bağlantısı ile iletişim, seyrüsefer ve gözetim sistemlerine ilişkin dönüşümler de bu hedeflerin temel bileşenleri arasındadır (SESAR JUa, 2025).

SESAR kapsamında yürütülen araştırmalarda YZ ve ML tabanlı teknolojiler, ATM modernizasyonunun en kritik bileşenlerinden biri haline gelmiştir. Tuncal (2025b) tarafından 232 proje dokümanı üzerinde yapılan içerik analizi, doğrudan YZ/ML kullanan 37 proje bulunduğunu ortaya koymuştur. Bu projeler dört tematik alanda yoğunlaşmaktadır:

1. Durumsal Farkındalık ve İnsan-YZ İş Birliği: Hava trafik kontrolörlerinin bilişsel yükünü azaltan, anomali tespiti gerçekleştiren, dikkat yönetimini iyileştiren ve insan-merkezli karar destek sistemleri geliştiren YZ yaklaşımları bu kategoridedir.
2. Uçuş Yörünge Tahmini, Trafik Akışı Yönetimi ve Ağ Optimizasyonu: Derin öğrenme tabanlı uçuş yörünge tahmini modelleri, karmaşık ağ optimizasyonu algoritmaları, dinamik hava sahası yapılandırması ve talep-kapasite dengelemesi bu araştırma alanının merkezindedir.
3. İletişim, Seyrüsefer, Gözetim (CNS) ve Emniyet İzleme Otomasyonu: Meteoroloji tahminlerinde YZ kullanımı, CNS sistemlerinin kestirimci bakımı, uçuş emniyetinde erken uyarı sistemleri ve operasyonel anomali tespiti SESAR'ın emniyet odaklı YZ çalışmalarını oluşturmaktadır.
4. YZ Entegrasyonu ve Etik Yönetişim: ATM'de algoritmik şeffaflık, model doğrulama, insan-odaklı otomasyon seviyeleri ve etik yönetim mekanizmaları üzerine yapılan SESAR projeleri geleceğe dönük dönüşümün temelini oluşturmaktadır.

SESAR'ın teknoloji portföyü yalnızca mevcut hava araçları için değil, aynı zamanda geleceğin hava sahası kullanıcıları için de *-örneğin, insansız hava araçları ve yüksek irtifa platformları için de-* birlikte çalışabilir, öngörülebilir ve esnek bir ATM altyapısı sunmaktadır (Barbera vd., 2019; Gargiulo vd, 2024; Pierattelli vd., 2025). Bu yönüyle SESAR, YZ temelli ATM çözümlerinde insan-makine iş birliğini optimize etmeyi amaçlayan uluslararası ölçekte öncü bir çerçeve sunmaktadır.

4.1. SESAR (Single European Sky ATM Research) Girişimlerinde Yapay Zekâ Projeleri

Bu bölümde, SESAR'ın güncel web proje portalında (SESAR JU, 2025b) “*Artificial Intelligence for Aviation*” başlığı altında listelenen YZ odaklı projeler ayrıntılı biçimde açıklanacaktır. Söz konusu projeler, ATM operasyonlarının dijitalleşmesi, insan–YZ iş birliğinin geliştirilmesi, tahminleme ve durum farkındalığının artırılması, konuşma tanıma ve otomasyon süreçlerinin iyileştirilmesi gibi çok katmanlı hedeflere yönelik yenilikçi modeller sunmaktadır. Her bir proje, kapsamı, kullanılan yapay YZ/ML yöntemleri, operasyonel amaçları, insan faktörleri açısından etkileri ve ATM ekosistemine katkıları bakımından akademik bir çerçevede ele alınacaktır.

Bu bölümde incelenecek projelere ait temel tanımlayıcı bilgiler Tablo 1’de gösterilmektedir. Bu tabloda her projenin kimlik numarası, proje türü, yürütülme durumu, proje süresi gibi temel özellikleri yer almaktadır. Tabloda sunulan bilgiler, 2025 Kasım ayı itibarıyla SESAR JU (2025b)’nun güncel proje portalından alınmış olup, YZ projelerinin kapsamı ve çeşitliliğine ilişkin bütüncül bir görünüm sağlamayı amaçlamaktadır.

Tablo 1: YZ İlişkili SESAR Projeleri

Proje Adı	Proje Türü	Yürütülme Durumu	Proje Süresi
DIALOG	Keşifsel Araştırma	Devam Ediyor	2024-09-01 > 2027-02-2
ORCI	Keşifsel Araştırma	Devam Ediyor	2024-06-01 > 2026-11-30
AWARE	Keşifsel Araştırma	Devam Ediyor	2024-06-01 > 2026-11-30
SynthAIR	Keşifsel Araştırma	Devam Ediyor	2023-09-01 > 2026-02-28
JARVIS	Endüstriyel Araştırma	Devam Ediyor	2023-06-01 > 2026-05-31
DARWIN	Hızlandırılmış Proje	Devam Ediyor	2023-06-01 > 2026-05-31
ASTRA	Keşifsel Araştırma	Devam Ediyor	2023-09-01 > 2026-02-28
TRUSTY	Keşifsel Araştırma	Devam Ediyor	2023-09-01 > 2026-02-28

4.1.1. DIALOG (*Deciphering Intents of Air traffic controllers, workLOad assessment and Gaze*)

DIALOG projesi, ATM’de insan–YZ iş birliğini güçlendirmeyi amaçlayan yenilikçi bir SESAR araştırma girişimi olarak tasarlanmıştır. Projenin temel odağı, hava trafik kontrolörleri ile YZ tabanlı sistemler arasında bağlama duyarlı, güvenilir ve öngörüsül bir iş birliği mekanizması geliştirmektir. Bu kapsamda DIALOG, konuşma tanıma teknolojisi aracılığıyla pilot–kontrolör iletişimlerini analiz eden, kontrolörün niyetini ve operasyonel hedeflerini çıkarımsal modellerle belirleyen ve ML algoritmalarını kullanarak kontrolörün iş yükü, dikkat seviyesi, bilişsel durumu ve trafik bağlamını gerçek zamanlı

olarak değerlendiren bir YZ destekli Takım Asistanı (Teamwork Assistant) geliştirmektedir. Projedeki sistem, kontrolörün anlık bilişsel durumuna, dikkat dağılımına, trafik yoğunluğuna ve operasyonel bağlama göre ne tür bir desteğin ne zaman sağlanması gerektiğine karar verebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Böylece YZ, yalnızca otomasyon düzeyini artıran bir araç değil, kontrolörün operasyonel ihtiyaçlarını önceden öngörebilen ve kişiye özgü destek sunabilen bir takım arkadaşı niteliği kazanmayı hedeflemektedir. Proje, bilimselaçıdan insan-YZ takımlarından niyet modelleme, bağlama duyarlı çıkarım yapma ve karşılıklı durumsal farkındalığın nasıl oluşturulacağına ilişkin yeni bir çerçeve geliştirmeyi amaçlamaktadır. Teknolojik açıdan ise ses, fizyolojik sinyaller ve davranışsal ölçümler üzerinden kontrolörün durumunu gerçek zamanlı izleyebilen, açıklanabilir ve insan merkezli bir dijital asistan ortaya koymaktadır. Toplumsal ve operasyonel açıdan DIALOG, ATM'de gelişmiş insan-AI iş birliği (HAT) uygulamalarının benimsenmesini teşvik ederek emniyeti, verimliliği ve kapasite kullanımı etkinliğini artırmayı hedeflemekte, aynı zamanda YZ tabanlı sistemlere duyulan güveni operasyonel düzeyde güçlendirmektedir. Projenin kamuya açık çıktılarına bakıldığında, operasyonel bağlamanın tanımlandığı OSED dokümanları (D1.3), sistemin temel fonksiyonel gereksinimlerini belirleyen FRD (D1.6) ve niyet çıkarımı çerçevesini açıklayan kapsamlı raporun (D1.7) insan-AI iş birliği tasarımının temelini oluşturduğu görülmektedir. Kontrolörün iş yükü ve dikkat durumunu belirlemeye yönelik fizyolojik ve davranışsal veri işleme yöntemlerini içeren rapor (D2.1), kullanıcı odaklı tasarım ilkeleri doğrultusunda insan-AI etkileşimi için geliştirilen prototip ve tasarım çözümleri (D3.1) ve doğrulama çalışmalarının metodolojik planını oluşturan ERP (D4.1), sistemin operasyonel geçerliliğine yönelik temel aşamaları temsil etmektedir. Ayrıca hava trafik kontrolörü-AI ekip çalışması için oluşturulan kapsamlı yönergeler ve tasarım desenleri (D4.2), doğrulama çalışmalarından elde edilen bulguları bir araya getiren araştırma raporu (D4.3), veri yönetimi, etik süreçler, iletişim ve yaygınlaştırma faaliyetleri ile ekonomik değerlendirmeye ilişkin nihai dokümanlar (D5.3, D5.5, D6.3, D6.5, D6.6) projenin şeffaflığını ve sürdürülebilirliğini sağlayan önemli çıktılar olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamlı çalışma, ATM'de YZ tabanlı takım asistanlarının nasıl geliştirileceğine ve operasyonel ortama nasıl entegre edileceğine ilişkin önemli bilimsel ve pratik katkılar sunmaktadır (DIALOG, 2025).

4.1.2. ORCI (*Optimized Runway Centerline Interception*)

ORCI projesi, terminal manevra sahalarında (TMA) artan trafik yoğunluğunun hava trafik kontrolörleri üzerindeki bilişsel yükünü azaltmak

ve yaklaşma trafiğinin yönetiminde bütüncül bir verimlilik artışı sağlamak amacıyla YZ temelli karar destek sistemleri geliştirmeyi hedefleyen ileri düzey bir araştırma girişimidir. Avrupa Birliği tarafından desteklenen proje, özellikle orta, yüksek ve çok yüksek trafik yoğunluğu dönemlerinde pist kullanım verimliliğini ve yaklaşma aşamasındaki operasyonel dayanıklılığı artırmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda ORCI, gözetim verileri ile hava trafik kontrol süreçlerinden türetilen operasyonel veriler üzerinde eğitilecek bir YZ modeline dayanan gelişmiş bir otomasyon aracı geliştirmeyi planlamaktadır. Projenin nihai amacı, bu YZ tabanlı aracın gösterimini ve geçerleme çalışmalarını gerçekleştirerek, yaklaşma trafiği yönetiminde performansı artıran somut ve uygulanabilir çözümler sunmaktır. Günümüzde TMA içindeki yaklaşma trafiğinin yönetimi, trafik hacminin artmasıyla birlikte giderek daha karmaşık bir hâl almakta ve kontrolörler için oldukça yüksek iş yükü yaratmaktadır. Yüksek yoğunlukta uçakların son yaklaşma hattına optimum aralıklarla sıralanması zorlaşmakta ve bu durum kapasite kayıplarına, hava sahası verimliliğinin azalmasına, pist kullanım etkinliğinin düşmesine ve operasyonel emniyet açısından ek risklerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Ayrıca, performans özellikleri geleneksel uçaklardan farklı olan yeni hava aracı tiplerinin hava sahasına entegre edilmesi, kapasite ve verimlilik konusundaki mevcut zorlukları daha da artırmakta ve kontrolör görevini çok boyutlu bir karmaşıklığa taşımaktadır. Bu kapasite sorunları, birden fazla havaalanı aynı anda etkilediğinde, tüm ATM ağında zincirleme gecikmelere ve operasyonel dengesizliklere yol açabilmektedir. Bu bağlamda ORCI, yaklaşma aşamasındaki karar verme süreçlerini desteklemek üzere yeni bir YZ Tabanlı Karar Destek Aracı (Decision Support Tool- DST) geliştirmeyi amaçlamaktadır. Söz konusu DST, özellikle son yaklaşma sektörlerinde görev yapan kontrolörlere, ardışık gelişlerde optimum ayrımı sağlayabilmek için vektörleme talimatlarının ne zaman verilmesi gerektiğine ilişkin kritik operasyonel bilgiler sunacaktır. Böylece YZ, kontrolörün bilişsel yükünü azaltmakla kalmayıp, karmaşık trafik koşulları altında dahi daha öngörülebilir, verimli ve emniyetli bir geliş trafiği düzeni oluşturulmasına katkı sağlayacaktır. Proje kapsamındaki prototip gösterimleri ve doğrulama faaliyetleri, çözümün operasyonel uygulanabilirliğini değerlendirmeyi ve ATM modernizasyonuna somut katkılar sunmayı hedeflemektedir (ORCI, 2025).

4.1.3. AWARE (*Achieving Human-machine Collaboration With Artificial Situational Awareness*)

AWARE projesi, insan-makine etkileşiminin giderek karmaşıklaştığı ATM bağlamında, YZ destekli yapay durum farkındalığı (Artificial

Situational Awareness- ASA) sistemleri geliştirerek insan merkezli, karşılıklı anlayışa dayalı bir iş birliği mekanizması oluşturmayı hedefleyen yenilikçi bir araştırma girişimidir. Günümüzde insanlar kullandıkları sistemlerin kapasite, sınırlılık ve işleyişini anlamak üzere kapsamlı biçimde eğitilirken; makineler insan niyetini, hedeflerini ve bağlamsal davranışlarını anlamada büyük ölçüde yetersiz kalmaktadır. Özellikle yüksek görev karmaşıklığı ve zaman baskısının belirleyici olduğu hava trafik kontrol ortamında makinelerin insanı algılayabilen, ihtiyaçlarını öngörebilen ve uygun yanıtlar üretebilen sistemlere dönüşmesi, emniyetli ve verimli bir operasyonun sürdürülebilmesi açısından kritik hale gelmiştir.

Bu çerçevede AWARE projesi, hava trafik kontrolörlerinin performansını desteklemek ve artan görev yükü altında bilişsel talepleri hafifletmek amacıyla uyarlanabilir ve insan-merkezli karar destek sunan bir YZ Asistanı geliştirmeyi amaçlamaktadır. Projenin teknik hedefleri, kontrolörün görsel dikkatini diğer bilişsel ve davranışsal girdilerle birlikte izleyip bunları mevcut trafik bağlamında anlamlandıracak bir altyapı oluşturmayı, durum farkındalığı kaybının farklı seviyelerini tespit edecek yöntemler geliştirmeyi (örneğin seçici dikkat yetersizliği, beş aşamalı durum farkındalığının bozulması veya tamamen döngü dışına çıkma durumu) ve geliştirilecek yapay durum farkındalığı sisteminin diğer ATM rollerine ve sistemlerine (örneğin, Air Traffic Controller Extended Planning, FMP) entegre edilebilmesine yönelik birlikte çalışabilirlik gereksinimlerini tanımlamayı kapsamaktadır.

Projenin genel amacı, gelişmiş bir yapay durum farkındalığı çözümü üzerine inşa edilen ve ATC operasyonlarını desteklemek üzere tasarlanmış bir YZ Asistanı uygulamasını geliştirmektir. Bu doğrultuda proje, yapay durum farkındalığı çözümünü Teknoloji Hazırlık Seviyesi 2'ye (Technological Readiness Level - TRL2) ulaştırmayı, ASA sisteminin mevcut yeteneklerini geliştirmeyi, kontrolörün niyetinin değerlendirilmesine yönelik yöntemler geliştirmeyi, ASA bileşenlerinin yeteneklerini sergileyen bir YZ Asistanı prototipini insan-içinde-döngü (Human-In-The-Loop - HITL) simülasyonlarıyla test etmeyi ve kontrolörü desteklemek amacıyla uyarlanabilir destekleyici veya doğrudan eylemlerin seçimi ve uygulanmasına yönelik bir yöntem oluşturmayı hedeflemektedir (AWARE, 2025).

4.1.4. SynthAIr

SynthAIr projesi, ATM otomasyonu ileri bir seviyeye taşımayı amaçlayan ve YZ temelli sentetik veri üretim yöntemlerini geliştiren yenilikçi bir araştırma girişimidir. SESAR 3 Ortak Girişimi tarafından fonlanan proje, ATM alanında uzun süredir karşılaşılan üç temel soruna **veri kıtlığı**,

gizlilik gereklilikleri ve operasyonel karmaşıklık yönelik bütüncül bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır. Gerçek operasyon verilerinin mahremiyet gerekçeleriyle paylaşılamaması, nadir olayların yetersiz gözleme dayalı olması ve farklı havaalanı/ANSP sistemlerinin uyumsuz veri yapıları gibi durumlar ATM’de ML ve YZ uygulamalarının gelişimini sınırlayan temel engeller olarak öne çıkmaktadır. SynthAIr, bu engelleri aşmak üzere altı kritik operasyonel kullanım senaryosunda doğrulanan dokuz adet üretken model geliştirmekte ve sentetik veri üretiminin ATM operasyonları boyunca emniyetli, mahremiyeti koruyan ve yüksek temsiliyet gücüne sahip bir araştırma altyapısı sunabileceğini ortaya koymaktadır.

Projenin ilk kullanım senaryosu olan UC1 (Uce Case1), uçakların kapıya yanaşma (In-Block) ile geri itilme veya taksiye başlama (Off-Block) arasındaki sürenin tahminine odaklanmakta ve birincil havaalanı gecikmelerinin %40’ından fazlasının dönüş süreçlerinden kaynaklandığına dikkat çekmektedir. Bu kapsamda üretilen sentetik veriler yolcu indirme-bindirme, ikram, temizlik, yakıt ikmali ve bagaj işlemleri gibi yer hizmetleri süreçlerinin analizini mümkün kılarak operasyonel gizliliği ihlal etmeden süreç optimizasyonu sağlamaktadır. UC2 kapsamında uçuş gecikmelerinin tahmini ele alınmakta ve bakım, temizlik gibi birincil gecikmeler ile önceki uçuşlardan aktarılan zincirleme gecikmelerin etkileri dikkate alınmaktadır. 2023 yılı ilk çeyreğinde Avrupa’daki ortalama uçuş gecikmesinin 14,5 dakikaya ulaştığı düşünüldüğünde, sentetik verilerin özellikle havaalanları arasındaki yetersiz gerçek zamanlı veri paylaşımını tamamlayıcı bir işlev üstlendiği görülmektedir. UC3, yolcu akış tahminine odaklanarak, güvenlik kontrolü gibi terminal süreçlerinde yolcu davranışlarının öngörülemezliğinin gecikmelerin %50’sinden fazlasını etkilediğini göstermekte ve yolcu gizliliğini koruyarak gerçekçi sentetik veri üretimi sağlamaktadır. UC4 ise ATM simülasyonları için sentetik trafik üreticisi geliştirmekte; yeni operasyonel konseptlerin, hava sahası tasarımlarının ve kontrol stratejilerinin test edilmesinde kritik öneme sahip uçuş yörüngelerini uzamsal-zamansal ilişkileri koruyan biçimde üretmektedir. Bu yetenek, hızlı zamanlı (fast-time) ve gerçek zamanlı simülasyonların daha gerçekçi ve kapsamlı bir veri temeliyle yürütülmesini mümkün kılmaktadır. UC5 kapsamındaki uçuş yönlendirme (diversion) tahmini, nadiren gerçekleşen ancak operasyonel açıdan yüksek etkili olayları (meteorolojik koşullar, tıbbi acil durumlar, teknik arızalar gibi) ele almakta ve bu tür düşük frekanslı olayların modellenmesini kolaylaştırmak için sentetik senaryolar oluşturmaktadır. Bu yaklaşım, alternatif rota oluşturma ve acil durum planlamasına yönelik daha dayanıklı bir karar destek altyapısı geliştirilmesini desteklemektedir. Son olarak UC6, kamuya açık Avrupa uçuş çizelgesi verilerinin sınırlılığı nedeniyle ML

uygulamalarında önemli veri boşlukları yaratan planlama süreçlerine çözüm üretmekte; stratejik uçuş planlaması ve kaynak tahsisine yönelik gerçekçi sentetik çizelgeler oluşturarak varış-kalkış gecikme tahmin modellerinin performansını artırmayı hedeflemektedir (SynthAIR, 2025).

4.1.5. JARVIS (*Just a rather very intelligent system*)

JARVIS projesi, havacılık ekosisteminin dijitalleşme ile birlikte geçirdiği köklü dönüşümün bir parçası olarak, otomasyon ve YZ uygulamalarının operasyonel süreçlere entegrasyonunu sistematik biçimde ele alan kapsamlı bir araştırma ve geliştirme girişimidir. Dijitalleşmenin uçuş operasyonlarından ATM'e ve havaalanı süreçlerine kadar tüm alanlarda yapısal bir değişim yarattığı günümüzde, JARVIS projesi bu dönüşümün kritik gereksinimlerine yanıt vermeyi amaçlamakta ve karmaşık operasyonel senaryolarda insan-makine iş birliğini güçlendirecek yeni nesil dijital asistan çözümlerini geliştirmektedir. Proje kapsamında geliştirilen üç farklı dijital asistanın amacı; insan operatörlerin bilişsel yükünü azaltmak, durum farkındalığını artırmak ve hem konvansiyonel hem de gelişmekte olan hava hareketliliği uygulamalarında (AAM, UTM gibi) emniyetli ve verimli operasyonları desteklemektir.

Projenin ilk bileşeni olan *Airborne Digital Assistant*, kokpitte otomasyon seviyesinin artırılmasına ve YZ tabanlı makine zekâsının daha etkin şekilde kullanılmasına odaklanmaktadır. Bu asistan tek pilotlu operasyonlara geçişi destekleyecek biçimde tasarlanan, mevcut emniyet seviyelerini koruyarak veya artırarak uçuş yönetimini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Geliştirilen sistem uçuş parametrelerinin izlenmesi, kritik durumların erken tespiti ve görev dağılımının pilotun bilişsel yüküne göre uyarlanması gibi işlevlerle, geleceğin ATM konseptlerine entegrasyon sürecini hızlandırmaktadır.

İkinci dijital asistan olan *Air Traffic Control Digital Assistant*, hava trafik kontrolörlerinin operasyonel yükünü azaltmaya ve işlevsel kapasitesini artırmaya yönelik YZ destekli karar destek araçları sunmaktadır. Bu asistan, özellikle yeni hava aracı tiplerinin hava sahasına entegrasyonu, hava trafik akışında artan karşılıklı bağımlılıklar, çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda rota optimizasyonu ve yoğun trafik dönemlerinde verimlilik artışı gibi alanlarda ATC görevlerine destek sağlamaktadır. Veri odaklı algoritmalar, uçuşun farklı evrelerinde kontrolörlerin durumsal farkındalığını güçlendirmekte, karmaşık trafik durumlarında öngörüsnel analizler sunmakta ve yoğun görev dönemlerinde iş yükünü dengeleyici işlevler üstlenmektedir.

Üçüncü bileşen olan *Airport Digital Assistant*, havaalanı operasyonlarında emniyet ve verimliliği artırmaya yönelik YZ çözümlerini uygulamaya

koymaktadır. Geliştirilen bilgisayarlı algoritmalar, havaalanı sahasında izinsiz girişleri tespit etmekte, çarpışma risklerini önceden belirlemekte ve operasyonel tehditlere karşı erken uyarılar sağlamaktadır. Ayrıca uçak dönüş süreçlerinin ve yolcu akışlarının hesaplanmasına katkı sağlayarak daha öngörülebilir ve verimli bir havaalanı operasyon planının oluşturulmasına destek olmaktadır. Bu asistan, havaalanı operasyonlarında bütüncül bir farkındalık mekanizması oluşturarak zamanında müdahale kapasitesini artırmakta ve operasyonel belirsizlikleri azaltmaktadır (JARVIS, 2025).

4.1.6. DARWIN (*Digital Assistants for Reducing Workload & Increasing Collaboration*)

DARWIN projesi, SESAR 3 Ortak Girişimi tarafından fonlanan ve hava taşımacılığının hızla değişen dinamiklerine özellikle insansız hava araçları ve hava taksilerinin giderek artan şekilde hava sahasına dâhil olmasına uyum sağlamak amacıyla tasarlanmış ileri düzey bir araştırma girişimidir. Dijital Avrupa Hava Sahası vizyonu doğrultusunda yürütülen proje, ölçeklenebilir, yüksek derecede otomatikleştirilmiş ve birbirine entegre *extended Minimum Crew Operations (eMCO)* ve *Single Pilot Operations (SPO)* konseptlerinin geliştirilmesi için gerekli teknolojik altyapıyı oluşturmayı hedeflemektedir. DARWIN, YZ tabanlı insan-makine iş birliği çözümleriyle operasyonel verimliliği artırmayı, karmaşık hava sahası senaryolarında emniyeti yükseltmeyi ve havacılık ekosisteminin dönüşümüne kritik katkılar sunmayı amaçlamaktadır.

DARWIN projesinin temel operasyonel hedefi, eMCO ve SPO uygulamaları için seviye 2 otomasyon düzeyine ulaşmaktır. Bu amaç doğrultusunda üç teknik ve üç destekleyici hedef belirlenmiştir. Teknik hedeflerin ilki, yüksek güvenilirlik gerektiren havacılık ortamında kullanılmak üzere yeniden kullanılabilir, açıklanabilir ve emniyet-kritik özellikler taşıyan bir *Trustworthy Machine Reasoning AI Platform (TMRP)* geliştirilmesi ve doğrulanmasıdır. Bu platform, düzenlemeler ile uyumlu karar destek ve karar verme süreçlerine yönelik YZ çözümlerinin emniyetli biçimde uygulanmasını sağlayacak temel bileşeni oluşturur. İkinci teknik hedef, pilot durumunu ve görev yükünü izleyen bir sistemin geliştirilmesini içermekte olup, pilot iş yükü, bilişsel durum, performans düşüşü veya pilotun görevini yapamaması gibi potansiyel olarak tehlikeli insan durumlarının tespiti için YZ tabanlı algılama yöntemlerini kullanmaktadır. Üçüncü teknik hedef ise mevcut operasyon konseptlerinden YZ destekli uyarlanabilir otomasyon ve iş birliğine geçişi sağlayan insan-YZ etkileşim teknolojilerinin geliştirilmesini kapsamaktadır. Bu süreç, kavramsal tasarım ve erken doğrulama aşamalarını

içeren birinci faz ile olgunlaştırma ve ileri doğrulama çalışmalarını kapsayan ikinci fazdan oluşmaktadır.

Projenin üç destekleyici hedefi, geliştirilen yenilikçi teknolojilerin güvenli, düzenlemelere uygun ve insan merkezli bir çerçevede işletilebilmesi için gerekli tamamlayıcı süreçleri içermektedir. Dördüncü hedef, eMCO ve SPO için seviye 2 otomasyonun güvenlik ve emniyet analizlerinin güncel risk değerlendirme yöntemleriyle gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Beşinci hedef kapsamında, güvenilir makine akıl yürütme sistemleri ve insan-YZ iş birliğinin sertifikasyon ve düzenleyici çerçevelerle uyumlu biçimde geliştirilmesi hedeflenmektedir. Altıncı hedef ise, pilot ile YZ destekli dijital asistan arasındaki görev paylaşımının nasıl yürütülmesi gerektiğini tanımlayan insan-YZ iş birliği yönergelerinin oluşturulmasına odaklanmaktadır (DARWIN, 2025).

4.1.7. ASTRA (*AI-enabled tactical FMP hotspot prediction and resolution*)

ASTRA, SESAR programı kapsamında eş finansmanla yürütülen ve Malta Üniversitesi, INGENAV, Deep Blue, Skysoft-ATM ve Skyguide gibi kurumların iş birliğiyle gerçekleştirilen bir projedir. Proje, özellikle FMP (Flow Management Position) birimlerinin bir saat öncesinden potansiyel 4DARHAC (4D Arrival Hotspot And Complexity) olaylarını tespit edebilmesini sağlayarak, akış yönetimi ile hava trafik kontrolü arasındaki koordinasyon boşluğunu kapatmayı hedeflemektedir. ASTRA'nın çözüm yaklaşımı, pekiştirmeli öğrenme (Reinforcement Learning- RL) tabanlı bir ajan tarafından önerilen karmaşıklık azaltma stratejilerinin insan operatörler tarafından anlaşılabilir olmasını sağlamak üzere XAI ilkelerini de içermektedir. Tasarlanan insan-makine arayüzünde (HMI), RL ajanının önerdiği her çözümün toplam karmaşıklık puanına ve bu puanı oluşturan alt faktörlere olan etkisi açık bir biçimde görselleştirilecek, uçuş seviyesi değişiklikleri gibi önerilerde bitişik trafik seviyeleri ve zamanlamalar gösterilerek kararın gerekçesi operatör tarafından sayısal olarak değerlendirilebilir hâle getirilecektir. Ayrıca, kontrol çalışma pozisyonlarında (Controller Working Position- CWP) kullanılan radar benzeri bir plan görünümü haritası aracılığıyla, önerilen çözümler uygulanmış ve uygulanmamış trafik senaryoları karşılaştırmalı olarak sunulacaktır. Bu yaklaşım, ekolojik arayüz tasarımı ilkelerinden yararlanarak operatörün durumsal farkındalığını artırmayı ve otomasyonla iş birliğini güçlendirmeyi hedeflemektedir.

ASTRA aracının uygulanması, ATFM ile ATC arasındaki operasyonel iletişimi güçlendirerek daha bütünlüklü bir ağ yönetimi yapısına katkı

sunmaktadır. Yoğunluk noktalarının daha erken tespiti sayesinde (i) küresel ATM sistemi üzerindeki yükün azalması, (ii) kontrolör iş yükünün hafiflemesi, (iii) karmaşıklık artmadan kapasite iyileşmesi, (iv) operasyonel emniyetin yükselmesi ve (v) daha düşük çevresel etkiye sahip uçuş rotalarının yaygınlaşması gibi çok yönlü faydalar beklenmektedir. Projenin doğrulama süreci, üç aşamalı bir insan merkezli tasarım (Human-Centred Design - HCD) yaklaşımıyla yürütülmektedir. İlk aşamada operasyon uzmanlarının katılımıyla operasyonel konsept ve gereksinimlerin belirlendiği bir çalıştay, ikinci aşamada kullanıcılarla test edilen düşük sadakatli HMI prototip simülasyonları, son aşamada ise yazılım ve algoritmaların bütünlük olarak değerlendirildiği gerçek zamanlı bir simülasyon süreci uygulanmaktadır. Her aşamada son kullanıcı geri bildirimi toplanarak geliştirilen çözümün operatör ihtiyaçlarına uyumu sağlanmakta ve kullanılabilirlik, ergonomi ve performans açısından bütüncül bir değerlendirme yapılmaktadır.

4.1.8. TRUSTY (*Trustworthy intelligent system for remote digital tower*)

Uzaktan Dijital Kuleler (Remote Digital Towers - RDT), havaalanı trafik akışının ve kapasite yönetiminin fiziksel kontrol kulelerine ihtiyaç duyulmadan, uzaktan ve yüksek çözünürlüklü video aktarımı aracılığıyla sağlanmasını mümkün kılan yeni nesil bir hava trafik hizmeti platformu olarak ortaya çıkmıştır. Geleneksel kontrol kulesi modellerinde hava trafik kontrolörleri taksi yollarını ve pistleri doğrudan görüş hattı ile izlerken, RDT mimarisi aynı operasyonel bilginin farklı bir konumdan sunulmasına olanak tanımaktadır. Bu dönüşüm, özellikle artan hava trafik talebi, personel kısıtları ve havaalanı altyapısındaki çeşitlenme bağlamında, emniyetli ve verimli ATM için YZ destekli karar sistemlerinin kritik önemini artırmıştır. Bu çerçevede geliştirilen TRUSTY projesi, RDT ortamlarında kullanılan YZ temelli karar destek sistemlerinin şeffaflığını, açıklanabilirliğini ve güvenilirliğini artırmayı hedefleyen kapsamlı bir araştırma girişimidir. Proje, dört aşamalı bir metodoloji izleyerek ilk aşamada kontrolörlerin ihtiyaç ve gereksinimlerini temel alarak XAI'ya yönelik güven inşa etmeyi amaçlayan kullanım senaryosunun tanımlandığı bir yol haritası geliştirmektedir. İkinci aşamada veri güdümlü AI modelleme, şeffaflık, görselleştirme, açıklanabilirlik, adalet, hesap verebilirlik ve adaptasyon çerçevelerine yönelik araştırma ve geliştirme döngüleri yürütülmektedir. Üçüncü aşama, geliştirilen XAI/ML algoritmalarının ATM operasyonlarını temsil eden test tesislerinde kullanıcılarla birlikte doğrulandığı kapsamlı test süreçlerini içermekte olup, RDT bağlamında güvenilir insan-YZ iş birliğinin operasyonel uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Son aşamada ise projenin etki analizi gerçekleştirilerek doğrulanan çıktılar bütüncül biçimde

analiz edilmiş ve elde edilen bulguların ATM alanına nasıl daha geniş ölçekte uygulanabileceğine ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. Projenin genel çıktısı, görselleştirme, açıklanabilirlik, genellenebilirlik, doğruluk, sağlamlık, adalet, hesap verebilirlik ve kullanıcı kabulünü içeren nitelikleriyle RDT operasyonlarında güvenilir bir YZ sistemi için kanıt niteliğinde bir konsept geliştirilmesidir. Ayrıca gerçek operasyonel koşullarda yürütülecek test ve doğrulama prosedürleriyle, geliştirilen YZ sisteminin güvenlik ve güvenilirlik performansı çeşitli kullanıcı gruplarının—teknoloji geliştiricileri, tüketici test grupları ve tip onay otoriteleri—gereksinimlerine göre değerlendirilecek ve bu sayede RDT ortamlarında emniyetli, açıklanabilir ve hesap verebilir YZ destekli karar sistemlerinin benimsenmesini destekleyecek operasyonel bir çerçeve ortaya koymaktadır.

5. Sonuç ve Tartışma

Bu kitap bölümünde, ATM bağlamı SESAR girişimleri kapsamında geliştirilen YZ çözümlerini ve özellikle SESAR projeleri kapsamında “*Havacılıkta Yapay Zekâ (Artificial Intelligence for Aviation)*” bölümü altında toplanan projeler incelenerek ATM’de insan–YZ etkileşimi kavramsal ve uygulamalı düzeyde ele alınmıştır.

ATM doğrudan binlerce yolcu ve uçuş ekibinin emniyetini etkileyen, bu nedenle hata toleransının son derece düşük olduğu tipik bir “*safety-critical*” alan olarak öne çıkmaktadır (Pham ve Ali, 2024). Bu bağlamda, YZ’nin son on yılda farklı bilişsel görevlerde insan performansını aşan başarısına rağmen, derin öğrenme tabanlı sistemlerin kimi durumlarda öngörülemez davranışlar gösterebilmesi, karmaşık muhakeme ve planlama gerektiren durumlarda zorlanması, ATM’de ‘tam otomasyon’ yerine insan–YZ hibrit yaklaşımları ve *human–AI teaming* kavramlarını öne çıkarmaktadır.

Bu kitap bölümünde odaklanılan SESAR girişimleri çerçevesi, bu amaca yönelik olarak kurgulanmıştır. SESAR girişimleri tanımlama, geliştirme ve yaygınlaştırma aşamalarına dayalı, Avrupa ATM Ana Planı’nı referans alan ve insan faktörlerini, emniyeti, kapasiteyi ve çevresel sürdürülebilirliği birlikte ele alan bir modernizasyon programıdır. AI4Aviation kapsamında geliştirilen ve bu bölümün amacı doğrultusunda yer verilen DIALOG, ORCI, AWARE, SynthAIR, JARVIS, DARWIN, ASTRA ve TRUSTY projeleri, insan–YZ etkileşimini farklı operasyonel boyutlarda ele alarak bu modernizasyonun somut örneklerini sunmaktadır. DIALOG ve AWARE projelerinde geliştirilen takım asistanları ve yapay durumsal farkındalık sistemleri, ASTRA’nın FMP için YZ destekli hotspot tahmin ve çözümleme yaklaşımı, ORCI’nin TMA yaklaşma fazında karar destek sistemi, TRUSTY’nin uzaktan kule operasyonlarında güvenilir ve açıklanabilir YZ’ye odaklanması, JARVIS

ve DARWIN'in tek pilot ve eMCO/SPO konseptleri için dijital asistanları ve pilot durum izleme çözümleri, insan-YZ hibrit yapılarının farklı operasyonel göstergeleri olarak değerlendirilebilir.

Bu çerçevede Pham ve Ali (2024)'nin önerdiği Human-AI Hybrid (HAH) yaklaşımı, SESAR projelerini değerlendirmek için güçlü bir üst çerçeve sunmaktadır. HAH, güvenilirlik insan-merkezli tasarım, uyarlanabilir rol ve görev paylaşımı, insan-YZ birlikte evrimi (co-evolution), sıkı entegrasyon ve güven (trust) bileşenlerine sahip, karar yetkisinin nihai olarak insanda kaldığı, buna karşın YZ'nin algısal yetkinlikleri, hesaplama gücü ve sürekli dikkat kapasitesiyle insan yargı ve sezgisini tamamladığı bir paradigma olarak tanımlanmaktadır. DIALOG'un hava trafik kontrolörü niyetini sesli iletişimden ve fizyolojik göstergelerden çıkarmaya çalışması, AWARE'in görsel dikkat takibi ve yapay durumsal farkındalık çözümleri, DARWIN'in insan-YZ işbirliğini güvenilir makine akıl yürütme platformu üzerinden kurgulaması ve ASTRA'nın karmaşıklık temelli RL ajanı ile FMP kararlarını desteklemesi, bu HAH bileşenlerinin somut göstergeleri olarak değerlendirilmektedir.

Torsi ve arkadaşlarının (2025) ele aldığı "dayanıklılık (resilience)" kavramı, bu projelerin ortak zeminini oluşturmaktadır. Hava trafik sisteminde yalnızca sağlamlık (robustness) değil, beklenmedik durumlara uyum sağlayabilen, bozulmaya rağmen emniyetli performansı sürdürebilen, hatta olaylardan öğrenerek kendini yeniden yapılandırabilen bir örgütsel ve bilişsel mimariyi gerekli kılmaktadır. İnsan bilişi, sezgisel ve analitik düşünme sistemlerinin dinamik entegrasyonu, varsayımsal çıkarım yapabilme, belirsizlik altında hızlı anlamlandırma ve beklenmeyen durumlarda yaratıcı çözüm üretme kapasitesi sayesinde doğal bir bilişsel dayanıklılık sunmaktadır. YZ ise büyük veri kümelerinden zayıf sinyalleri yakalama, örüntü tanıma ve olasılıksal öngörü üretme bakımından güçlü bir algoritmik dayanıklılık zemini sağlamaktadır. SESAR kapsamındaki human-AI teaming çözümleri, insanın çıkarımsal ve bağlamsal muhakemesini YZ'nin veri odaklı tahmin gücüyle bir araya getirerek, sistem düzeyinde yeni bir *ortak dayanıklılık* formu inşa etmeyi amaçlamaktadır.

Bu ortak dayanıklılığın sürdürülebilir olması, Kirwan (2025)'in ortaya koyduğu insan faktörleri mimarisiyle yakından ilişkilidir. İnsan merkezli tasarımlar, roller ve sorumlulukların yeniden tanımlanması, ortak durumsal farkındalık ve açıklanabilirlik (sense-making), insan-YZ iletişimi, takım çalışması, hata ve arıza yönetimi, yetkinlikler ve eğitim, örgütsel hazırlık gibi sekiz alan, SESAR projelerinin teknoloji hazırlık düzeyi döngüsü boyunca dikkate alınması gereken temel başlıklardır. Nitekim DIALOG, ORCI,

ASTRA ve TRUSTY örneklerinde insan-merkezli tasarım ilkeleri, uçuş kontrolörlerinin ve diğer paydaşların erken aşamadan itibaren tasarım ve doğrulama süreçlerine dahil edilmesi, insan-çevrimli (HITL) simülasyonlar ve ardışık iterasyonlarla desteklenmektedir. Bu, yeni teknolojinin mevcut operasyonel bağlama “akıllı entegrasyon” yoluyla eklenmesi gerektiğini vurgulayan Stathis ve çalışma arkadaşlarının (2025) yaklaşımıyla da uyumludur. Aksi halde, yalnızca maliyet ve verimlilik odaklı, insan özerkliği ve uyarlama kapasitesini daraltan tasarımlar, sistemin karmaşıklığı yönetme ve sürpriz olaylarla baş etme yeteneğini zayıflatma riski taşımaktadır.

İnsan-YZ iş birliğinin yalnızca mimari ve algoritmik düzeyde değil, yetkinlikler ve eğitim boyutunda da yeniden düşünülmesi gerekmektedir. EUROCONTROL (2020)’ün Avrupa Havacılık YZ Üst Düzey Grubu (EAAI HLG) çıktıları, YZ’nin hızla devreye alınabilmesi için “*yeni ortak insan-makine sistemi, beceriler ve eğitim*” başlığını altı temel hızlandırıcıdan biri olarak tanımlamaktadır. IFATCA (2025b) ‘nın analizleri, klasik hava trafik kontrol yetkinliklerine ek olarak veri analizi ve görselleştirme, sistem ve tasarım odaklı düşünme, veri temelli karar verme, sürekli öğrenme ve çeviklik, YZ/ML okuryazarlığı ve yeni iletişim biçimlerine uyum gibi yetkinliklerin önemini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, yoğun otomasyon kullanımının mevcut becerilerde beceri kaybı (skill fade) riskini artırabileceği, bu nedenle rutin ve rutin olmayan durum yönetimi, bozulan modların idaresi ve prosedür dışı durumlarda yaratıcı problem çözme gibi yetkinliklerin sistematik olarak korunması ve güncellenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda ICAO’nun yetkinlik çerçevesi, ANSP’ler tarafından YZ tabanlı sistemlere uyarlanacak yeni eğitim programları için temel bir referans sağlamaktadır.

Teknik açıdan bakıldığında, Abdillahi vd. (2024)’nin derleme çalışmasında, ML ve DL yöntemlerinin çatışma tespiti, uçuş yörüngesi tahmini, trafik akışı öngörüsü, gecikme tahmini ve karmaşıklık ölçümü gibi ATC görevlerinde yüksek doğrulukla çalışabildiğini, gerçek veriye dayalı yöntemlerin ve büyük veri altyapılarının bu alanda önemli bir potansiyel sunduğu belirtilmiştir. Ancak aynı çalışmalar, bu modellerin operasyonel geçerliliğinin gerçek veri ile doğrulama, insan-çevrimli simülasyonlar, farklı çevresel bağlamlarda genellenebilirlik analizi ve belirsizlik yönetimi ile test edilmesi gerektiğini de ortaya koymaktadır. Bu noktada EUROCONTROL’un veri paylaşımı ve havacılık-özel AI altyapısı kurma çağrıları, SESAR projelerinin ölçeklenmesi açısından kritiktir.

Bu kitap bölümünde ele alınan SESAR AI4Aviation projeleri, YZ’nin ATM’de emniyet, kapasite, verimlilik ve çevresel performansı artırma potansiyelini, insanın tamamen devre dışı bırakılmadığı, aksine bilişsel

ve etik otoritenin insanda kaldığı human-AI teaming paradigması içinde somutlaştırmaktadır. Bununla birlikte, bu potansiyelin gerçekleştirilmesi, insan-merkezli tasarım, dayanıklılık odaklı sistem mimarileri, açıklanabilir ve güvenilir YZ, kapsamlı eğitim ve yetkinlik yönetimi, düzenleyici çerçeveler ve örgütsel hazır bulunuşluk alanlarında kararlı ve koordineli bir çaba gerektirmektedir.

Geleceğe dönük olarak, ilk olarak ilgili konuya dair araştırma gündeminin insan-YZ takım çalışması (human-AI teaming) ve insan-YZ hibrid (HAH) yapıları etrafında daha sistematik hale getirilmesi gerekmektedir. Farklı otomasyon seviyeleri ve görev/paylaşım senaryolarını karşılaştıran, ortak performans, durumsal farkındalık, dayanıklılık, güven kalibrasyonu ve iş doyumu göstergelerini birlikte ele alan çalışmalar, SESAR projelerinin sonuçlarını genelleştirmek açısından önemlidir. Kirwan (2025)'in önerdiği insan faktörleri alanlarının TRL aşamalarına haritalanmasının, erken tasarım safhasından itibaren hangi insan faktörleri gereksinimlerinin nasıl ele alınacağına dair pratik bir yol haritası sağlayabileceği düşünülmektedir. Özellikle takım çalışması, iletişim ve rol/sorumluluk yeniden tanımlı konularında canlı denemeler, uzunlamasına çalışmalar ve operasyonel saha uygulamalarının kritik olacağı öngörülmektedir.

İkinci olarak, eğitim ve öğretim programlarının YZ çağının gerektirdiği yetkinliklerle yeniden yapılandırılması beklenmektedir. Hava trafik kontrol temel ve ileri eğitim müfredatlarına, YZ/ML okuryazarlığı, veri analitiği ve görselleştirme, sistem düşüncesi, veri temelli karar verme, YZ çıktılarının güvenilirlik ve belirsizlik değerlendirmesi, XAI arayüzleriyle etkileşim, insan-YZ takım çalışması ve bozulmuş mod yönetimi gibi içeriklerin entegrasyonu önem kazanmaktadır. Simülasyon temelli eğitimlerin, DIALOG, AWARE, ORCI ve ASTRA gibi projelerde geliştirilen prototip arayüzler ve karar destek araçları üzerinden senaryo odaklı olarak tasarlanabileceği düşünülmektedir. Bu senaryolar, hem rutin operasyonlarda YZ'den etkin yararlanmayı, hem de sistem arızası, yanlış/yanıltıcı YZ önerisi, veri bütünlüğü sorunları veya siber güvenlik ihlali gibi durumlarda insanın kontrolü devralma ve sistemi emniyetli konfigürasyona geri döndürme becerisini hedeflemelidir.

Üçüncü olarak, sistem tasarımı ve uygulama süreçlerinde insan merkezli tasarım ilkelerinin pratik düzeyde kurumsallaşması gerekmektedir. Hava trafik kontrolörlerinin, teknisyenlerin ve diğer operasyonel paydaşların erken aşamadan itibaren birlikte tasarım süreçlerine dâhil edildiği, arayüz ve algoritma kararlarının kullanıcı testleri, açıklanabilirlik gereksinimleri ve ortak durumsal farkındalık kriterleriyle sınındığı bir tasarım yaklaşımı benimsenmelidir. XAI ve ekolojik arayüz tasarımı ilkeleri, özellikle ASTRA

ve TRUSTY gibi projelerde olduğu gibi, YZ'nin yalnızca “ne yapılması gerektiğini” değil, “neden o çözümü önerdiğini”, sistem karmaşıklığı ve risk düzeyi üzerindeki etkisini de görselleştirecek biçimde kullanılabilir. Böylece insan–YZ iletişimi, tek yönlü komutlardan ziyade, savunulabilir ve müzakere edilebilir öneriler üzerinden gelişen bir diyaloga dönüşecektir.

Dördüncü olarak, kurumsal ve düzenleyici düzeyde yönetim çerçevelerinin YZ entegrasyonuna uyarlanması gerekmektedir. EUROCONTROL'un vurguladığı veri paylaşımı ve YZ altyapısı, emniyetli YZ kullanımına ilişkin sertifikasyon ve onay süreçleri, siber dayanıklılık ve sektörler arası ortaklıklar, SESAR projelerinin ölçeklenmesi için belirleyici olacaktır. Aynı zamanda, örgütsel hazırlık boyutunda, personel yapısı, iş tasarımı, iş doyumu, sendikal kaygılar, etik ve refah konularının proaktif biçimde ele alınması, IFATCA (2025b)'nın vurguladığı “iş düzeyinin ve tatmininin korunması” ilkesiyle uyumlu bir değişim yönetimi gerektirmektedir.

Beşinci olarak, dayanıklılık ve etik boyutu merkeze alan bir human–AI teaming anlayışı geliştirilmelidir. “Fark edilmeden güvenli sınırların dışına doğru sürüklenme (**Drift into failure**)” süreçlerinin erken tespiti için, YZ'nin iletişim kalıpları, yörünge sapmaları ve prosedür dışı uygulamalar gibi zayıf sinyalleri sistem düzeyinde izlemesi; buna karşılık insan operatörlerin de YZ'nin sınırları, eğitim verisi önyargıları ve belirsizlik durumlarında zayıflıkları konusunda bilgilendirilmesi önemlidir. Güven kalibrasyonu, ne otomasyona aşırı güven ne de YZ önerilerini sistematik biçimde reddeden bir “undertrust” biçimini teşvik etmemelidir. Açıklanabilir YZ, bu dengeyi kurmak açısından temel bir araçtır; ancak asıl hedef, insan ve YZ'nin birbirinin güçlü ve zayıf yönlerinin farkında olduğu, karşılıklı izleme ve geri bildirim mekanizmalarına dayalı ortak bilişsel sistemler geliştirmektir.

SESAR girişimleri ve AI4Aviation projeleri, ATM'de YZ'nin geleceğini insanı ikame eden değil, insanın bilişsel ve örgütsel kapasitesini güçlendiren bir ortak olarak konumlandıran güçlü bir vizyon sunmaktadır. Bu vizyonun hayata geçmesi, araştırma, tasarım, eğitim, düzenleme ve örgütsel dönüşüm alanlarında eşzamanlı ve bütüncül bir çaba gerektirecek olsa da doğru kurgulandığında, hem emniyet hem de sürdürülebilirlik hedefleri açısından dönüştürücü etkiler yaratacaktır.

Kaynakça

- Abdillah, R. E., Moenaf, H., Rasyid, L. E., Achmad, S., & Sutoyo, R. (2024, January). Implementation of Artificial Intelligence on Air Traffic Control-A Systematic Literature Review. In *2024 18th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)* (pp. 1-7). IEEE. 10.1109/IMCOM60618.2024.10418350.
- Aditya, V., Aswin, D. S., Dhaneesh, S. V., Chakravarthy, S., Kumar, B. S., & Venkadavarahan, M. (2024). A review on air traffic flow management optimization: trends, challenges, and future directions. *Discover Sustainability*, 5(1), 519. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00781-7>.
- Aghdam, M., Kamel Tabbakh, S. R., Mahdavi Chabok, S. J., & Kheyraadi, M. (2021). Optimization of air traffic management efficiency based on deep learning enriched by the long short-term memory (LSTM) and extreme learning machine (ELM). *Journal of Big Data*, 8(1), 54. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00438-6>.
- ASTRA (2025). ASTRA- AI-enabled tactical FMP hotspot prediction and resolution. <https://www.sesarju.eu/projects/ASTRA>. Erişim Tarihi: 16.11.2025.
- AWARE (2025). Achieving human-machine collaboration with artificial situational awareness – AWARE. <https://www.aware-sesar.eu/>. Erişim Tarihi: 16.11.2025.
- Barbera, S., Miglietta, A., Sureda-Perez, S., Mineck, K., Fistas, N., Zaruba, R., Tamalet, S., & Albiol, L. (2019). Future Satellite Communications Data Link in SESAR 2020 and ESA Iris Programme. *2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, 1-11. 10.1109/ICNSURV.2019.8735277
- Bolić, T., & Ravenhill, P. (2021). SESAR: The Past, Present, and Future of European Air Traffic Management Research. *Engineering*, 7, 448-451. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.08.023>.
- Budd, L. (2016). Airspace and air traffic management. In *Air Transport Management* (pp. 243-260). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429299445-16>.
- Chen, Y., Zhao, Y., & Wu, Y. (2024). Recent progress in air traffic flow management: A review. *Journal of Air Transport Management*, 116, 102573. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102573>.
- Da Cruz, A. (2024). Transforming Air Traffic Management With Big Data And Artificial Intelligence. *International Seven Journal of Multidisciplinary*. 1(2). <https://doi.org/10.56238/isevmjv1n2-009>.
- Dand, A., Saeed, K., & Yildirim, B. (2019). Prediction of airline delays based on machine learning algorithms. <https://web.archive.org/we>

- b/20200709120850id_/https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1379&context=amcis2019
- DARWIN (2025). Digital Assistants for Reducing Workload and Increasing collaboration. <https://darwinai.eu/>. Erişim Tarihi: 16.11.2025.
- Degas, A., Islam, M. R., Hurter, C., Barua, S., Rahman, H., Poudel, M., ... & Arico, P. (2022). A survey on artificial intelligence (ai) and explainable ai in air traffic management: Current trends and development with future research trajectory. *Applied Sciences*, 12(3), 1295.
- DHİMİ (t.y.). *Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü Hakkımızda*. <https://dhmi.gov.tr/Sayfalar/Hakkimizda.aspx>. Erişim Tarihi: 13.11.2025.
- DIALOG (2025). *Deciphering Intent of Air traffic controllers, workLOad assessment and Gaze analysis to enable their efficient and trustworthy collaboration with AI*. <https://research.dblue.it/dialog/>. Erişim Tarihi: 15.11.2025.
- Drupka, G., Majka, A., Rogalski, T., & Trela, L. (2018). An airspace model applicable for automatic flight route planning inside free route airspace. *Advances in Mechanical and Materials Engineering*, 35(298 (1)), 5-18. <https://doi.org/10.7862/rm.2018.01>
- EASA (2024a). *EASA Artificial Intelligence Roadmap 2.0* <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-roadmap-20>. Erişim Tarihi: 12.11.2025
- EUROCONTROL (2020). *EUROPEAN AVIATION ARTIFICIAL. INTELLIGENCE HIGH LEVEL GROUP. The FLY AI Report Demystifying and Accelerating AI in Aviation/ATM*. <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-03/eurocontrol-fly-ai-report-032020.pdf>. Erişim Tarihi: 16.11.2025.
- EUROCONTROL (2024). *Digitalisation and AI in air traffic control: balancing innovation with the human element*. <https://www.eurocontrol.int/article/digitalisation-and-ai-air-traffic-control-balancing-innovation-human-element#:~:text=AI's%20impact%20on%20air%20traffic%20control&text=AI%20systems%20can%20continuously%20monitor,manage%20situations%20efficiently%20and%20safely>. Erişim Tarihi: 13.11.2025
- EUROCONTROL (2025). *Artificial intelligence*. <https://www.eurocontrol.int/artificial-intelligence>. Erişim Tarihi: 11.11.2025
- EUROCONTROL (t.y.). *About Us*. <https://www.eurocontrol.int/about-us>. Erişim Tarihi: 12.11.2025.
- FAA (2024). *Roadmap for Artificial Intelligence Safety Assurance*. <https://www.faa.gov/media/82891>. Erişim Tarihi: 21.11.2025.
- FAA (2025). *Traffic Management* www.faa.gov/nextgen/programs/weather/tfm_support/overview Erişim Tarihi 12.11.2025.
- Fewings, R. (2010). Air traffic management. *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.cae483>.

- Fortune Business Insights (2025). *AI in Aviation Market*. <https://www.fortunebusinessinsights.com/ai-in-aviation-market-113289> Erişim Tarihi: 12.11.2025
- Galotti, V. P. (2019). Air Traffic Management. *The Future Air Navigation System (EANS)*, 177-214.. <https://doi.org/10.4324/9780429435614-8>.
- García-Heredia, D., Alonso-Ayuso, A., & Molina, E. (2019). A combinatorial model to optimize air traffic flow management problems. *Computers & Operations Research*, 112, 104768. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104768>.
- Gargiulo, F., Gigante, G., Escarré, O. B., & De Urrengoechea, T. (2024, July). SESAR GEESE Project Validation with CIRA Multi-Agent Simulation Facility: Preliminary Study. In *2024 15th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA)* (pp. 1-8). IEEE. 10.1109/IISA62523.2024.10786611
- Gui, G., Zhou, Z., Wang, J., Liu, F., & Sun, J. (2020). Machine learning aided air traffic flow analysis based on aviation big data. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(5), 4817-4826. <https://doi.org/10.1109/tvt.2020.2981959>.
- Guleria, Y. (2024). *Enhancing air traffic conflict resolution through machine learning, conformal automation, and flow-centric paradigms* (Doctoral dissertation, Nanyang Technological University).
- ICAO (2016). *Air Traffic Management*. <https://recursosdeaviacion.com/wp-content/uploads/2021/01/icao-doc-4444-air-traffic-management> Erişim Tarihi: 12.11.2025
- ICAO (2025). The Impact Of Artificial Intelligence On The Aviation Sector. https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp_389_en.pdf Erişim Tarihi: 12.11.2025.
- IFATCA (2025a). ATCO skills with the use of Artificial Intelligence and legal Liability. <https://ifatca.org/wp-content/uploads/WP-2025-157.pdf>. Erişim Tarihi: 12.11.2025
- IFATCA (2025b). Advancing ATC Simulation with AI. <https://ifatca.org/wp-content/uploads/WP-2025-167a.pdf>. Erişim Tarihi: 12.11.2025.
- JARVIS (2025). JARVIS- Just a rather very intelligent system. <https://www.sesarju.eu/projects/JARVIS>. Erişim Tarihi: 16.11.2025.
- Kaczorowski, P. (2025). Implementation of machine learning methods for air traffic management. *Journal of KONBiN*, 55(1), 137-154. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0055.0628>.
- Karahasanović, A., Eide, A. W., Schittekat, P., Swendgaard, H. E., Bakhrankova, K., Kjenstad, D., ... & Gräupl, T. (2019). Can holistic optimization improve airport air traffic management performance?. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 34(5), 12-20. 10.1109/MAES.2019.2918039

- Kirwan, B. (2025). Human factors requirements for human-ai teaming in aviation. *Future Transportation*, 5(2), 42. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5020042>
- Liu, B., Lye, S. W., & Zakaria, Z. B. (2024). An integrated framework for eye tracking-assisted task capability recognition of air traffic controllers with machine learning. *Advanced Engineering Informatics*, 62, 102784. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102784>
- Mannino, C., Nakkerud, A., & Sartor, G. (2021). Air traffic flow management with layered workload constraints. *Computers & operations research*, 127, 105159. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105159>
- Moreno, F. P., Rodríguez, F. I., Comendador, V. F. G., Jurado, R. D. A., Suárez, M. Z., & Valdés, R. M. A. (2024). Prediction of air traffic complexity through a dynamic complexity indicator and machine learning models. *Journal of Air Transport Management*, 119, 102632. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102632>
- Nilsson, J., Unger, J., & Eilertsen, G. (2025). Self-Prioritizing Multi-Agent Reinforcement Learning for Conflict Resolution in Air Traffic Control with Limited Instructions. *Aerospace*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/aerospace12020088>
- ORCI (2025). Optimised Runway Centreline Interception – ORCI. <https://orci.isa-software.com/>. Erişim Tarihi: 16.11.2025.
- Ortner, P., Steinhöfler, R., Leitgeb, E., & Flühr, H. (2022). Augmented air traffic control system—artificial intelligence as digital assistance system to predict air traffic conflicts. *Ai*, 3(3), 623-644. <https://doi.org/10.3390/ai3030036>
- Pang, Y., Hu, J., Lieber, C. S., Cooke, N. J., & Liu, Y. (2023). Air traffic controller workload level prediction using conformalized dynamical graph learning. *Advanced Engineering Informatics*, 57, 102113. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102113>
- Papadopoulos, G., Bastas, A., Vouros, G. A., Crook, I., Andrienko, N., Andrienko, G., & Cordero, J. M. (2024). Deep reinforcement learning in service of air traffic controllers to resolve tactical conflicts. *Expert Systems with Applications*, 236, 121234. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121234>
- Pham, D. T., Ali, H., Fennedy, K., Hsieh, M. H., Alam, S., & Duong, V. N. (2024). Human-AI hybrid paradigm for collaborative air traffic management systems. <https://dr.ntu.edu.sg/entities/publication/60a54c7d-2bf6-43c4-876a-45c4a30e8ce9>
- Pierattelli, S., Lamberti, F., & Foti, A. (2025, April). Getting Closer to the ATM Digitalization Through the Future Digital Communication Infrastructure. In *2025 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)* (pp. 1-5). IEEE. 10.1109/ICNS65417.2025.10976821

- Royal Aeronautical Society (t.y.). *What is ATM?* <https://www.aerosociety.com/get-involved/specialist-groups/air-transport/air-traffic-management/>. Erişim Tarihi: 12.11.2025
- SESAR JU (2025a). *European ATM Master Plan*. <https://www.sesarju.eu/masterplan>. Erişim Tarihi: 12.11.2025.
- SESAR JU (2025b). Projects Portal. <https://www.sesarju.eu/projects/portal>. Erişim Tarihi: 15.11.2025.
- SHGM (t.y.). *Hava Trafik Kontrolörü*. <https://web.shgm.gov.tr/tr/havacilik-personeli/2129-hava>. Erişim Tarihi: 12.11.2025
- Sridhar, B., ve Chatterji, G. B. (1999). Air traffic management. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1-17. <https://doi.org/10.1002/047134608x.w1108.pub2>.
- Stathis, M., Marc, B., Nora, B., & Anthony, S. (2025). Human machine teaming in the air traffic control operations rooms: The IFATCA's perspective. *Transportation Research Procedia*, 88, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.05.011>
- SynthAIR (2025). SynthAIR - Improved ATM automation and simulation through AI-based universal models for synthetic data generation. <https://www.sesarju.eu/projects/SynthAIR>. Erişim Tarihi: 16.11.2025.
- Tang, J., Wang, D., Ye, W., Dong, B., & Yang, H. (2022). Safety risk assessment of air traffic control system based on the game theory and the cloud matter element analysis. *Sustainability*, 14(10), 6258. <https://doi.org/10.3390/su14106258>
- Taylor, C., Vargo, E., Manderfield, T., & Heitin, S. (2024). Teaching artificial intelligence good air traffic flow management. *Journal of Air Transportation*, 32(4), 184-196. <https://doi.org/10.2514/1.D0414>
- Torsi, S., Bonelli, S., Vicario, A. G., Levantesi, A., & Mapar, H. (2025). Cognitive Resilience and Human-AI Teaming in Air Traffic Control. <https://ceur-ws.org/Vol-4072/short3.pdf>
- TRUSTY (2025). TRUStworthy inTelligent sYstem for remote digital Tower. <https://research.dblue.it/trusty/>. Erişim Tarihi: 16.11.2025.
- Tuncal, A. (2025a). Hava Trafik Yönetiminde Küresel Trendler ve Stratejik Yönelimler. In Ayberk Tütükn (Ed.). *Hava Taşımacılığında Küresel Trendler ve Stratejik Yönelimler*. (pp. 131.162). Nobel: Ankara.
- Tuncal, A. (2025b). Artificial Intelligence Integration in Air Traffic Management: A Qualitative Content Analysis of the SESAR Research. *AIP4's International Journal on Artificial Intelligence: Bridging Technology, Society and Policy*, 1(2), 61-72. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17391128>
- Vossen, T. W., Hoffman, R., & Mukherjee, A. (2011). Air traffic flow management. In *Quantitative problem solving methods in the airline industry: A*

modeling methodology handbook (pp. 385-453). Boston, MA: Springer US.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1608-1_7

- Xu, Y., Dalmau, R., Melgosa, M., Montlaur, A., & Prats, X. (2020). A framework for collaborative air traffic flow management minimizing costs for airspace users: Enabling trajectory options and flexible pre-tactical delay management. *Transportation Research Part B: Methodological*, 134, 229-255. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.02.012>.

