

ASKERİ UÇAKLARDA YÜKSEK BASINÇLI PNÖMATİK SİSTEM UYGULAMALARI

Göktuğ YILMAZ
Pelin AYDIN ORBEY
Berk BERBER
Alper BULUT

ÖZET

Havacılık sektörü, gerek sivil, gerekse askeri alanda sahip olduğu önemli rol nedeniyle, küreselleşen dünyanın vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir. Havacılık uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte, yüksek güvenli, maliyet etkin ve sürdürülebilir sistemler tasarlanmasının önemi artmıştır. Özellikle hava araçlarının operasyonel koşullarda maruz kaldıkları zorlayıcı gereksinimler, mühendisleri mümkün olan en güvenli, hafif ve verimli çözümler üzerinde çalışmaya sevk etmiştir. Pnömatik sistemler, havacılıkta geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yolcu ve pilotlara yaşanabilir bir ortam sağlamak amacıyla kabin basıncının düzenlenmesinde, kabin içi iklimlendirmede, oksijen tedarikinde, uçak motorlarının çalıştırılmasında, irtifa ve hücum açısı gibi uçuş parametrelerinin ölçümünde, kontrol yüzeyleri gibi kritik yüzeylerde buzlanmanın önlenmesinde, yakıt tanklarının inertlenmesinde ve genellikle mekanik güç üretimi gerektiren alanlarda kullanılabilir. Gelişen teknolojiyle birlikte pnömatik sistemler, savunma sanayii uygulamalarında da kritik bir önem kazanmıştır. Özellikle yeni nesil askeri uçaklarda, dinamik görev profillerine uyum sağlayıp, mühimmatta güvenli ayrılmanın gerçekleştirilmesi gibi yüksek basınç gerektiren uygulamalarda öne çıkan pnömatik sistemler, geleneksel piroteknik kullanımların yerini almaktadır. Bu çalışma kapsamında, pnömatik sistemlerin askeri uçaklardaki yüksek basınç uygulamaları ele alınmıştır. Ayrıca pnömatik sistemlerin havacılıkta kullanımının avantaj ve dezavantajları incelenmiş olup, sistemlerin gelişim potansiyelleri analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pnömatik güç, Askeri uçaklar, Mühimmat bırakma sistemleri, Piroteknik, Hidrolik güç, İniş takımı.

ABSTRACT

The aviation sector, crucial in both civilian and military domains, is indispensable in our globalized world. As aviation expands, designing safe, cost-effective, and sustainable systems becomes paramount. The demanding operational conditions aircraft face drive engineers to develop the most secure, lightweight, and efficient solutions. Pneumatic systems play a wide role in aviation. They manage cabin pressure, climate control, and oxygen supply for passenger and pilot comfort. They power aircraft engine starts, measure flight parameters like altitude and angle of attack, prevent ice buildup on critical surfaces, inert fuel tanks, and generally handle mechanical power needs. With advancing technology, pneumatics are also vital in defense applications. Especially in modern fighter jets, they handle high-pressure needs like dynamic mission profiles and safe munition release, often replacing traditional pyrotechnic methods. This study focuses on pneumatic systems in military

aircraft, specifically their high-pressure applications. It analyzes the advantages and disadvantages of pneumatics in aviation and explores their future development potential.

Key Words: Pneumatic power, Fighter jets, Weapon release systems, Pyrotechnics, Hydraulic power, Landing gear.

1. GİRİŞ

Modern askeri uçaklar yalnızca hız ve manevra kabiliyetiyle değil, görev süresince maruz kaldıkları zorlu çevresel koşullara karşı dayanıklı ve güvenilir sistemlerle donatılmalarıyla da öne çıkmaktadır. Yüksek irtifa, ani yük değişimleri, titreşim ve sıcaklık dalgalanmaları, uçakta yer alan her bir alt sistemin performans sınırlarını zorlamaktadır. Bu nedenle, sistemlerin sadece işlevsel olması yeterli değildir; aynı zamanda dayanıklı, güvenilir, hafif ve hızlı tepki verebilen yapıda olması, tasarımın temel öncelikleri arasında yer almaktadır.

Pnömatik sistemler, bu gereklilikleri karşılamadaki performansları sayesinde, askeri havacılıkta giderek daha kritik bir rol üstlenmektedir. Sadece destekleyici değil, görev başarısını doğrudan etkileyen uygulamalarda da kendine yer bulan bu sistemler, geleceğin hava platformlarının vazgeçilmez bileşenlerinden biri olmaya adaydır.

Bu çalışma, askeri uçaklarda kullanılmakta olan pnömatik sistemlerin teknik potansiyelini, kullanım alanlarını ve mühendislik açısından sunduğu stratejik avantajları ele alarak; bu alandaki güncel eğilimleri ve geleceğe yönelik tasarım yaklaşımlarını bütüncül bir bakış açısıyla sunmayı hedeflemektedir.

2. ASKERİ UÇAKLARDA YÜKSEK BASINÇLI PNÖMATİK SİSTEMLER

Askeri uçaklar, görev profilleri gereği son derece zorlayıcı aerodinamik yüklere maruz kalmaktadırlar. Bu zorlu görev koşulları altında, yüksek performans sergileyebilmek adına, pnömatik sistemlerin 200-350 bar aralığında basınç üretmesi gerekebilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda pnömatik bileşenlerin 8-10 bar seviyelerinde basınçlara göre tasarlandığı göz önüne alındığında [1], askeri uygulamalarda ihtiyaç duyulan pnömatik güç seviyesinin ne denli yüksek olduğu açıkça anlaşılmaktadır.

Jet motorlarının kompresörlerinden alınan hava, pnömatik sistemler için gerekli olan yüksek basınçlı havanın temel kaynağını oluşturmaktadır. Bu hava, motorun farklı kademelerinden alınarak belirli oranlarda şartlandırılmakta ve kullanıcı sistemlere yönlendirilmektedir [2]. Elde edilen bu basınçlı hava, sistem ihtiyaçlarına bağlı olarak doğrudan kullanılabilirliği gibi; nem alma, partikül filtreleme ve yağ ayrıştırma gibi işlemlerden de geçirilebilir. İlgili sistemler bu havanın kendi ihtiyaçlarına göre regülasyonundan sorumludur.

Jet motorundan üretilen hava haricinde, bazı sistemler kendi basınçlı tüplerini kullanabilirken, bazı sistemler de uçağın dışarısından hava alabilmektedir. Nihayetinde hava, uçaktaki birçok kritik sistem tarafından kullanılan temel akışkan olsa da çalışma kapsamında incelenen yüksek basınçlı pnömatik güç kısıtlı sayıda sistemde kullanılmaktadır.

Bu kısıtlı sayıdaki uygulamaların ilki, pnömatik güç sistemlerinin birincil güç kaynağı olarak tercih edildiği mühimmat bırakma sistemleridir. Mühimmatın uçaktan güvenli bir şekilde fırlatılabilmesi için 350 bar düzeyinde basınca ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek basınçlı havaya ihtiyaç duyan bir diğer

sistemse iniş takımlarıdır. İniş takımlarında birincil güç kaynağı olarak hidrolik tercih edilmektedir. Ancak bazı uçaklarda, hidrolik sistemin devre dışı kaldığı durumlar için bir acil durum çözümü olarak pnömatik kullanılabilir [2].

2.1. Mühimmat Bırakma Sistemleri

Askeri uçakların temel görevleri arasında, keşif görevleri, aktif operasyonlar ve hava-hava muharebeleri yer almaktadır. Bu görevlerin gerçekleştirilebilmesi için uçaklar, hava-yer füzeleri, hava-hava füzeleri ve top gibi silahlar taşıyabilmektedir. Özellikle füzelerin uçaktan güvenli bir şekilde ayrılması, dinamik görev profilleri ve uçak etrafında oluşan karmaşık akış alanları da değerlendirildiğinde, oldukça zorlayıcı bir mühendislik problemi haline gelmektedir. Ayrılmanın güvenli bir şekilde gerçekleşmemesi durumunda mühimmatın uçağa çarpması gibi uçuş güvenliğini ciddi ölçüde tehdit eden olaylar meydana gelebilir.

Günümüz askeri uçaklarında bu görevi yerine getiren ekipmanlar askı ekipmanı (salan) olarak adlandırılmaktadır. Silah literatüründe Suspension and Release Equipment (SARE) olarak bilinen bu sistem uçuş esnasında üzerine gelebilecek tüm yüklere karşı dayanıklı olmalı, güvenli bir şekilde silahı taşımalı ve atış komutu ile birlikte bırakma işlemini gerçekleştirmelidir. Silahın atış anında serbest bırakılması pek çok farklı sistemin senkronize olarak çalışmasına bağlıdır. Genel prensipte elektriksel bir sinyal ile atış komutu askı ekipmanı tarafından alınmakta, buna karşılık bir kartuş ya da pnömatik sistem serbest bırakılmaktadır. Pnömatik kuvvet sayesinde öncelikle kilidin taşıma mekanizması açılmakta, ardından piston vasıtasıyla silahın ekipmandan güvenli bir şekilde bir şekilde uzaklaştırılması sağlanmaktadır [3].

Salanlarda bulunan akışkan güç uygulamaları için, depo çıkışında gereken yüksek gaz basınçlarını oluşturmak ve korumak amacıyla kullanımda olan üç farklı yöntem uygun bulunmaktadır. Yerde şarj edilmesi gereken depo gazı sistemleri, "cold gas energy source" olarak da bilinen akümülatörlerdir ve uygun basınç değerinde yerde dolmuş sonrası uçağa bağlanmaktadır. İrtifaya bağlı sıcaklık değişimlerinden doğrudan etkilenen bu sistemde sürekli atışa hazır tutmak amacıyla "termal battaniye (heat blanket)" denilen ısıtıcılar ile basınç düşümlerinin önüne geçilmektedir. Bu sistem genel olarak sorunsuz kullanılmaktadır ancak oldukça yüksek bir elektrik tüketimine neden olmaktadır. Sistemde akümülatör dış çeperinden alınan sıcaklık değeri belirlenmiş aralıkta tutularak atışın garanti altına alınması hedeflenmektedir. Atış öncesi basınç durumu değerlendirilmemektedir.

Kanat altı istasyonlarda ateşleme sonrası silahın uçaktan uzaklaştırılması dahili yuva istasyonlarına kıyasla kolay olmaktadır. Ancak dahili yuvalarda bulunan istasyonlardan ayrılan silahların aerodinamik kuvvetleri yenerek güvenli bir şekilde uçaktan uzaklaştırılabilmesi için akümülatör içinde bulunan gaz basıncının belirlenmiş seviyenin üzerinde olması kritik önem taşımaktadır.

Bu nedenle, 5. Nesil Askeri Uçaklarda kullanılan çözüm üzerinde kompresör bulunan yüksek basınçlı gaz üretim sistemleri olmuştur. Bu şekilde oluşturulmuş pnömatik sistemlerde genel olarak uçak içerisinde dahili kompresörler bulunmaktadır. Salan akümülatörlerine doğrudan bağlanma ya da ayrık yapıda kullanılabilen bu kompresörler ile akümülatör iç basıncı sabit seviyede tutularak görev profili boyunca uçağın sürekli atışa hazır halde tutulması hedeflenmektedir.

Günümüzde, askeri uçakların kanat altı silah istasyonlarında yaygın olarak kullanılmakta olan ekipmanlar kimyasal reaksiyon ile gaz salınımı sağlayan kartuşlu sistemlere sahip olan piroteknik salanlardır.

2.1.1. Piroteknik Sistemler

Salan (Bomb Rack Unit) sistemlerinde kullanılan piroteknik kartuşlar, hafif ve enerji verimli bir çözüm sunarken, beraberinde bazı dezavantajlar taşır. Uçakların kanat ve gövde altı istasyonlarına yerleştirilen salanlar, ateşleme emri alındığında, kartuşun elektriksel olarak tetiklenmesi ile oluşan kimyasal reaksiyon sonucu açığa çıkan gaz sayesinde mekanik bir salma işlemini gerçekleştirerek mühimmatın uçaktan uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Ancak bu gazın kaynağı olan piroteknik

kartuşların kullanımı, takip eden bakım ve lojistik zorluklarla ilişkilendirilmektedir.

Ateşleme ile tetiklenen kimyasal reaksiyon sonrası oluşan kül ve artıklar, nem ve aşındırıcı elementler içermekte ve ekipmanın yakın çevresinde birikmektedir. Kalıntıların düzenli olarak temizlenmemesi halinde uçağın yüzeyinde kalıcı hasar ve mekanizmaların tıkanması nedeniyle ekipman ek bakımları oluşabilmektedir. Temizleme işlemi ise uzun süreli ve iş gücü yoğun bir süreçtir.

Atıkların sistem içinden ve uçak gövde parçalarından temizlenmesi amaçlı kullanılan solventlerin depolanması, kullanımı, taşıma ve bertarafı özel önlemler gerektirmekte ve ek risk faktörleri oluşturmaktadır. Harcanmış kartuşların çıkarılması, serbest bırakılmamış mühimmatların boşaltılmadan önce canlı kartuşların güvenli bir şekilde uzaklaştırılması gibi işlemler, görev personeli için ek yük oluşturmakta ve göreve dönüş süresini artırmaktadır.

Piroteknik kartuş takmadan önce yapılan stray voltaj kontrolleri, olası tesadüfi ateşlemeleri önlemek için zaman ve uzmanlık gerektirmektedir. Patlayıcı doğaları nedeniyle kartuşların stoğu, taşıması ve depolanması özel düzenlemeler ve sıkı kontrollere tabi olup, sınırlı raf ömrü nedeniyle tarih takibi ve stok yönetimi de kritik önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, piroteknik kartuşların beraberinde getirdiği bakım, güvenlik ve lojistik problemlerinin üstesinden gelmek için sürekli iyileştirme ve alternatif çözüm arayışlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

2.1.2. Pnömatik Güç Sistemi

Modern askeri uçaklarda piroteknik sistemlerin yerini alan pnömatik güç sistemi, dahili silah istasyonlarının ve/veya kanat altı silah istasyonlarının çevre koşullarından etkilenmeksizin, uçuş profilinin her noktasında atışa hazır olmasından sorumludur. Günümüz uçaklarında bu sistem, özellikle mühimmatların gövde içerisinden dışarı itilmesini gerektiren dahili silah istasyonlarında güvenli ayrılmanın sağlanabilmesi için kritik bir öneme sahiptir.

2.1.2.1 Pnömatik Güç Sistemi Mimarisi

Pnömatik güç sisteminin temel amacı, yüksek basınçta, temiz ve kuru havayı kontrollü bir şekilde silah istasyonlarına sağlamaktır. Pnömatik güç sisteminin mimarisi, bu gereksinimi sağlamak üzere seçilmiş ekipmanlardan oluşmaktadır.

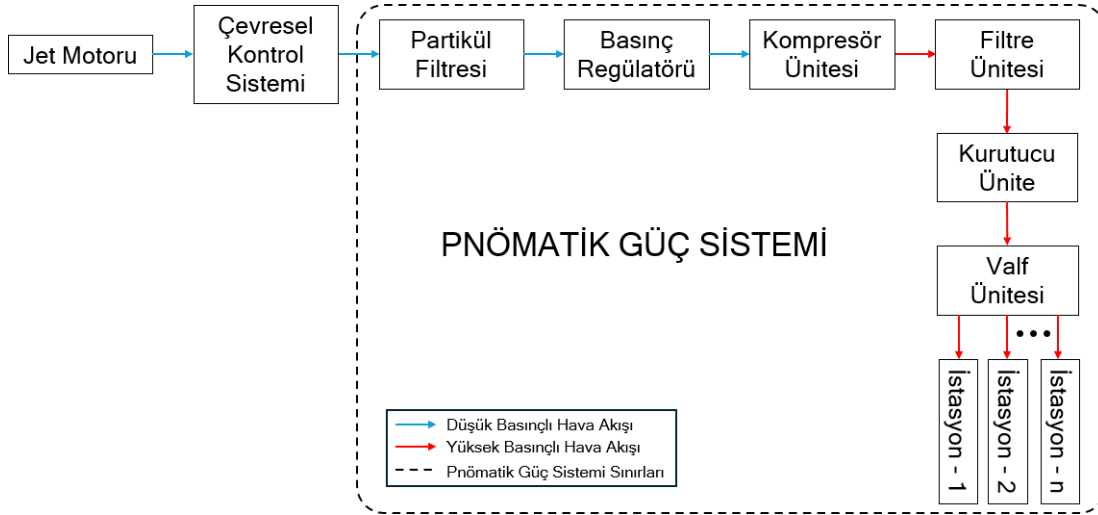
Sistemin ihtiyaç duyduğu besleme havası, uçağın Çevresel Kontrol Sistemi'nden (ECS) veya doğrudan atmosferden sağlanabilmektedir. Bu hava, bir dizi basınç düzenleyici ve filtreden geçerek kompresör girişine uygun şekilde şartlandırılmaktadır. Şartlandırma sonrası kompresöre ulaşan hava, burada güvenli ayrılma için ihtiyaç duyulan yüksek basınca sıkıştırılmakta, sıkıştırılan hava tekrar bir dizi filtre ve kurutucu ekipmandan geçerek, salanların ömür ve performans isterlerini karşılayacak temizlik ve kuruluğa ulaşmaktadır.

Üretilen bu temiz ve kuru hava, silah istasyonlarına dağıtılmak üzere bir valf ünitesine iletilmektedir. Uçak içi haberleşme ile yönetilen bu hava dağıtım süreci sayesinde, istasyon basınçları güvenli ayrılma için ihtiyaç duyulan seviyede tutulmaktadır.

İstasyonlardaki basınç değeri, atış komutu gelinceye kadar korunmaktadır. Pilot tarafından tetiklenen atış komutuyla birlikte, depolanan yüksek basınç, salan mekanizması içerisinde yer alan ejektör pistonlarına iletilmekte ve mühimmatın ayrılması sağlanmaktadır.

Uçak içerisinde basınçlı havanın sürekli bir şekilde üretimi sayesinde akümülatör basınçlarının yenilenebilmesi, pnömatik güç sisteminin piroteknik sistemlere kıyasla sahip olduğu en önemli avantajlardan biridir. Bu durum, hem mühimmatlar fırlatılmadan önce, akümülatör basınçlarının çevresel koşullardan etkilenmesinin önüne geçmekte, hem de mühimmatlar fırlatıldıktan sonra, akümülatörlerin dolumuna devam edildiği için çok daha hızlı bir görev döngüsü sağlamaktadır.

Şekil 1'de Pnömatik Güç Sistemi'ne ait temsili bir mimari verilmiştir. Sistem mimarisinde yer alan ekipmanlar incelendiğinde, kurutucu üniteye ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu bileşenin varlığı, pnömatik sistemlerin genel bir problemi olan nemin olumsuz sonuçlarına maruz kalmamak için gereklidir. Havanın içerisinde muhakkak belli bir oranda nem bulunmaktadır ve yüksek basınç altında bu nemin yoğunlaşması kaçınılmazdır. Bu sebeple, özellikle kompresör çıkışındaki havanın kurutulması, gerek hatlarda donmaya bağlı tıkanıklıklar olmaması, gerekse ekipmanların korozyon sebebiyle hasar almaması için kritik hale gelmektedir. Kurutma önlemine ek olarak, korozyona dayanıklı malzeme ve kaplama seçimi de pnömatik sistem ekipmanlarının tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır.



Şekil 1. Pnömatik Güç Sistemi Mimarisi

Bu sistemlerde 1 bar seviyelerindeki giriş basıncının, kompresörde yaklaşık 350 bar seviyelerine kadar çıkarılması gerekmektedir. Bu denli yüksek bir sıkıştırma oranının, kısıtlı bir hacimde elde edilebilmesi için çok kademeli, sabit deplasmanlı eksenel pistonlu kompresörler yaygın bir tercihtir. Havacılıkta ağırlığın uçuş performansı ve maliyet üzerindeki kritik etkisi nedeniyle, hafif ve kompakt ekipmanların kullanılması gerekmektedir. Günümüzde mevcut kompresör çözümlerinin yerini yüksek verimli mini kompresör sistemleri almaktadır. Yeni nesil bu sistemler, ileri malzeme ve tasarım teknikleri sayesinde kompakt ve hafif yapılarıyla ihtiyaç duyulan yüksek basınçlı havayı güvenilir şekilde üretebilme kabiliyeti sunmaktadır.

2.1.2.2 Değişken Uçuş Koşullarında Atışa Hazırlık

Askeri uçaklar, uçuş zarfları gereği oldukça geniş bir irtifa aralığında görev icra ederler. Bu sebeple atmosfer özelliklerinin irtifaya bağlı değişimi, hava aracı sistemlerinin tasarımında belirleyici bir rol oynamaktadır. Bu değişimin ifade edilmesinde Uluslararası Standart Atmosfer (ISA) modeli kullanılmaktadır. Bu modelde, deniz seviyesindeki sıcaklık 15°C olarak tanımlanmıştır ve deniz seviyesinden 11,000 metreye kadar her 1,000 metrede (3280.839 ft) bir sıcaklığın 6.5°C düşeceği belirtilmiştir. 11,000 metre (36,089 ft) ve 20,000 metre (65,600 ft) arasında ise -56.5 °C'lik sabit sıcaklık söz konusudur [4].

Askeri uçakların görev yaptığı geniş irtifa aralıkları dikkate alındığında, deniz seviyesinden kalkış yapan bir uçağın, irtifa sebebiyle maruz kalacak olduğu sıcaklık değişimi oldukça yüksek olmaktadır. Bu durum, silah istasyonlarına ait akümülatörler özelinde değerlendirildiğinde, ideal gaz yasası gereğince akümülatör basıncı, irtifaya bağlı sıcaklık değişiminden ters orantılı şekilde etkilenecektir. Bu durumda, her ne kadar kalkış öncesi silah istasyonlarındaki akümülatörlerin tam dolu hale getirilmesi gerekli olsa da kalkış sonrası artan irtifanın yarattığı soğuma ile birlikte,

akümülatör basınçlarında düşüş kaçınılmazdır.

Akümlatör basıncındaki bu düşüşün uçuş esnasında takviye edilememesi, basıncın güvenli ayrılma için ihtiyaç duyulan seviyenin altına düşmesine sebep olabilmektedir. Mühimmatların kullanılabilir durumda tutulması için çeşitli çözümler gerekmektedir. Bir askeri uçakta silah istasyonlarının, çevresel koşullardan bağımsız olarak sürekli şekilde atışa hazır halde tutulması hayati öneme sahiptir. Pnömatik güç sisteminin en temel fonksiyonlarından biri, uçuş koşullarından bağımsız olarak, uçak içerisinde sürekli bir basınç üretimi gerçekleştirmek ve ihtiyaç duyulduğunda akümülatör basıncını takviye etmektir. Böylece basınç düşüşünden ötürü görev kaybı riski en aza indirilmiş olur.

2.1.2.3 Hızlı Görev Döngüsü

Askeri uçaklar için, belirli bir süre içerisinde yapılabilen görev sayısı, muharebe koşullarındaki etkinliğin en önemli göstergelerinden biridir. Bu sebeple bir askeri uçağın, bir görevi tamamlamasının ardından, ikinci göreve hazır hale gelmesi için gerekli sürenin mümkün mertebe kısa olması istenmektedir. Bu hazırlık sürecinde bakım personeli tarafından genellikle yakıt takviyesi, mühimmat yüklenmesi ve hata kontrolü işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Askeri uçakların sonraki kalkışa hazır hale gelebilmesi için, mühimmatların atışa hazır halde bulunması gerekmektedir. Piroteknik salanların atışa hazır hale getirilebilmesi için, patlamış kartuşların çıkarılması, salan mekanizmalarının temizlenmesi ve yeni kartuşların yüklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle; görev sayısı kaydı tutulan salanlar, bakım sürecine hızlıca ulaşmakta ve iki görev arası istasyonlarda sadece silah yüklemesi değil salan değişimi yapılması da sıklıkla gerçekleştirilmektedir. Pnömatik salanlarda ise piroteknik salanlardan farklı olarak, sadece akümülatör basıncının atış için gerekli değere çıkarılması yeterlidir. Yer operasyonlarında bu işlem, harici bir yer istasyonundan akümülatörlere basınç sağlanması şeklinde olabileceği gibi, uçağın kendi kompresöründen de yararlanılabilir. Ancak her iki durumda da salanların atışa hazır hale gelebilmesi için bir dizi yer operasyonuna ihtiyaç duyulmakta ve bu durum sortiler arası hazırlık süresinin uzamasına sebep olmaktadır.

Pnömatik güç sisteminin önemli bir fonksiyonu, askeri uçak yere indikten sonra, tekrar göreve hazır hale gelebilmesi için ihtiyaç duyulan bu hazırlık sürecini kısaltmaktır. Basıncı hava, pnömatik güç sistemi sayesinde uçak içerisinde sürekli bir şekilde üretildiği için, mühimmat fırlatıldıktan sonra basıncı tamamen boşalan akümülatörlerin dolumuna, uçak yere inmeden de başlanabilmektedir. İdeal senaryoda, görev esnasında kullanılan bütün istasyonların, uçak yere inene kadar tam dolu hale gelmesi beklenmektedir. Böylece yer operasyonları sırasında, akümülatörlerin dolumuna ekstra bir zaman harcanmaması sağlanmaktadır.

2.2. İkincil Güç Kaynağı Olarak Pnömatik

Bir askeri uçağın tasarımında, uçak içerisinde yer alan bütün sistem ve ekipman seviyesi fonksiyonların tanımlanması, hangi fonksiyonların kaybında uçuş güvenliğinin etkileneceğini tespit etmek için önemli bir adımdır. Yakıt pompalarının motora yakıtı iletmesi, hidrolik sistemlerin kontrol yüzeylerine ve iniş takımlarına gerekli gücü sağlaması, fırlatma koltuğunun, pilotu uçaktan güvenli bir şekilde ayırması, birçok askeri uçakta bulunan kritik fonksiyonlardandır. Uçuşun herhangi bir fazında, bu tür fonksiyonların icrasındaki bir hata ölümcül sonuçlar doğurabilir. Dolayısıyla uçuş güvenliği açısından kritik olarak değerlendirilen sistem ve ekipmanların, uçuş koşullarında hatalı çalışma olasılığı belli bir seviyenin altında kalmak zorundadır. Bu sebeple, kritik bir ekipmanın ya da sistemin kaybı durumunda, aynı görevi eş değer düzeyde veya kısıtlı kapasitede gerçekleştirebilecek yedek çözümlerin geliştirilmesi bir zorunluluk haline gelmektedir.

Hava araçlarının önemli bir çoğunluğunda, kontrol yüzeylerinin hareketi ve iniş takımlarının açılma ve kapanma fonksiyonu yüksek basınçlı hidrolik sistemler tarafından gerçekleştirilir. Hidrolik sistemlerin bu tür uygulamalarda birincil güç olarak tercih edilmesinin nedeni, hidrolik akışkanların sıkıştırılmaz yapıda olmalarıdır. Sıkıştırılmaz bir akışkanla çalışmaları sebebiyle hidrolik sistemler, pnömatik

sistemlere kıyasla daha kararlı, hassas ve rijit bir kontrol imkânı sunmaktadır. Özellikle kontrol yüzeylerinin aerodinamik kuvvetler karşısında esnemenen pozisyonunu koruyabilmesi, hidrolik sistemlerin sıkıştırılmaz doğası sayesinde mümkün olmaktadır. Bunlara ek olarak hidrolik hatlar, gövde, kanat ve kuyruktaki eyleyicilerin tamamı düşünüldüğünde, uçak içerisinde çok geniş bir alana yayılmaktadır. Bu kadar uzun ve çok sayıdaki boru hattının içerisinde, hidrolik yerine hava gibi sıkıştırılabilir bir akışkanın dolaşması, arzu edilen sistem basıncının sağlanması konusunda ciddi zorluklar doğuracaktır. Uçağın maruz kaldığı sıcaklık değişimleri sonucu yaşanacak olan basınç dalgalanmalarını takviye etmek, hava basıncının değişkenliği sebebiyle kontrolü çok zorlu bir probleme dönüşecektir. Bu sebeple, sıcaklık dalgalanmalarına karşı daha kararlı bir yapıda olan hidrolik sistemler ana güç dağıtma sistemi olarak birincil önceliktedir.

Fakat belirtilen bu güçlü yönleri, hidrolik sistemin sızıntı, savaş hasarı ve motor arızalanması gibi durumlar sonucunda kaybedilebileceği gerçeğini değiştirmemektedir. Bu sebeple çeşitli yedekleme çözümleri geliştirilmiştir. Pnömatik sistemlerin bu yedekleme çözümleri arasında tercih edildiği en yaygın uygulama alanı ise, iniş takımlarının açılmasıdır.

İniş takımlarının açılma ve kapanma fonksiyonlarının doğru çalışması, uçuşun bütün fazları için önem arz etmektedir. Ancak özellikle iniş esnasında iniş takımlarının açılmaması, mürettebatı gövde üzerine iniş (belly landing) yapmak gibi oldukça tehlikeli bir senaryoya baş başa bırakabilir. Bu sebeple sistem mimarisi oluşturulurken, bu tür bir senaryonun yaşanma ihtimali mümkün olan en düşük seviyeye indirilmelidir. Bu bağlamda iniş takımı mimarilerinde, pnömatik sistemler de dahil olmak üzere birçok yedekleme stratejisi mevcuttur. Gazların sıkıştırılabilir olmaları sayesinde pnömatik sistemler, yüksek basınçların küçük hacimlerde depolanabilmesini sağlamaktadır. Sağladığı bu kompakt yapı sebebiyle bir pnömatik sistem, hidroliğin kaybı durumunda iniş takımlarının tek seferlik açılmasını sağlamak, böylece güvenli inişi garanti etmek için oldukça ideal bir çözümdür. Bir avcı uçağı olan Hawk 200'ün hidrolik sistem mimarisinde, acil durum anında iniş takımı ve flapların tek seferlik açılmasını sağlamak adına nitrojen içeren bir basınçlı akümülatör bulunmaktadır [2]. Benzer şekilde, Tornado [2] ve F-16 uçaklarında da [5], hidrolik sistemin kaybı durumunda iniş takımının açılması için gerekli güç bir nitrojen akümülatöründen sağlanmaktadır.

Pnömatik sistemin çalışma prensibi, akümülatörde depolanan gücün ihtiyaç halinde serbest bırakılmasına dayanmaktadır. Nitrojen akümülatör içerisinde yer alan basınçlı gaz ile iniş takımı eyleyicileri arasında bir valf bulunmaktadır. Bu valf, hidrolik kaybı yaşanmadığı müddetçe kapalı vaziyettedir. Hidrolik sistemin arızalı olduğu ve iniş takımlarının hidrolik güç ile açılmayacağı pilot tarafından tespit edildiğinde, pilot kokpitteki bir kol veya buton vasıtasıyla, normalde kapalı olan bu valfin açılmasını ve basınçlı gazın eyleyicilere ulaşmasını sağlamaktadır. Eyleyicilere ulaşan basınçlı gaz, hem iniş takımlarının kilitlerini açmakta hem de iniş takımlarının açılması için gerekli basıncı üretmektedir. Sistem tasarımına bağlı olarak iniş takımları açılırken, basınçlı bir itki yerine serbest düşme de yeterli olabilir. Böyle durumlarda pnömatik sistemin temel fonksiyonu, ilgili iniş takımını kilidinden kurtarmaktır.

3. PNÖMATİK SİSTEMLERİN GELECEĞİ/GELİŞİM POTANSİYELLERİ

Dünya genelinde daha verimli ve sürdürülebilir sistemlere olan ihtiyaç, havacılık endüstrisini de şekillendirmektedir. Sektördeki bu yönelim doğrultusunda, literatürde daha elektrikli uçak (More Electric Aircraft — MEA) adıyla geçen bir konsept ortaya çıkmıştır. Bu konseptin temel amacı, hava aracı sistemlerinde yaygın olarak kullanılan pnömatik, hidrolik ve mekanik güç kaynaklarının elektrifikasyonudur.

Enerji kaynağındaki bu köklü dönüşümle hedeflenen, gelecekteki hava araçlarının daha sessiz, yakıt tüketimi açısından daha verimli ve bakım maliyetlerinin daha düşük olmasını sağlamaktır [6].

Daha elektrikli uçak yaklaşımının en önemli hedeflerinden biri, hava aracı sistemlerinde pnömatik güç kaynağı olarak tahliye havasının (bleed air) kullanımını ortadan kaldırmaktır. Motorun itkiye dönüştürebilecek olduğu havanın bir kısmının tahliye havası olarak kullanılması, motordan alınan

itkinin azalması, özgül yakıt tüketiminin artması ve motor sıcaklığının yükselmesi gibi hava aracı performansını olumsuz etkileyecek verimsizlikler doğurmaktadır [7]. Bu sebeple uçaktaki pnömatik güç ihtiyacını, tahliye havasına bağlı kalmadan elektrikli kompresörler vasıtasıyla karşılamak, daha elektrikli uçak konseptine uygun bir çözüm olacaktır. B787’de kullanılan tahliye havasız motor mimarisi bu felsefenin uygulandığı somut bir örnektir. Tahliye havasının neredeyse tamamen ortadan kaldırılmasıyla birlikte, çevresel kontrol sistemi ve kabin basınçlandırma sistemi için ihtiyaç duyulan hava, dört adet elektrikli kompresör tarafından sağlanmakta, böylece hem uçak motorunun çalışma verimi artmakta, hem de tahliye havasının uçağın gövdesi boyunca taşınması için gereken borulama sistemi ve ekipmanlara ihtiyaç kalmamaktadır [2].

Askeri uçaklarda da kabin basınçlandırması ve mühimmat bırakılması gibi fonksiyonların yerine getirilmesi için birincil güç kaynağı olarak motordan alınan tahliye havası kullanılmaktadır. Bu havanın uçak motoru yerine elektrikli kompresörler vasıtasıyla dış ortamdan alınması, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından bir gelişim potansiyeli sunmaktadır.

Yapay zeka ve makine öğrenmesi temelli modellerin pnömatik sistemlerin sağlığının izlenmesinde kullanımının yaygınlaştırılması da önemli bir gelişme alanı sunmaktadır. Gelişmiş sensör teknolojileriyle birlikte pnömatik sistem bileşenlerinden ölçülen sıcaklık, basınç ve ivme gibi verilerin kaydedilmesi ve bu verileri analiz ederek sistem sağlığını değerlendiren modeller üretilmesi, kestirimci bakımın ana odağıdır. Geniş bir veri setiyle eğitilen algoritmalar, sistemden aldıkları bu verileri akıllı bir şekilde işleyerek, bir pnömatik sistem için kritik olan kompresör, filtre, kurutucu, valf ve regülatör gibi ekipmanların çalışma karakteristiğindeki değişimi izleyebilir. Böylece bu tür kritik ekipmanların kalan kullanım ömrüne dair çıkarımlarda bulunarak, olası bir arızanın uyarısını bakım personeline haftalar öncesinden verebilir. Bu yaklaşım, bakım planlanmasını kolaylaştırarak beklenmedik aksamaları ve görev iptallerini en aza indirir. Ayrıca ilgili bileşenlerin kalıcı bir hasara uğramadan tespitinin ve onarımının yapılması, daha büyük hasarların önüne geçilmesini sağlar.

Yapay zeka ve makine öğrenmesi temelli modeller, pnömatik sistem ve mühimmat bırakma sistemlerinin entegrasyonunu da daha verimli hale getirebilir. Mevcuttaki sistemler, mühimmatların güvenli ayrılması için akümülatör basınçlarının hesaplanmış, belli bir değerde tutulması prensibiyle çalışmaktadır. Bu basınç değeri genelde, uçağın belirlenen uçuş profillerindeki en zorlayıcı güvenli ayrılma koşulu dikkate alınarak belirlenir. Ancak pratikte mühimmatların, daha düşük basınçlarda da güvenli ayrılabilmesi koşulları mevcuttur. Bu doğrultuda geliştirilecek yeni nesil sistemler; sabit başlık değişimine bağlı kalmaksızın, uçuş sırasında silah sistemlerinden alınan anlık basınç verilerini, hız, irtifa, dış ortam sıcaklığı ve aerodinamik yükler gibi değişkenlerle birlikte dinamik olarak değerlendirerek yönetmelidir. Yapay zeka destekli algoritmalar, manuel olarak tanımlanamayacak kadar karmaşık koşulları gerçek zamanlı analiz ederek, belirlenen hedefin başarıyla vurulup vurulamayacağını operasyon anında değerlendirebilir. Basıncın önceden hesaplanan optimum değerden sapması durumunda dahi, pnömatik sistemin yönetimindeki esneklik sayesinde, mevcut koşullarda emniyetli ve etkili bir mühimmat bırakma işleminin mümkün olup olmadığı tespit edilir. Bu sayede pnömatik sistem, sadece güvenli ayrılma koşullarına göre çalışmakla kalmayıp, aynı zamanda kaynakların daha verimli kullanılmasıyla görev başarımında fark yaratacak şekilde optimize edilir ve pilota “atışa hazır” bilgisi iletilir. Böylece hem uçuş güvenliği korunur hem de operasyonel esneklik ve sistem verimliliği önemli ölçüde artırılmış olur.

Pnömatik sistemlerin gelişim potansiyelleri, yalnızca daha elektrikli ya da daha akıllı sistemler geliştirmekle sınırlı değildir. Sağladıkları hafiflik ve yüksek mukavemet gibi avantajlar sebebiyle havacılık endüstrisinde sıklıkla tercih edilen kompozit malzemelerin, pnömatik sistem bileşenlerinde kullanımının yaygınlaşması da bir gelişim potansiyeli olarak ön plana çıkmaktadır. Pnömatik sistemlerin önemli bir çoğunluğunda, havanın depo edildiği basınçlı kaplar kullanılmaktadır. Kompozit sargılı basınçlı kaplar, benzer bir metal tankın ağırlığının yaklaşık yarısı ağırlığındadır [8]. Dolayısıyla kompozit sargılı basınçlı kapların metal tankların yerini alması, mühimmat bırakma sistemleri gibi havacılık uygulamaları için ağırlık kazancı potansiyeli sunmaktadır. Kompozit malzeme dönüşümü basınçlı kaplarla da sınırlı değildir. Özellikle hafifliğin ön planda olduğu uygulamalarda, pnömatik eyleyiciler, valf blokları, piston gibi pnömatik bileşenlerin üretiminde de kompozit malzemelerin kullanımı daha hafif tasarımları mümkün kılma potansiyeline sahiptir.

SONUÇ

Çalışma kapsamında askeri uçaklarda yüksek basınçlı pnömatik sistemlerin kullanım alanları incelenmiş, pnömatik sistemlerin her bir uygulama özelindeki güçlü ve zayıf yönleri değerlendirilmiş, askeri uçaklardaki kullanımının mühimmat bırakma ve iniş takımlarının acil durum koşullarında açılması gibi spesifik uygulamalarda kritik rolleri açıklanmıştır. Pnömatik sistemler, sahip oldukları bir takım operasyonel üstünlükler sebebiyle, mühimmat bırakma uygulamalarında piroteknik sistemlerin yerini almaktadır. Bu üstünlüklerin başında, pnömatik sistemlerin görev döngüsünü hızlandırması, bakım kolaylığı sunması ve daha güvenli bir enerji kaynağı olması gelir. Ayrıca gazların bir basınçlı kap içerisinde hafif ve kompakt bir şekilde depolanabilme özelliğiyle pnömatik sistemler, hidrolik sistemin kritik fonksiyonları için ideal bir yedek güç kaynağı haline gelmektedir.

Bütün bu üstünlüklerin yanı sıra, pnömatik sistemlerin birtakım dezavantajları da mevcuttur. Özellikle havadaki nemin hat ve ekipmanlara zarar verme tehlikesine karşı, bu tür sistemlerin mimarilerinde kurutucu ekipmanların kullanılması gerekmektedir. Ek olarak hassas kontrol ve rijitlik gerektiren uygulamalarda hidrolik sistemler, pnömatik sistemlere kıyasla daha üstün konumdadır.

Yüksek basınçlı pnömatik sistemlerin güçlü ve zayıf yönleri bir arada değerlendirildiğinde, güçlü yönlerinin ağır bastığı kritik havacılık uygulamalarının mevcut olduğu görülmektedir. Gelecekte ise, pnömatik sistemlerin, daha elektrikli uçak konseptine adapte olması, yapay zeka ve makine öğrenmesi destekli operasyonel ve bakım algoritmalarının geliştirilmesi, kompozit bazlı hafif bileşenlerin pnömatik sistemlerde yaygınlaştırılması gibi potansiyel gelişim sahaları sayesinde, modern hava araçlarının karmaşık hale gelen gereksinimlerini karşılama konusunda yetkin bir konuma geleceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] CROSER, P., EBEL, F., "Pneumatics: Basic Level", Festo Didactic GmbH & Co., 2002.
- [2] MOIR, I., SEABRIDGE, A., "Aircraft Systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration", John Wiley & Sons, 2008.
- [3] AYDIN ORBEY, P., "Füze Dikey Atış Lançeri Kilit Mekanizması Tasarımının Malzeme, Kaplama ve Üretilebilirlik Açısından Değerlendirilmesi", Millî Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü, 2022.
- [4] CAVCAR, M., "The international standard atmosphere (ISA)", Anadolu University, Cilt 30, Sayı 9, Say. 1-6, 2000.
- [5] BMS Docs Team, "TO 1F-16CM/AM-1 BMS FLIGHT MANUAL", Benchmark Sims, 2024
- [6] WHEELER, P., BOZHKO, S., "The More Electric Aircraft: Technology and challenges", IEEE Electrification Magazine, Cilt 2, Sayı 4, Say. 6-12, 2014.
- [7] EVANS, A. B., "The Effects of Compressor Seventh-Stage Bleed Air Extraction on Performance of the F100-PW-220 Afterburning Turbofan Engine", National Aeronautics and Space Administration, 1991
- [8] MCLAUGHLAN, P. B., FORTH, S. C., GRIMES-LEDESMA, L. R., "Composite Overwrapped Pressure Vessels, A Primer", National Aeronautics and Space Administration, 2011

ÖZGEÇMİŞ

Gökтуğ YILMAZ

1996 yılında Trabzon'da doğmuştur. Lise eğitimini 2014 yılında Trabzon Gazi Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden

Lisans derecesini, 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden Lisans derecesini, 2023 yılında ise Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği bölümünden Yüksek Lisans derecesini almıştır. İş hayatına Aralık 2020'de ASAŞ Alüminyum'da başlayan Göktuğ, 2022 yılında TUSAŞ'ta tasarım mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır. Nisan 2024 tarihinden itibaren TUSAŞ'ta Akışkan Sistemler Tasarım Mühendisi olarak görevini sürdürmektedir.

Pelin AYDIN ORBEY

1987 yılında Sakarya'da doğmuştur. Lise eğitimini 2005 yılında Ankara Çağrıbey Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. 2011 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden lisans derecesini almıştır. 2022 yılında Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri ve Milli Güvenlik Enstitüsü, Silah Sistemleri Mühendisliği alanında Yüksek Lisans derecesini almıştır. 2009-2020 yılları arasında çeşitli firmalarda Balistik Zırh ve Akıllı Mühimmat Sistemlerinin yerleştirilmesi ve imalatı üzerine çalışmıştır. 2020 yılında TUSAŞ'ta Silah Sistemleri Tasarım Mühendisi olarak görev almış, Ağustos 2024 tarihinden itibaren ise TUSAŞ'ta Akışkan Sistemler Tasarım Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

Berk BERBER

1995 yılında Kırklareli'nde doğmuştur. Lise eğitimini 2013 yılında Lüleburgaz Lisesi'nde tamamlamıştır. 2018 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden Lisans derecesini almıştır. 2019 yılında TUSAŞ'ta Test Sistemleri Tasarım Mühendisi olarak iş hayatına başlamıştır. Eylül 2024 tarihinden itibaren TUSAŞ'ta Akışkan Sistemler Tasarım Mühendisi görevini yürütmektedir.

Alper BULUT

1992 yılında Ankara'da doğmuştur. Lise eğitimini 2010 yılında TED Ankara Koleji'nde tamamlamıştır. 2014 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden Lisans derecesini, 2021 yılında ise Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden Yüksek Lisans derecesini almıştır. 2014 yılında Arçelik BİM fabrikasında proses mühendisi olarak iş hayatına başladıktan sonra 2016 yılında TUSAŞ'ta hidrolik sistem tasarım mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır. Temmuz 2022 tarihinden itibaren TUSAŞ'ta Akışkan Sistemler Başmühendisi görevini yürütmektedir.