

1001 – BİLİMSEL VE TEKNOLOJİK ARAŞTIRMA PROJELERİNİ DESTEKLEME PROGRAMI PROJE BAŞVURU FORMU

Başvuru formunun Arial 9 yazı tipinde, her bir konu başlığı altında verilen açıklamalar göz önünde bulundurularak hazırlanması ve ekler hariç toplam 25 sayfayı geçmemesi gerekmektedir. Dosya depolama/paylaşım sistemlerindeki dosyalara ve/veya web sayfalarına link verilerek proje içeriğinin başvuru formu sınırları dışında ayrı bir alanda paylaşılması halinde, proje bilimsel değerlendirmeye alınmadan iade edilir. Form değişiklikleri izle modunda bırakılmamalı ve yorum içermemelidir. Formun içeriği ayrı bir ek olarak farklı dosyada paylaşılmamalıdır. Proje önerisine ilişkin tüm bilgilerin formda yer alan ilgili bölüme eklenmesi ve formun nihai halinin tek bir dosya olarak başvuru sistemine yüklenmesi gerekmektedir. Proje önerisi değerlendirme formuna ulaşmak için [tıklayınız](#).

Proje Başlığı: Uçak Kanadının Darbeli Rüzgar Yükü Hafifletme Performansının Aktif Akıllı Kontrollü Kanat Ucu Cihazları ile İyileştirilmesi: Sayısal ve Deneysel Çalışmalar
Proje Yürüttücüsü: Doç. Turaç Farsadi
Projenin Yürüttüleceği Kurum/Kuruluş: Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

ÖZET

Proje Özeti

Bu proje, Türkiye'nin havacılık endüstrisinde önemli bir atılımı temsil etmekte olup, insansız hava araçları için esnek ve yüksek oranlı kanatların oluşturulmasına vurgu yapmaktadır. Baykar ve TUSAŞ, ürünlerini geliştirmek için küresel firmalarla rekabet ederken, maksimum kalkış ağırlığı artarken yakıt tüketimini azaltma ve dayanıklılığı artırma üzerine odaklanmaktadır. Bu hedeflere ulaşmak, kapsamlı çok disiplinli optimizasyonu ve standart uçak tasarımlarına en son teknolojilerin entegrasyonunu gerektirmekte, böylece mümkün olanın sınırlarını genişletmektedir. Araştırma projemiz aynı zamanda, dünyanın ilk hidrojenle çalışan yolcu uçağını geliştirmeyi hedefleyen Avrupa Havacılık Ufku Flightpath 2050 ve Airbus'in Horizon 2050 girişimiyle stratejik olarak uyumlu olup, bu ıddialı hedefi karşılamak için uçak tasarımını ve aerodinamikte kritik ilerlemelere odaklanmaktadır. Airbus'in İngiltere'deki Uçuş Fiziği Başkanı Simon Galpin, DiPart 2024 konferansında, platform verimliliğini artırmanın ve enerji taleplerini önemli ölçüde azaltarak uçak performansını iyileştirecek yenilikçi kanat ucu teknolojileri gibi katlanabilir kanat uçlarının entegrasyonunun zorunluluğunu vurgulamıştır. Bu ilerlemeler, Airbus'in hidrojenle çalışan prototip uçağının 2035 civarında beklenen lansmanına kadar kritik öneme sahiptir. Mevcut araştırmalardaki boşluğu ele almak üzere, projemiz aktif servo motorlu akıllı kontrol sistemi ile hareketlendirilen dönüştürülebilir katlanabilir kanat uçlarıyla ilişkili karmaşık aerodinamik ve aeroelastik olayları keşfetmek için yüksek sadakatlı sayısal CFD-CSD simülasyonları ile deneysel aeroelastik araştırmaları birleştiren yenilikçi bir yaklaşım önermektedir. Büyüük deformasyonlar ve kanat ucu cihazlarının optimize edilmesi üzerine odaklanarak, geleneksel aktif ve pasif yöntemlere göre aktif akıllı kontrol sistemlerinin faydalalarını değerlendirmek için derinlemesine aero-servo-elastik analizler yapmayı hedefliyoruz. Hedeflerimize ulaşmak için, Dr. Farsadi'nin İleri Simülasyon Laboratuvarı tarafından geliştirilen yerleşik Doğrusal Olmayan Aeroelastik Simülasyon Yazılımı (NAS²) kullanılmaktadır. NAS², karmaşık kompozit kanat yapılarını yüksek sadakatlı sunlu eleman analizi aracılığıyla ele alabilme yeteneği, projemizin başarısı için hayatı öneme sahiptir. Projemiz, belirli araştırma hedefleri ve görevleri ele alan beş ayrı çalışma paketinden (IP) oluşmaktadır. Bunlar, aktif kanat ucu kontrolleri ile yapısal modellerin geliştirilmesi ve doğrulanması, katlanabilir kanat uçları için bütünsel bir aeroelastik analiz çerçevesi oluşturma, aktif kanat ucu yönetimi için bir kontrol sisteminin uygulanması ve değerlendirilmesi, aktif kontrol kanat ucu cihazları ile kanatların üretilmesi ve rüzgar tüneli testlerinin performansı değerlendirme ve darbeli rüzgar yükü hafifletme sisteminin etkinliğini doğrulama amacıyla yapılmasıdır. Projemiz, bilgi boşluklarını kapatmayı ve sürdürülebilir uçak tasarımında yenilik yapmak için gelişmiş simülasyon ve deneysel yöntemleri kullanmayı hedeflemektedir. Bu araştırma, aerodinamik ve aero-servo-elastisite etkileşiminin hesaba katarak, Airbus ve Boeing'in sürdürülebilir havacılık vizyonunu desteklemekte ve hidrojenle çalışan uçaşa doğru ilerlemektedir. Mevcut bilgi boşluklarını doldurarak ve en son simülasyon yazılımları ile deneysel teknikleri kullanarak, projemiz, geleceğin sürdürülebilir uçaklarının tasarımında karşılaşılan zorluklara çığır açan çözümler sunmayı amaçlamaktadır. Bu araştırma, aerodinamik ve aeroelastik anlayışın ilerlemesine katkıda bulunmanın yanı sıra, sürdürülebilir havacılık için Airbus'in vizyonunun gerçekleştirilmesine de yol açarak, hidrojenle çalışan uçuş yolculuğunda önemli bir kilometre taşı işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek en-boy oranlı kanat; Rüzgar yükü hafifletme; Katlanabilir kanat ucu cihazı; Aktif akıllı control; Doğrusal olmayan aeroelastisite; Çok disiplinli tasarım optimizasyonu; Kompozit malzeme

Title : Improving Gust Load Alleviation Performance of Aircraft Wing through Active Controlled Wingtip Devices: Numerical and Experimental Studies

Summary

This project represents a significant breakthrough in Turkey's aerospace industry, emphasizing the creation of flexible and high aspect ratio wings for unmanned aircraft. Baykar and TUSAŞ are competing with global firms to improve their offerings, focusing on reducing fuel consumption and enhancing endurance, even as the maximum takeoff weight rises. Achieving these goals requires extensive multi-disciplinary optimization and the incorporation of cutting-edge technologies into standard aircraft designs to expand the limits of what's possible. Our research project is also strategically aligned with Flighthpath 2050 European Aviation Horizon and Airbus's Horizon 2050 initiative to pioneer the world's first hydrogen-powered passenger aircraft, focusing on crucial advancements in aircraft design and aerodynamics to meet this ambitious goal. Simon Galpin, the head of Airbus Flight Physics in the UK, emphasized the necessity of enhancing platform efficiency and integrating innovative wingtip technologies such as foldable wingtips to significantly reduce energy demands and improve aircraft performance in DiPart 2024 conference. These advancements are pivotal until the anticipated launch of Airbus's hydrogen-fueled prototype aircraft around 2035. Addressing the gap in existing research, our project proposes an innovative approach combining high-fidelity numerical CFD-CSD simulations with experimental aeroelastic research to explore the complex aerodynamic and aeroelastic phenomena associated with morphable foldable wingtips actuated with active servomotor smart control system. We aim to conduct in-depth aero-servo-elastic analyses to assess the benefits of active smart control systems over traditional active and passive methods, focusing on large deformations and the optimization of wingtip devices for enhanced aircraft performance. The key innovations of this proposal are centered around two main aspects. Firstly, while there are existing studies on the use of active control in wingtip devices, this proposal marks the first instance of integrating smart active control within morphing wingtip devices. The combination of an intelligent control system with the capability for morphing presents a wholly novel concept. Secondly, this study represents the most thorough high-fidelity CFD-CSD integration for the analysis of wingtip devices to date. To achieve our objectives, we utilize the in-house developed Nonlinear Aeroelastic Simulation Software (NAS²) by Dr. Farsadi's Advanced Simulation Laboratory. NAS² is specifically designed for the aeroelastic and structural analysis of composite aircraft structures, providing precise and resource-efficient simulations across a range of analyses including strength, modal, aeroelastic, gust, and composite analysis, as well as optimization. Its capability to handle complex composite wing structures through high-fidelity finite element analysis is crucial for our project's success. Our project is structured into five distinct work packages (WPs), each designed to tackle specific research objectives and tasks. These include the development and validation of structural models with active wingtip controls, the creation of an integrated aeroelastic analysis framework for foldable wingtips, the implementation and assessment of a control system for active wingtip management, the fabrication of wings with active control wingtip devices, and conducting wind tunnel tests to evaluate performance and validate the effectiveness of the gust load alleviation system. This research advances aerodynamics and aero-servo-elasticity, supporting Airbus and Boeing's sustainable aviation vision and advancing towards hydrogen-powered flight. By filling the existing knowledge gaps and leveraging cutting-edge simulation software and experimental techniques, our project aims to deliver groundbreaking solutions to the challenges faced in the design of future sustainable aircraft. This research not only contributes to the advancement of aerodynamic and aeroelastic understanding but also paves the way for the realization of Airbus's vision for sustainable aviation, marking a significant milestone in the journey towards hydrogen-powered flight.

Keywords: High aspect ratio wing; Gust load alleviation; Folding wingtip (FWT) device; Active smart control; Nonlinear aeroelasticity; Multidisciplinary design optimization; Composite material

1. ÖZGÜN DEĞER

1.1. Konunun Önemi, Projenin Özgün Değeri

Havacılık endüstrisi, küresel ekonomiye yaklaşık 3 trilyon USD katkıda bulunarak dünya gayri safi yurt içi hasılasının (GSYİH) yaklaşık %4'ünü oluşturan devasa bir sektör olarak ekonomik anlamda geniş çaplı etkilere sahiptir. Ancak, bu önemli katkı, özellikle 1990 ve 2006 yılları arasında Avrupa Birliği'nde havacılıktan kaynaklanan sera gazı emisyonlarındaki %87'lük artışla gölgelenmektedir. Bu çarpıcı gerçeklik, Dünya üzerindeki yaşamın sürdürülürüğünü sağlamak için daha akıllı ve temiz havacılık teknolojilerine geçişin aciliyetini vurgulamaktadır. Sürdürülebilir havacılığa yönelik çaba, özellikle Avrupa Birliği, Birleşik Krallık ve Türkiye'de belirlenmiş olup, hava yolculuğunun çevresel ayak izini minimize etmeyi amaçlayan yenilikçi uçak konfigürasyonları ve teknolojilerine yönelik artan bir talep doğurmıştır. Araştırılan çeşitli yollar arasında, Yüksek Açıklıklı Kanatlar (HARW'lar), yakıt tüketimini azaltarak uçakları daha çevre dostu hale getirebilecek aerodinamik avantajlar sunarak umut verici bir çözüm sunmaktadır [1]. HARW'ların ince tasarımı, uçuşun belirli koşullarında yakıt verimliliğini artırmak için kritik olan daha büyük bir kaldırma-sürükleme oranına olanak tanıyan uç vortekslerinin olumsuz etkilerini azaltır. Bu husus, büyük taşıma uçaklarının seyir aşamasında toplam aerodinamik sürüklemenin %43'üne kadar çıkabilen aerodinamik kaynaklı sürükleme dikkate alındığında özellikle önemlidir [1]. Bu tür sürüklememeyi azaltma zorunluluğu ve daha düşük yakıt tüketimi elde etme gerekliliği, Abbas ve arkadaşlarının [2] çalışmaları gibi birçok çalışmada iyi belgelenmiş olup, sürdürülebilir uçak tasarımında aerodinamik optimizasyonun önemini vurgulamaktadır. Bu teknolojinin önemi, giderek daha esnek HARW'ları sahip olan yeni nesil yüksek verimli uçaklar ve yüksek irtifa uzun ömürlü (HALE) insansız hava araçlarının (İHA) ortaya çıkışıyla daha da örneklenmektedir. Bu gelişmeler, elastik ve HAR İHA'ların ve taşıma uçaklarının benimsenmesi yönünde küresel bir trendi vurgulamaktadır. Bu zorluklara yanıt olarak, önerilen araştırma, yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltma ve kaldırma-sürükleme oranlarını iyileştirme potansiyeline sahip olan HARW'ların doğuştan gelen avantajlarından yararlanmayı amaçlamaktadır. Boeing'in Subsonic Ultra Green Aircraft Research (SUGAR) Volt ve Airbus'ın 2050 konsept uçağı (bkz. Şekil 1) gibi ilham verici tasarımlar, her ikisi de HARW'ları içeren ve endüstriyi daha yeşil alternatiflere yönlendiren yenilikçi ruh

vurgulamaktadır. Ayrıca, Flighthpath 2050 gibi girişimler, HARW'ların merkezi bir rol oynadığı teknolojik ilerlemelerde büyük bir sıçrama gerektiren sivil havacılığın geleceği için iddialı hedefler belirlemiştir.



(a)



(b)

Şekil 1. Sivil havacılık endüstrisinde yüksek açıklıklı kanat uygulamaları (a) SUGAR Volt (b) Airbus 2050 konsepti.

HARW'nin kullanımı, indüklenen sürükleme azaltma yeteneği nedeniyle uçak tasarımcıları için özel bir ilgi alanıdır; bu da kaldırma-sürükleme oranında önemli bir iyileşme sağlar. Ancak, pratikte, havaalanı operasyonel gereksinimlerinin getirdiği kanat açıklığı sınırlamaları gibi çeşitli zorluklar ele alınmalıdır. Bu gereksinimler arasında kapı limitleri, pist uzunluğu ve taksi yolu ayımı bulunmaktadır. Sonuç olarak, HARW üzerine Folding WingTip (FWT) cihazlarının dahil edilmesi, havaalanı operasyonel gereksinimlerinin getirdiği zorlukların üstesinden gelmek için son derece cazip bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Bu cihaz, iniş sırasında kanat uçlarını yukarı doğru katlayarak uçağın kanat açıklığını yere indirir. Bu sayede uçaklar mevcut havaalanı altyapısını kullanarak operasyon yapabılırken, uçuş sırasında daha geniş bir kanat açıklığından yararlanarak indüklenen sürüklemeyi azaltabilirler. En dikkat çekici son örnek, Boeing 777 ailesinin en yeni üyesi olan Boeing 777X'tir. Bu uçak, yeni motorlar, kompozit kanatlar ve özellikle FWT'ler dahil olmak üzere birkaç önemli yenilik getirmiştir. Bu FWT'ler, uçağın katlandığında mevcut 777 uçaklarıyla aynı boyut kategorisine sağlamasını sağlar, ancak kanat açıklığını artırmak ve uçuş sırasında indüklenen sürüklemeyi azaltmak için uzatılabilir. Katlanan kanat uçları, kanat açıklığını 235 fittan 212 fite indirerek uçağın ICAO Aerodrom Referans Kodu E'ye uyumlu olmasını sağlar [3]. Ancak, katlanabilir kanat uçlarının dahil edilmesi, mekanizmalar ve aktuatörler şeklinde ek ağırlık getirir. 777X'in kanat uçları yalnızca yerde işletiliyor olsa da, bu tür mekanizmaların dahil edilmesi, katlanabilir kanat uçlarının aerodinamik veya yapısal avantajlar sağlamak için uçuş sırasında kullanılabilir olup olmayacağı sorusunu gündeme getirir.



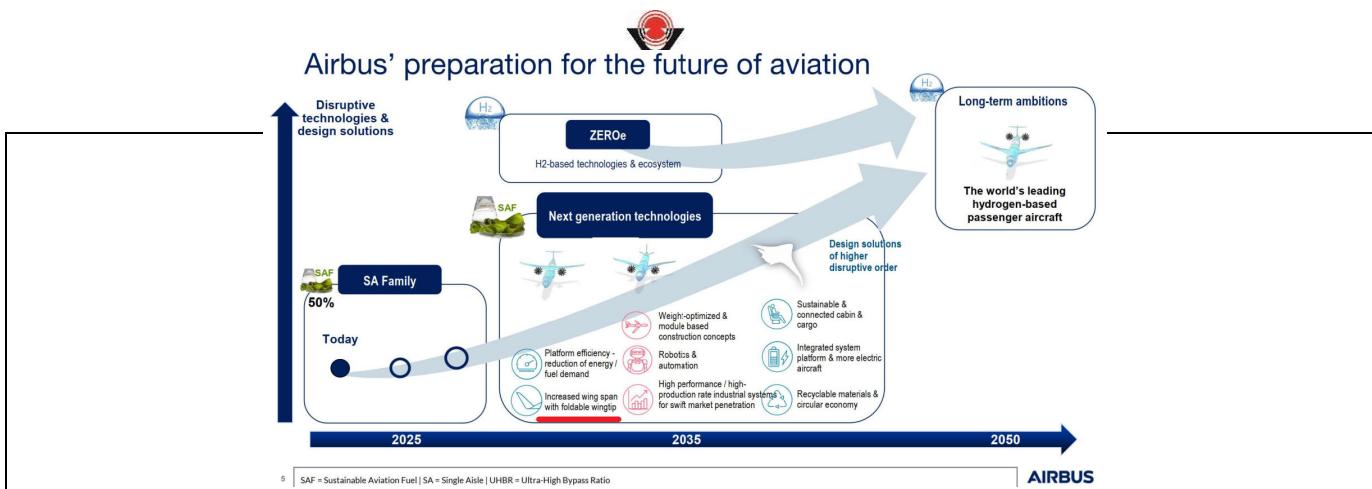
(a)



(b)

Şekil 2. Katlanabilir kanat ucu cihazları, hem a) Boeing hem de b) Airbus'ta sıcak bir araştırma konusudur.

Öte yandan, FWT'ler, türbülanslı koşullarda uçağın yapısal bütünlüğünü korumak ve yolcu konforunu sağlamak açısından kritik olan rüzgar yüklerinin getirdiği zorlukları ele almak için etkileyici bir yaklaşım sunmaktadır. Kanadın aerodinamik özelliklerini değiştirerek ve rüzgarlara karşı duyarlılığını azaltarak, FWT'ler rüzgar yükü hafifletme konusunda etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Bu cihazlar, kanadın açıklık boyunca kaldırma dağılımında hedeflenmiş ayarlamalar yaparak, rüzgar kaynaklı yüklerin etkilerini azaltmada önemli bir rol oynar. Sonuç olarak, bu durum sadece yolcular için daha yumuşak bir uçuş deneyimi sağlayarak genel seyahat kalitesini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda kanat üzerindeki yapısal gerilimi de en aza indirir ve FWT'lerin modern uçak tasarımasına dahil edilmesinin çok yönlü faydalarnı vurgular. Horizon 2050 programı ile Airbus, 2050 yılına kadar dünyanın ilk hidrojen bazlı yolcu uçağını üretmeyi hedeflemekte olup, bu hedef için ileri teknolojilere ihtiyaç duymaktadır (Bkz. Şekil 3). Airbus DiPaRT 2024'te "Airbus Uçuş Fiziği için Teknik Zorluklar" başlıklı sunumunda Airbus Birleşik Krallık Uçuş Fiziği Başkanı Simon Galpin'e göre, bu hedefe ulaşmak, kesikli daire ile gösterilen iki eşit derecede önemli araştırma alanına bağlıdır: enerji/yakit talebinin azaltmak için platform verimliliğini artırmak ve katlanabilir kanat uçları ile kanat açıklığını artırmak. Bu alanların, Airbus'ın yüksek açıklıklı hidrojen yakıtlı uçak prototipini tanıtmayı planladığı 2035 yılına kadar havacılık araştırmalarının odak noktaları olarak kalması beklenmektedir.



Şekil 3. Airbus Horizon 2050 girişimini göstermektedir ve hedeflerine ulaşmak için kritik olan teknolojileri vurgulamaktadır: 1) enerji/yakıt tüketimini azaltmak için platform verimliliğini artırma ve 2) katlanabilir kanat uçları aracılığıyla kanat açılığını artırma. Bu özellikler kırmızı çizgi ile gösterilmiştir.

Son birkaç on yılda iklim değişikliği nedeniyle, özellikle taşıma uçakları olmak üzere uçaklar daha sık şiddetli turbüllansla karşılaşmaktadır. Bu olaylar, önemli hasarlara ve yolcu yaralanmalarına neden olarak havacılık endüstrisini büyük ölçüde etkilemektedir. Son zamanlardaki dikkate değer raporlar şunlardır: Singapore Airlines Flight 321 (21 Mayıs 2024): Bir Boeing 777-312ER, Myanmar hava sahasında şiddetli turbüllansla karşılaştı ve bir ölü dahil olmak üzere birçok yaralanmaya neden oldu. British Airways Flight 12 (15 Haziran 2023): Bir Boeing 777-336ER, Bengal Körfezi üzerinde şiddetli turbüllansla karşılaştı, beş kabin ekibi üyesinin yaralanmasına, birinin alt bacağında kırık oluşmasına neden oldu. Uçak tıbbi yardım için Singapur'a geri döndü. British Airways Flight 89 (28 Haziran 2023): Bir Boeing 777-236, Beijing Daxing Havalimanı'na yaklaşırken turbüllans yaşadı ve bir mürettebat üyesinin ayak bileği ameliyatı gerektirmesine neden oldu. Qatar Airways Flight 17 (26 Mayıs 2024): Bir Boeing 787-9, Türk hava sahasında şiddetli turbüllansla karşılaştı, altı yolcu ve altı mürettebat üyesi yaralandı, bunlardan sekizi Dublin'e varışta hastaneye kaldırıldı.



Şekil 4. Taşıma uçaklarında turbüllans etkileri

1.1.1.Yenilik ve Yeni Ufuklar: Yüksek en-boy oranına sahip kanatlar (High Aspect Ratio Wings, HARW) özellikle yeni nesil uzun menzilli uçaklar, insansız hava araçları (İHA'lar) ve enerji tasarrufu sağlayan tasarımlar için giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu tür kanatlar aerodinamik verimlilik açısından büyük avantajlar sağlaza da, yapısal esneklikleri ve rüzgar darbelerine duyarlılıklarını sebebiyle ciddi mühendislik zorlukları içermektedir. Literatürde, bu tip kanatların rüzgar yükü azaltma (Gust Load Alleviation, GLA) stratejileri ile optimize edilmesine yönelik çeşitli çalışmalar mevcuttur. Ancak, çoğu kanat ucu katlanabilir çalışması pasif yapısal çözümler veya sabit katlanabilir kanat uçları üzerine yoğunlaşmıştır. Bu proje ise, aktif akıllı kontrollü katlanabilir kanat uçları (Active Smart Controlled Folding Wingtip, ACFWT) konseptini kullanarak, mevcut literatürde eksik olan dinamik aero-servo-elastik etkileşimleri detaylı bir şekilde ele almaktadır. Literatürde Boeing 777X gibi ticari uçaklarda sabit katlanabilir kanatlarının kullanıldığı bilinmektedir. Ancak bu sistemlerin ana amacı yer operasyonlarını kolaylaştırmak ve uçuş sırasında kanat açılığını artırarak yakıt tasarrufu sağlamaktır. Bu tür pasif sistemler uçuş sırasında aktif olarak çalışmıyor için, ani rüzgar darbelerinin etkilerini doğrudan azaltma yeteneğine sahip değildir. Airbus'in AlbatrossONE projesi, biyo-esinlenmiş serbest dönen kanat uçları konsepti üzerinde çalışmış ancak yüksek performanslı aktif kontrol şeklinde değiştirilebilir sistemlerine odaklanmamıştır. Literatürde bu projeye benzer bazı araştırmalar olsa da [20], büyük ölçekli havacılık sistemlerinde gerçek zamanlı geri besleme kontrolüne sahip aktif katlanabilir kanat uçlarının rüzgar yükü azaltma üzerindeki etkisini değerlendiren deneyel ve sayısal çalışmalar henüz yapılmamıştır. Bu durum, mevcut literatürde büyük bir boşluk oluşturmaktadır ve proje bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Bu proje, literatürdeki mevcut çalışmaların farklı olarak tamamen aktif bir kontrol mekanizmasını kullanmayı hedeflemektedir. Yani kanat uçları sadece mekanik olarak katlanabilir değil, aynı zamanda hava akışına ve dış kuvvetlere bağlı olarak gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilir bir sisteme sahip olacaktır. Projede, servo motorlar ile dinamik ayarlamalar yapılabilen bir kanat ucu tasarlanmakta ve bu sistem, MPC (Model Predictive Control) gibi kontrol algoritmaları ile çalıştırılmaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca rüzgar yüklerini azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda uçağın aerodinamik performansını iyileştirmeyi ve yapısal yükleri azaltarak uzun vadeli dayanıklılığı artırmayı hedeflemektedir. Mevcut literatürdeki benzer çalışmaların varlığı, projenin özgünlüğünü olumsuz etkilemem yerine daha fazla önem kazandırmaktadır. Çünkü bu proje, var olan pasif çözümlerin yeterli olmadığı bir mühendislik problemine çözüm üretmekte ve mevcut teknolojileri ileriye taşıyan yeni bir kontrol yaklaşımı

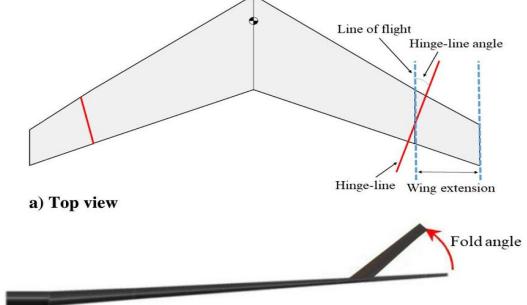
önermektedir. Ayrıca, proje kapsamında yalnızca sayısal simülasyonlar değil, aynı zamanda gerçek deneysel rüzgar tüneli testleri gerçekleştirilecek olup, bu da literatürdeki mevcut teorik çalışmaların ötesine geçerek uygulanabilir bir teknoloji sunulmasını sağlayacaktır. Bu nedenle proje, akıllı aktif kontrol teknolojileri ile kanat ucu optimizasyonunu birleştirerek havacılık alanında çığır açabilecek bir yaklaşım sahiptir.

1.2. Araştırma Sorusu veya Hipotezi

Kanat Ucu Katlanan Flareli (FFWT), literatürde geniş ölçüde referans verilen ([3], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]) önemli bir aerodinamik yenilik olarak öne çıkmaktadır (bkz. Şekil 5). Bu cihaz, menteşe hattı gelen hava akımı ile hızdan kasıtlı olarak açılı olan, flare açısı ile ölçülen bir sapma içeren bir Katlanabilir Kanat Ucunu (FWT) içermekte ve yerel Hüküm Açısını (AoA) ayarlamak için yenilikçi bir mekanizma sunmaktadır. Özellikle, katlama açısındaki bir artış AoA'nın azalmasına ve tam tersi durumda artmasına neden olarak, FFWT'nin aerodinamik ve yerçekimi kuvvetlerinin dengede olduğu bir denge katlama açısı aramasını sağlamaktır ve böylece sistemin statik kararlılığını garanti etmektedir. FFWT'nin, özellikle yük hafifletme bağlamındaki yeteneklerinin keşfi, ilgi alanında bir artışa sahne olmuştur. Özellikle, Castrichini ve arkadaşları [13], FFWT'nin yük hafifletme mekanizması olarak etkisini değerlendirmek için bir çalışma yaparak, tasarımının kanat kökü bükülmeye momentlerini, %25 daha kısa açılıklı bir temel modelle karşılaştırıldığında önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuştur. Bu bulgu, FFWT tasarımının, iç yüklerde yalnızca minimal artışlarla kanat Açıklık Oranlarının (AR) artırılmasını kolaylaştırmayı potansiyelini, dolayısıyla mevcut uçak konfigürasyonlarında ya aerodinamik verimliliğin iyileştirilmesini ya da yapısal ağırlığın azaltılmasını önermektedir.

Son araştırmalar, FFWT'nin uçuş dinamiği ve kararlılığı üzerinde önemli bir rol oynadığını vurgulayarak, çağdaş aerodinamik araştırmaların odak noktası olarak önemini pekiştirmektedir. Ajaj [3], FFWT'nin dar gövdeli bir taşıma uçağının uçuş mekaniği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamış, özellikle kanat yüklemesi ve ruloya tepkiyi etkileyerek uçuş dinamikini ve kakarlığını değiştirdiğini bulmuştur. Roma Üniversitesi ve Airbus tarafından yürütülen FFWT'nin yarı-durağan aeroelastik davranışının üzerindeki geometrik doğrusal olmayan etkilerin incelenmesi [5], bu tür doğrusal olmayan etkilerin kanat ucunun tepkisinde önemli değişikliklere neden olduğunu göstermiştir. Ancak, bu etkilerin ana gövde üzerindeki etkisi minimal kalmakta olup, bu doğrusal olmayan etkilerin büyük ölçüde kanat ucu tasarımını ile sınırlı olduğunu göstermektedir. Sıfır derece katlanma açısından ayarlanmış bir Flareli Katlanabilir Kanat Ucu (FFWT) ile seyir koşullarında, genellikle ağırlığından daha fazla kaldırma kuvveti ürettiği gözlemlenmektedir. Bu tür durumlarda, kanat uçları kılıdı açılıp serbestçe dönmelerine izin verilirse, yukarı doğru dönerler, kanat ucunda üretilen kaldırma kuvvetini azaltır ve menteşe etrafındaki momentleri dengeleyerek aerodinamik dengeyi yeniden sağlanabilir.

Kanat ucundaki bu kaldırma kuvveti azalması, basınç merkezini merkeze yaklaşımakta, yük hafifletmeyi kolaylaştırmakta ancak bu durum aynı zamanda uçağın genel aerodinamik verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu dengeyi sağlamak için, bu mekanizmayı kullanan tasarımlar genellikle Yarı-Aeroelastik Menteşe (SAH) içerirler [14, 5, 15, 16]. Ancak, bir SAH'nın türbüfansız olayları sırasında devreye girme zamanlaması çok önemlidir; geç aktivasyon yükleri hafifletmeyi başaramazken, SAH'nın mümkün olan en erken zamanda devreye girmesi gerekmektedir.



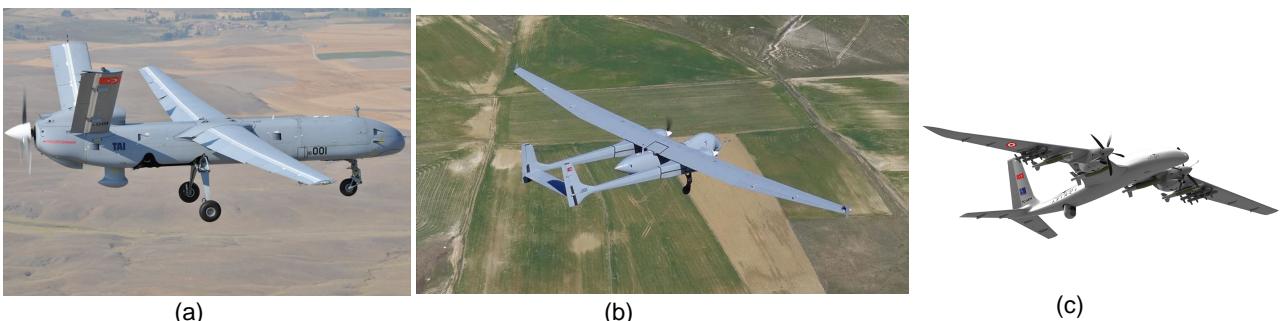
Şekil 5. Katlanabilir kanat ucunun şematik açıklaması [12]

Dengeye ulaşmadan önce, mümkün olan en erken zamanda devreye giren bir Yarı-Aeroelastik Menteşe (SAH), serbest bir kanat ucunun sağladığı faydalara benzer avantajlar sağlayabilir [17]. Ayrıca, bu zamanlama, potansiyel aşırı yüklerle birlikte kanat kökü bükülmeye momentini de etkileyebilir. Pratikte, bir A320 benzeri uçağın burnuna monte edilen bir Hüküm Açısı (AoA) sensörü, uçak seyir halindeyken kanadın türbüfansızlaşmasından yaklaşık 0,1 saniye önce türbüfansız algılayabilir. Bu nedenle, SAH, sistem gecikmeleri ve kanat ucunun geçici tepkisi dikkate alınarak hızlı yanıt verecek şekilde tasarlanmalıdır. Taşıma uçakları için katlanabilir kanat uçlarını geliştirmek, birçok teknik engelin aşılması gereken karmaşık bir zorluk teşkil etmektedir. Bu zorluklar arasında, uçuş sırasında karşılaşılan önemli yük ve gerilimlere dayanabilecek kadar sağlam mekanik eklemeler ve aktüatörlerin tasarımını ve uygulanmasını yer almaktır, arıza veya hasar durumunda herhangi bir felaketin önlemek için güvenli olması gerekmektedir [15]. Ayrıca, katlanabilir kanat uçlarının entegrasyonu, kanat yapısına ek karmaşıklık ve ağırlık getirerek uçağın genel performansını ve yakıt verimliliğini potansiyel olarak etkileyebilir [18, 19]. Budurum, değişen uçuş koşullarında kanat ucunun konumunu hassas bir şekilde yönetmek için ileri kontrol sistemlerinin ve sensörlerin dahil edilmesini gerektirmektedir. Araştırmalar, katlanabilir kanat ucu teknolojisinin uçak tasarımını devrim niteliğinde değiştirme potansiyeline sahip olduğunu ve bu faydalalarını alımlımadık kanat konfigürasyonlarına ve yeni malzeme kullanımlarına kadar genişletebileceğiğini göstermektedir. Bu teknoloji, sadece uçak performansını ve operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırma potansiyeli sunmakla kalmaz, aynı zamanda kanat yapısal ağırlığını %25'e kadar azaltma ve belirli yükleme senaryolarında kanat kökü bükülmeye momentlerini %10'a kadar azaltma yeteneğine de sahiptir. Ayrıca, katlanabilir kanat uçlarının, kanat açılıklık oranlarını 22°'nin üzerine çıkararak aerodinamik verimliliği artırma ve uçak menzilini %5'ten fazla iyileştirme kapasitesi, modern havacılıkta katlanabilir kanat ucu teknolojisinin dönüştürücü etkisini vurgulamaktadır. Mevcut literatürdeki zenginliğe rağmen, HARW'lar (Yüksek Açıklık Kanatlar) ve FWT (Katlanabilir Kanat Ucu) tasarımlarının karmaşık aerodinamik ve aeroelastik davranışları hakkında önemli bir bilgi eksikliği bulunmaktadır. Proje de, ana kanat ve önemli döner açılarına sahip FWT'deki geometrik doğrusal olmayanlık nedeniyle büyük deformasyonları dikkate alan aero-servo-elastik analizler yapmayı önerilmektedir.

Servomotor kullanan aktif kontrol sistemleri, rüzgar yükü hafifletme ve aeroelastik kararlılık için pasif yay menteşeli cihazlara göre potansiyel göstermiştir. Ancak, bu sistemlerin verimli kontrolü ve kanat ucu cihazlarının aeroelastik kararsızlık üzerindeki faydalarnı maksimize etme konusu, bu karmaşık doğrusal olmayan fenomenlerin daha derinlemesine incelenmesini

gerekiren keşfedilmemiş bir alan olarak kalmaktadır.

1.2.1. Projenin Türkiye Üzerindeki Etkisi: Bu proje, esnek ve yüksek açılıklı kanat (HARW) yapılarının hem insanlı hem de insansız hava araçları (UAV'lar) için geliştirilmesine odaklanarak Türkiye'nin havacılık sektöründe önemli bir ilerlemeyi işaret etmektedir. Özellikle HALE (yüksek irtifa uzun süre dayanıklı) İHA'lar dahil olmak üzere, bu girişim, Türkiye'nin sivil ve askeri havacılıkta küresel rekabet gücünü artırmayı hedefleyen stratejiye uyum sağlamaktadır. Yüksek kaldırma-sürükleme oranına sahip ince HARW'ların kullanımını, performansı optimize etmek ve ağırlığı azaltmak için derinlemesine dinamik ve aeroelastik çalışmaları gerektirmekte ve bu durum, Türkiye'nin kendi kendine yeterli havacılık teknolojisi geliştirmeye konusundaki kararlılığını yansıtmaktadır. Bu yerli teknolojiye geçiş, sadece ulusal güvenliği ve ekonomik bağımsızlığı güçlendirmekle kalmaz, aynı zamanda Türkiye'yi iklim değişikliğiyle mücadele eden uluslararası sürdürilebilir havacılık çabaları, örneğin Avrupa'nın Temiz Havacılık 2050 programı ile uyumlu hale getirecektir. Dolayısıyla bu proje, Türkiye'nin havacılık sanayisinin rekabet gücünü artırmayı, ekonomik büyümeyi teşvik etmeyi ve dünya çapındaki sürdürülebilirlik çabalarına katkıda bulunmayı amaçlayan stratejik bir projedir. Projenin doğrudan bir sonucu olarak bilgiye dayalı bir startup araştırma merkezi kurulması, Türkiye'nin havacılık teknolojisinde lider bir bilimsel ve endüstriyel güç olma yolunu önemli ölçüde hızlandırabilir. Böyle bir merkez, hafif, yüksek performanslı uçak kanatlarında yeniliği teşvik etmekle kalmayacak, aynı zamanda Türkiye'nin küresel havacılık endüstrisine anlamlı katkılar yapmasının yolunu açacaktır. Ayrıca, gözetim amaçları için dayanıklılığı artırılmış verimli İHA kanatlarının geliştirilmesine yapılan vurgu, Türkiye'nin stratejik askeri yeteneklerini güçlendirerek, onu bölgesel ve küresel arenalarda güçlü bir kuvvet haline getirebilir. TAI Anka, TAI Aksungur ve Baykar Akinci gibi kompozit malzemeler ve geniş açılıklı kanatlarla (HARW) donatılmış yerli İHA'ların başarısı, Türkiye'nin yeni nesil İHA'ların tasarım ve üretiminde liderlik potansiyelini göstermektedir (bkz. Şekil 6).



Şekil 6. Türk yüksek açılıklı İHA'ları (a) TAI Anka (b) TAI Aksungur (c) Baykar Akinci

1.3. Amaç ve Hedefler

Turbulans ve darbeli rüzgar yüküne maruz kalan uçaklarda, uçağın yapısına etki eden aerodinamik kuvvetlerde ve momentlerde değişiklikler meydana gelmekte ve yolcu konforunu bozarak ve uçak yapısında dinamik gerilmenin oluşturmasına neden olmaktadır. Bu durum rüzgar yüklerini azaltma önlemlerini zorunlu kılmaktadır. Rüzgar Yükü Azaltma (GLA) sistemlerinin uygulanmasıyla elde edilebilecek temel bir hedef, dinamik yapısal iç yüklerin azaltılmasıdır, bu da daha hafif uçak yapılarının tasarımını kolaylaştırmaktadır. Yüksek Açılıklı Kanatlarda (HARW) katlanabilir kanat uçları, Airbus ve Boeing gibi önde gelen üreticiler tarafından incelenen gelecekteki uçak konfigürasyonlarının ön saflarında yer almaktır, esas olarak indüklenen sürüklemeyi azaltma ve yakıt tüketimini düşürme konusundaki etkinlikleri nedeniyle tercih edilmektedir. HARW'lar önemli aerodinamik verimlilik sunmakta, ancak aynı zamanda doğası gereği bu tür uçaklar daha esnek oldukları için turbulanslı ve darbeli rüzgarlı koşulları altında kararsızlığa daha yatkındırlar. Bu bağlamda, özellikle katlanabilir olan kanat ucu cihazları, rüzgar yükü hafifletme için kritik yenilikler olarak öne çıkararak, zorlu çevresel koşullarda hem aeroelastik performansı hem de operasyonel güvenliği artırmaktadır.

FAA Uçuşa Elverişlilik Standartları ve EASA Sertifikasyon Spesifikasiyonu Part 25'e uygun olarak, uçak yapısal dayanım gereksinimleri, operasyon sırasında karşılaşılmazı beklenen maksimum yükleri temsil eden limit yükler ve limit yüklerin belirlenen güvenlik faktörleriyle çarpılmasıyla elde edilen nihai yükler açısından belirlenir. Yapının, özellikle Yüksek Açılıklı Kanatlar (HARW) için, bu tepe yükleri kalıcı hasar olmadan dayanabilmesi son derece önemlidir. Bu bağlamda, rüzgar darbesi kaynaklı yükler önemli bir rol oynar, çünkü bu yükler uçağın yapısına etki eden aerodinamik kuvvetleri ve momentleri module eder. GLA (Rüzgar Yükü Azaltma) sistemlerinin uygulanmasıyla, dinamik yapısal yükler azaltılabilir ve böylece daha hafif uçak yapılarının oluşturulması mümkün hale gelebilir. Bu araştırmada, kanat rüzgar yüklerini azaltmak için iki yaklaşım önerilmektedir.(1) Pasif bir çözüm olarak kompozit malzeme katmanlarının kullanılması (2) Aktif bir müdahale olarak şekil değiştirebilen katlanabilir kanat ucu cihazlarının kullanılması. Her iki tekniğin de verimli sonuçlar elde etmesi için Çok Amaçlı Çok Disiplinli Tasarım Optimizasyonu (MMDO) gereklidir.

GLA (Rüzgar Yükü Azaltma) tekniklerinin analizi genellikle, zaman alanında birbirine bağlı CFD (Hesaplama Akışkanlar Dinamigi) ve CSD (Hesaplama Yapısal Dinamikler) kodlarını birleştiren çok disiplinli bir yaklaşım gerektirmektedir.. Havacılık endüstrisinde, aerodinamik yüklerin simülasyonu için yaygın uygulama, düşük doğruluklu potansiyel akış teorisini kodlarını kullanarak aerodinamik hesaplamalar yapmak için yazılım kullanmaktadır. Bunun için panel kodları veya DLM (Doublet Lattice Method) kodları kullanılmaktave gelişmiş CFD kodlarına göre hesaplama maliyeti nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak, bu yaklaşım özellikle katlanabilir kanatları içeren konfigürasyonlarda genellikle yanlış sonuçlar vermektedir. Orta doğruluklu aerodinamik modellerin (DLM ve VLM gibi) CFD yerine kullanılmasıyla ilgili başlıca kısıtlamalar şunlardır: a) Orta doğruluklu aerodinamik modellerin, özellikle DLM (Doublet Lattice Method) ve VLM (Vortex Lattice Method) gibi, GLA sistemlerinde kullanılması, katlanabilir kanat uçlarıyla donatılmış kanat modellerinin rüzgar yükü karşısındaki tepkisinde yanlışlıklara yol açabilir. Bu fark, problemin hem yapısal hem de aerodinamik olarak

doğrusal olmayan doğasından kaynaklanmaktadır, özellikle artan katlanma açısı nedeniyle doğrusal olmayan aerodinamik etkiler artmaktadır. b) Katlanabilir kanatlarla birlikte rüzgar yükü azaltma sistemlerinin incelenmesinde sıkılıkla göz arı edilen bir diğer kritik unsur da viskozitedir. Potansiyel akış kodlarının, yolcu uçaklarının seyir uçuş koşulları sırasında transonik ve viskoz aerodinamik etkileri yakalayamadığı iyi bilinmektedir. Ayrıca, bu kodlar durağan olmayan etkileri de gereği gibi dikkate almaz. Reimer ve arkadaşlarının [21] araştırması, CFD ile yapılan rüzgar yükü tahminlerinin, klasik DLM tabanlı yöntemlerle elde edilenlerden hem transonik hem de subsonik akış rejimlerinde önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermektedir.

Havacılık teknolojisinin evrimi, yalnızca mevcut yetenekleri geliştirmekle kalmayıp, mümkün olanın sınırlarını yeniden tanımlamaya çalışarak sürekli olarak yeniliğin ön saflarında yer almaktadır. Bu sürekli ilerleme arzusu, uçak tasarımını ve operasyonel verimlilikte yeni bir çağın habercisi olan şekil değiştiren kanatların keşfine neden olmuştur. Doğal dünyyanın yaratıcılığından ve ileri mühendisliğin cesaretinden ilham alan şekil değiştirme teknolojileri, aerodinamik koşullara dinamik olarak uyum sağlayan kanatlar geliştirmek için benzersiz yollar sunmaktadır. Şekil değiştirebilen kanat uçlarının entegrasyonunun inceliklerine inen bu öneri, zorlukları ele almakta ve akıllı kontrol sistemleri aracılığıyla aeroelastik performansı ve verimliliği devrim niteliğinde artırmayı amaçlayan hedefler ortaya koymaktadır.

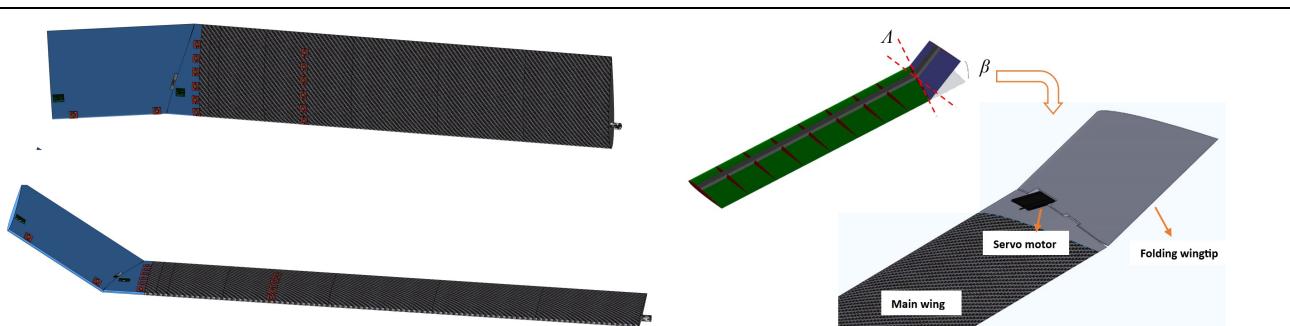
Bu proje de sensör füzyonu ve Model Öngörü Kontrolü (MPC) kullanarak, aerodinamik koşullardaki değişiklikleri ustalıkla tahmin eden ve karşılayan, şekil değiştiren kanat uçlarını gerçek zamanlı olarak optimize performans için uyarlayan bir kontrol mantığı oluşturmayı amaçlıyoruz. Bu yöntem, sadece uçakların aeroelastik verimliliğini ve güvenliğini artırmayı hedeflemekle kalmayacak, aynı zamanda havacılık tasarımda akıllı teknolojilerin entegrasyonu için yeni bir standart oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu strateji, olağanüstü performans için şekil değiştiren kanat uçlarına vurgu yaparak, uçak kanat tasarımasına yönelik dönüşümsel bir yaklaşımı kapsamaktadır. Kapsamlı bir sensör ağıının entegrasyonu, MPC sisteme hayatı veriler besler ve bu sistem, kanat ucunun konfigürasyonunu gerçek zamanlı koşullara dayanarak sürükleme azaltma, rüzgar yükü hafifletme veya performans artırma amacıyla ince ayar yapmaktadır. Bu yaklaşım, aero-servo-elastik simülasyonlar ve ardından rüzgar tüneli testleri ile doğrulanmaya hazır olup, sürekli geri bildirimle beslenen iteratif bir geliştirme süreci ile karakterize edilmekte ve maksimum güvenilirlik ve etkinlik için kontrol mantığını rafine etmeyi amaçlamaktadır. Aerodinamik ve kontrol mühendisliği disiplinlerini birleştiren bu disiplinlerarası araştırma, havacılık teknolojisinin sınırlarını genişletmek için gereken yenilikçi ruhu bünyesinde barındırmakta ve uçak performansı ve verimliliği için yeni olanaklar sunmaktadır.

1.3.1. Disiplinlerarası Araştırma Zorlukları ve Hedefleri: Bu öneri, GLA (Rüzgar Yükü Azaltma) sistemlerinin performansını artırmaya yönelik çeşitli disiplinlerarası zorlukları ele alarak, zaman alanında CFD (Hesaplama Akışkanlar Dinamigi) ile CSD (Hesaplama Yapısal Dinamikler) kombinasyonunu ve MPC (Model Öngörü Kontrolü) ile sensör füzyonunu birleştiren akıllı bir kontrol sistemiyle desteklenen entegre bir yaklaşımı hedeflemektedir. Temel zorluklar ve hedefler şunlardır: a) *Entegre CFD-CSD Çerçevesi Geliştirmek*: Endüstrinin şu anda düşük doğruluklu aerodinamik hesaplamalara dayanması, özellikle katlanabilir kanat konfigürasyonları için yetersiz kalmaktadır. Buradaki amaç, katlanabilir kanat uçlarına sahip kanatların darbeli rüzgar koşullarındaki aerodinamik ve yapısal tepkilerini doğru bir şekilde tahmin edebilen, artan katlanma açılarının getirdiği doğrusal olmayan dinamikleri ele alan kapsamlı bir CFD-CSD modeli oluşturmaktır. b) *Gelişmiş Akıllı Kontrol Sistemi Tasarımı*: Kanat ucu konfigürasyonlarını hassas bir şekilde module eden kontrol sistemlerine duyulan ihtiyaç, gelişmiş ve gerçek zamanlı uyarlanabilir kontrol algoritmalarının geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu sistemler, sadece anında darbeli rüzgarlara tepki vermekle kalmamalı, aynı zamanda mevcut şekil değiştirme kontrol çözümlerinin yeteneklerini aşarak minimum enerji kullanımı ve azaltılmış karmaşıklik ile çalışmalıdır. c) *Orta Doğruluklu Aerodinamik Modellerin Doğrulanması*: Optimizasyon sürecinde verimliliği sağlamak için proje, DLM (Doublet Lattice Method) ve VLM (Vortex Lattice Method) gibi orta doğruluklu modelleri de kullanacaktır. Bu modeller, hesaplama hızı ve doğruluk arasında bir denge sunmakta ancak yüksek doğruluklu CFD simülasyonlarına karşı kapsamlı bir doğrulama gerektirmektedir. Katlanabilir kanat uçlarının darbeli rüzgar yükleri altındaki aerodinamik davranışlarını simüle ederken doğruluğu doğrulamak ve farklılıkların belirlenmek önemlidir. d) *Aktif Kanat Ucu Cihazlarının Optimizasyonu*: Yük hafifletmede aktif kanat ucu cihazlarının avantajlarına rağmen, tasarım karmaşıklığı ve ağırlık sorunları öneleli zorluklar sunmaktadır. Proje, bu cihazların tasarımını rafine etmeyi, yenilikçi kontrol stratejileri ve yapısal tasarımlar geliştirmerek aerodinamik performans, yük azaltma ve uçak verimliliği arasındaki dengeyi optimize etmeyi amaçlamaktadır. Disiplinlerarası zorluklarla doğrudan yüzleşerek, önerilen araştırma, GLA teknolojisinin sınırlarını zorlamayı ve sadece daha güvenli ve verimli değil, aynı zamanda yarının gökyüzünün zorlu koşullarını karşılayacak şekilde donatılmış uçaklar için yol açmayı hedeflemektedir.

2. YÖNTEM

2.1. Problem Tanımı:

Darbeli rüzgar yükleri, uzun ve ince yapıları nedeniyle HARW'lar için önemli zorluklar teşkil etmektedir. Rüzgarlarla karşılaşıldığından, kanat üzerindeki aerodinamik yükler artar, bu da daha yüksek gerilimler ve potansiyel yapısal deformasyonlara yol açar. HARW'ların esnek doğası, rüzgar yükleri altında deformasyonlara neden olabilir ve bu durum hem aerodinamik performansı hem de yapısal bütünlüğü tehlikeye atar. Bu etkileri azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. FWT gibi uçak tasarım teknikleri, HARW'larda darbeli rüzgar yükü azaltma (GLA) üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Kanat ucu cihazları, kanadın kaldırma dağılımını ayarlayarak darbeli rüzgarlara karşı duyarlılığı azaltır ve kanat ucunda yoğun aerodinamik kuvvetlerin riskini azaltır. Aynı zamanda, hava akışındaki hızlı değişimlere duyarlılığı azaltarak sönmleme özelliklerini iyileştirebilirler. Dikkat çekici bir şekilde, aeroelastik eğim azalırken, aerodinamik eğim değişmeden kalır. Bu projenin birincil amacı, temel kanadın rüzgar tepkisini iyileştirmek ve kök bükümle momentini azaltmaktır. Bu, Akıllı Kontrol Sistemi ile donatılmış Aktif Katlanabilir Kanat Ucu (FWT) cihazının eklenmesiyle sağlanması amaçlanmıştır. Şematik bir tasviri görmek için, Akıllı Kontrol Sistemi ile donatılmış Aktif FWT cihazına sahip kanatların şematik açıklamasını gösteren Şekil 7a ve b'ye bakınız.



Şekil 7. Kompozit ana kanat ve servomotor ile donatılmış 3D baskılı kanat ucu ile ölçüklendirilmiş Katlanabilir kanat ucunun CAD modeli

FWT (Katlanabilir Kanat Ucu) konfigürasyonunda, katlanma açısından bir artış, yerel Hüküm Açısında (AoA) bir azalmaya, katlanma açısından bir azalma ise yerel AoA'da bir artışa neden olur. Sonuç olarak, katlanabilir bir kanat ucu dönenin şekilde serbest bırakıldığından, katlanma açısı doğal olarak denge açısı olarak bilinen bir denge konumuna doğru yönelir. Bu denge açısından, aerodinamik ve yerçekimsel momentler dengelenir ve sistemi statik olarak kararlı hale getirir. Bu doğuştan gelen kararlılık, FWT'nin sabit bir konumda kalmasını sağlar ve bu da genel aerodinamik performansı ve operasyonel güvenliği optimize eder. FWT'nin kullanımı, sabit bir kanat ucu konfigürasyonuna kıyasla, türbülans ve manevra kaynaklı yüklenmesi sırasında kanat kökü büüküme gerilmesinde önemli azalmalar sağlamıştır. Kanat ucu yükseltildiğinde, kanat ucunun gelen akışa göre yaptığı açıda, yani hücum açısından bir değişiklik olur ve bu Denklem 1'de gösterildiği gibidir [22].

$$\Delta\alpha = -\tan^{-1}(\tan \beta \sin \Lambda) \quad (1)$$

Denklem 1'de, β katlanma açısını, Λ ise "flare" açısını (Şekil 7'da gösterilmiştir) temsil eder.

2.2. Projenin Gelişimi ve Metodolojisi: Projenin gelişimi ve metodolojisi, kapsamlı bir araştırma, analiz ve geliştirme sürecini garanti etmek amacıyla dikkatlice planlanmış adımlar serisi ile yapılandırılmıştır. Bu adımlar aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Proje, belirli bir aerodinamik şeke sahip ve 15'in üzerinde bir Açıklik Oranı (AR) olan başlangıç bir kanat modelinin seçilmesiyle başlar. Yüksek açıklik oranının seçilmesi, geometrik olarak doğrusal olmayan etkilerin görülmemesini kolaylaştırır ve gelecekteki kanat konfigürasyonlarını benzeten bir kanat modelinin proje kapsamında çalışılmasını amaçlamaktadır. Kalıbin ve kompozit kanadın imalatını basitleştirmek için simetrik bir kanat profili seçilmiştir ve kanadın tek yönlü karbon fiber malzeme ile üretilmesine karar verilmiştir. Bu aşamada, uçuş hızı ve Hüküm Açısına bağlı aerodinamik yükler ile rüzgar hızı ve frekansı ile belirlenen darbeli rüzgar yüklerini içeren yük durumlarının belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

Adım 2: Dr. Farsadi'nin Adana ATÜ'deki İleri Simülasyon Laboratuvarında geliştirilen NAS² yazılımı, Akişkan-Yapı Etkileşimi (FSI) analizi yapmak için güncellenecektir. Bu çalışma yüksek doğruluklu doğrusal olmayan Hesaplama Akışkanları Dinamiği (CFD) tabanlı aerodinamik model ve kontrol algoritması modülünün entegrasyonunu içerecektir. Yazılım ayrıca, hareketli kanat ucu cihazları için çoklu cisim simülasyonunu destekleyecek şekilde geliştirilecek ve bu çalışma projenin ana çalışmalarından birisini oluşturacaktır.

Adım 3: Çok Amaçlı, Çok Disiplinli Tasarım Optimizasyonu (MDO) yaklaşımı, Parçacık Süre Optimizasyonu (PSO) kullanılarak uygulanacaktır. Bu çalışmadan amaç, yapısal ve aeroelastik kısıtlamalar göz önüne alınarak, birim büüküme faktörünü ve Ters Tersine Çevirme Faktörünü (IRF) maksimize ederken kanat ağırlığını minimize etmektir. Bu aşamada, geometrik olarak doğrusal olmayan yapı davranışını göz önüne alınacak ve yapısal model Durağan Olmayan Vorteks Izgarası Yöntemi'ne (UVLM) dayalı orta doğruluklu bir aerodinamik model ile birlikte kullanılacaktır. Bu yaklaşım ile optimizasyonun yüksek maliyetine ve zaman tüketimine rağmen, doğruluk ve maliyet verimliliği dengelenenecektir.; Nihai kanat konfigürasyonunun doğrulanması ve simülasyonda meydana gelebilecek aerodinamik ve aeroelastik fenomenlerin incelenmesi için ise yüksek doğruluklu CFD modellemesi planlanacaktır.

Adım 4: Temel kanat konfigürasyonu oluşturulduktan sonra, kanat ucu cihazı modelinin NAS² temel kanat modeline entegrasyonu yapılacaktır. Optimal sertlik ve hafiflik özellikleri için 3D baskı PLA malzemeden yapılan kanat ucu cihazı, menteşe bölümünde bir servomotor ile birlikte modelleneceler. Nihai amaç, kanat ucunun hareketinin giriş komutlarına dayalı olarak yeni bir akıllı kontrol algoritmasıyla kontrol edildiği bir aero-servo-elastik sistem tasarlamaktır. Bu, projenin yenilikçi yönlerinden birisidir.

Adım 5: Bu adımda CFD-CSD bağlantılı aeroelastik sistem kapsamında aero-servo-elastik simülasyonu gerçekleştirilecektir. Bu adımda, kontrol yaklaşımı tanımlanacak ve simülasyon sonuçları elde edilecektir. Daha spesifik olarak, akıllı aktif kontrol yöntemi kullanılarak şekil değiştirebilen katlanabilir kanat ucu-servomotor aktuatörü entegrasyonu yapılacaktır. Bu yöntem, rüzgar yükü azaltma performansını ve aeroelastik tepkileri iyileştirmek için kullanılacaktır. Model Öngörü Kontrolü (MPC) ve sensör füzyon metodolojileri kullanılarak, sistemin gelecek koşulları öngörmesi ve kanat ucunu optimal olarak yeniden konumlandırması sağlanacak, böylece performansın artırılması garanti edilecektir.

Adım 6: Kompozit kanat, optimizasyon sürecinden elde edilen tasarıma dayalı olarak, Adana ATU, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü kompozit laboratuvarında üretililecektir. Kanat üretimi tek yönlü karbon fiber kullanılarak, el yatırma ve vakum torbalama teknikleri kullanılarak ile yapılacaktır. Katlanabilir kanat uçlarının etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemek için farklı şekil ve konfigürasyonlarda çeşitli 3D baskı PLA kanat uçları üretilicektir. Temel kanat, bir

servomotor ve katlanabilir kanat ucu ile birleştirilerek, sayısal simülasyonlarla doğrulanması ve ilişkilendirilmesi amaçlanan deneysel testler için bir katlanabilir kanat ortaya çıkarılacaktır. Yapısal modelin doğruluğunu doğrulamak için Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) sistemi de kullanılarak Yer Titreşim Testleri (GVT) ve statik deformasyon testleri gerçekleştirilecektir.

Adım 7: Rüzgar tüneli rüzgar çalışmaları testleri, ODTÜ RÜZGEM'de büyük ölçekli rüzgar tünelinde gerçekleştirilecektir. Rüzgar tüneli düşük subsonik aerodinamik rejimde çalışmaktadır. Test odasının genişliği, yüksekliği ve uzunluğu sırasıyla 2.5m, 2.5m ve 10m'dır. Tünelin maksimum rüzgar hızı 100 m/s ve maksimum Mach sayısı yaklaşık 0.3'tür. Rüzgar tüneli, periyodik, 1-cosine veya rastgele darbeli rüzgarlar gibi çeşitli rüzgar türlerini üretebilen bir rüzgar jeneratörü ile donatılmıştır. Darbeli rüzgar, iki bağımsız servomotor tarafından hareket ettirilen çift kanatlı rüzgar bıçakları ile üretilicekş

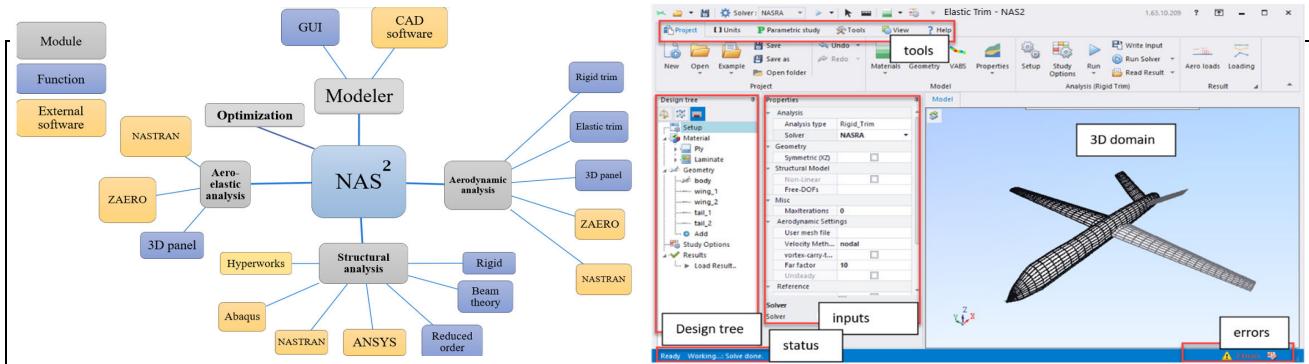
- Önerilen projede, NAS², geometrik ve aerodinamik doğrusal olmayan etkileri dikkate alan CFD-CSD etkileşimine dayalı aero-servo-elastik analiz için bir CFD çözümcsu ve akıllı kontrol sistemi ile birleştirilecektir.

2.3. Metodoloji:

2.3.1. Sayısal Simülasyon İçin Aeroelastik Araç:

Sayısal simülasyonu kolaylaştırmak ve otomatikleştirmek amacıyla, Dr. Farsadi'nin Adana Alparslan Türkş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'ndeki İleri Simülasyon Laboratuvarı tarafından geliştirilen ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK, Proje No: 220N396) tarafından finanse edilen ilgili projede kullanılan Yerel Doğrusal Olmayan Aeroelastik Simülasyon Yazılımı (NAS²) [23,24,25] kullanılacaktır. Kompozit uçak yapılarının aeroelastik ve yapısal analizi için özel olarak tasarlanmış olan NAS², hesaplama kaynaklarını minimize ederken kesin sonuçlar sağlamaktadır. Yazılım altyapısı dayanım, Modal, Aeroelastik, Darbeli Rüzgar ve Kompozit analizleri gibi çeşitli analizleri, optimizasyon da dahil olmak üzere kapsamaktadır. NAS², yüksek doğruluklu sonlu elemanlar analizi kullanarak büyük ve karmaşık kompozit kanat yapılarının analizini yapabilmektedir. Güçlü modelleme araçlarıyla donatılmış olan yazılım, kullanıcıların ayrıntılı uçak yapı modelleri oluşturmasına olanak tanımaktadır. NAS²'nin doğruluğu hem sayısal hem de deneysel olarak doğrulanmış olup, sonuçlar saygın dergilerde yayımlanmıştır [23,24,25]. Özellikle uçak yapılarının aeroelastik ve yapısal analizi için tasarlanmış olan NAS², hesaplama süresini ve maliyetlerini azaltırken kesin ve tutarlı sonuçlar sunmayı amaçlamaktadır. NAS², statik analiz, serbest titreşim, aeroelastik ve rüzgar analizi, kompozit analiz ve optimizasyon gibi çeşitli analizleri kolaylaştırmaktadır. NAS², aşağıdaki farklı modüllerden oluşmaktadır: Model modülü (yerel Grafik Kullanıcı Arayüzü (GUI) ve CAD yazılımindan ithal edilen modelleri kapsar), Aerodinamik Analiz modülü, Yapısal ve Kompozit Analiz modülü, Azaltılmış Dereceli Aeroelastik Analiz modülü ve Optimizasyon modülü. NAS²'nin özellikleri aşağıda listelenmiştir:

- NAS², yerel olarak geliştirilen kodlar, açık kaynaklı araçlar ve ticari yazılımların hepsini bünyesinde entegre etmektedir. Proje çalışmalarında arzu edilen doğruluğa erişebilmek için NAS² altyapısındaki çözümcülerden birisi kullanıcı tarafından seçilebilir. Arayüz C# (C-Sharp) kullanılarak tasarlanmış olup, çekirdek kod C++ ve FORTRAN ile oluşturulmuştur.
- NAS² içindeki yapısal model, açık kaynaklı ve ticari yazılımlardan sorunsuz bir şekilde aktarılabilen hem doğrusal hem de doğrusal olmayan yapısal kırış ve kabuk modellerini kapsamaktadır. Ayrıca, Geometrik Olarak Kesin Kiriş Teorisi (GEBT), doğrusal olmayan kabuk modeli ve geometrik olarak doğrusal olmayan İnce Duvar Kiriş (TWB) modeli gibi özel yerel modelleri içermektedir. Kanat gibi yüksek açıklık oranına sahip yapıların kesit özelliklerini, doğrusal olmayan ve bağlantı rıhtılı terimlerini dikkate alarak, VABS (Varyasyonel Aсимptotik Kiriş Kesit Analizi) ve Librescu ince duvar kiriş teorisine dayanan yerel yazılım kullanılarak hesaplanmaktadır. Teoride hem birincil hem de ikincil burulma modelleri dikkate alınmaktadır. Yapısal çözümcsu olarak Sonlu Elemanlar (FE) yöntemi kullanılmaktadır.
- ANSYS ACP'nin NAS² ile entegrasyonu, özellikle kompozit malzeme hasar analizi alanında güçlü bir ittifak oluşturmaktadır. Kompozit malzemelerin analizinde çok başarılı olan ANSYS ACP, NAS²'nin hesaplama yeteneklerini tamamlamaktadır.
- Aerodinamik modelleme için NAS², Durağan Olmayan Vortex Izgarası Yöntemi, yerel 3D panel teorisi, şerit teorisi (sıkıştırılamaz ve sıkıştırılabilir aerodinamik) ve piston teorisini kullanmaktadır. Aerodinamik yükler, MSC NASTRAN ve ZONA ZAERO ticari yazılımlarından ithal edilebilir. Doğrusal olmayan aeroelastik problemlerin çözümünü hızlandırmak için, yerel olarak doğrusal olmayan bir Azaltılmış Dereceli Model (ROM) geliştirilmiştir.
- NAS², özellikle yüksek açıklıklı kanatlar için darbeli rüzgar yükü azaltma çalışmalarına odaklanmış uygulamalarda bir dizi ayrık rüzgar modelini desteklemektedir. Kanatlar, darbeli rüzgarlara maruz kaldıklarında kırılmaya karşı artan bir duyarlılık göstermektedir.
- NAS² içindeki birleştirme algoritması, bahsedilen tüm modüllerin sorunsuz etkileşimi düzenleyerek doğrusal olmayan simülasyonların gerçekleştirilemesini sağlamaktadır. Bu kapsamlı yaklaşım, NAS²'yi çeşitli mühendislik projelerini ele almak için donanımlı hale getirmekte ve özellikle yüksek açıklıklı kompozit kanatların aeroelastik optimizasyonu bağlamında yapısal ve aerodinamik analizler için gelişmiş ve entegre bir çözüm sunmaktadır.
- NAS² paketi, Çok Disiplinli Tasarım Optimizasyonu (MDO) prosedürüne sorunsuz bir şekilde gerçekleştirmek için Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) olmak üzere iki optimizasyon algoritmasını diğer modüllerle entegre etmektedir.
- NAS² yazılım ağaç diyagramı Şekil 8'da gösterilmiştir. NAS² arayüzü, yazılımin farklı modüllerinin görsel bir temsilini sunmakta, yüksek açıklıklı kanatların aktif kanat ucu tasarımlıyla aeroelastik ve yapısal analizi için gerekli çeşitli analizleri gerçekleştirmek üzere nasıl birbirileyle etkileşime girdiğini göstermektedir.



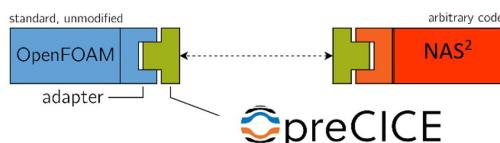
Şekil 8: Yerel NAS² paketi, modülleri ve kullanıcı dostu arayüzünü gösteren ağaç diyagramı [TÜBİTAK, Proje No. 220N396]

Proje kapsamında ilk tasarım aşamasında, NAS² paketi içinde Durağan Olmayan 3D panel metod veya Doublet Izgarası Yöntemi (DLM) ile Sonlu Elemanlar Yöntemi'nin (FEM) birleşimi kullanılarak orta doğrulukta bir aerodinamik model uygulanacaktır. Bu yaklaşım, geometrik doğrusal olmayan etkileri dikkate alarak katlanabilir kanat için aktif kontrol sisteminin tasarılanmasında kullanılacaktır. Bu aşama, kontrol sisteminin ön tasarımı ve ayarı için, parametrik çalışmalarının yürütülmesi için kritik öneme sahiptir ve orta doğrulukta bir aerodinamik modelin kullanılmasının sağladığı hızlı simülasyon yetenekleri sayesinde parametrik çalışmayı etkili bir şekilde gerçekleştirmek mümkündür. Bu sayede optimizasyon çalışması önemli maliyet ve zaman gerektirse de, bu yaklaşım sayesinde doğruluk ve maliyet etkinliği arasında bir denge sağlanmaktadır. Kanat konfigürasyonunun nihai doğrulanması ve simülasyonda potansiyel aerodinamik ve aeroelastik fenomenlerin detaylı bir şekilde incelenmesi için, yüksek doğrulukta CFD analizlerinin yapılması planlanmıştır.

2.3.2.CFD-CSD Sayısal Simülasyonu İçin Ağıskan-Yapı Etkileşimi (Yüksek Doğruluklu Aeroelastik Analiz): Katlanabilir kanat uçlarının aeroelastik analizi için kapsamlı bir ağıskan-yapı etkileşimi (FSI) simülasyon stratejisinin kullanılması esastır. Bu teknik, Katlanabilir kanat uçlarının sergilediği dinamik davranışlarının doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlamak amacıyla Hesaplama Ağıskanlar Dinamiği (CFD) ve Hesaplama Yapısal Dinamikler (CSD) kapsamlı bir şekilde birleştirilmektedir. Bu proje de Aerodinamik model simülasyonu için OpenFoam çözümünün kullanılması planlanmıştır, ancak daha üstün verimlilik sunan alternatifler de, örneğin SU² gibi, araştırılacaktır. Ayrıca, yapısal analiz için açık kaynaklı sonlu elemanlar kodlarını kullanmayı ve bunları NAS² ile entegre ederek ANSYS ve NASTRAN gibi ticari yazılımlara alternatif olarak kullanmayı hedefliyoruz. Mevcut literatürde bulunan hazır adaptörler tarafından desteklenen Calculix ve Fenics gibi açık kodlarla, yeni adaptör kodu geliştirilmesine gerek duyulmamaktadır. Eğer adaptör kodlarını yerinde geliştirmeyi tercih edersek, prosedürün her aşamada doğruluğu ve verimliliği sağlamak amacıyla çeşitli aşamaları kapsaması gerekecektir (bkz. Şekil 9).

a) **Metodoloji ve Yazılım Entegrasyonu:** Simülasyon, aerodinamik ve yapısal davranış arasındaki karmaşık etkileşimi kolaylaştırın açık kaynaklı bir bağlama kütüphanesi olan PreCICE ile OpenFOAM ve NAS²'yi kullanacaktır. Bu yapı, katlanabilir kanat uçlarıyla ilgili aeroelastik fenomenlerin hassas simülasyonunu mümkün kılacaktır.

b) **Hazırlık Aşaması:** İlk adımlar, PreCICE bağlama kütüphanesi, OpenFOAM ve NAS² gibi gerekli yazılım bileşenlerinin kurulumunu ve test edilmesini içerecek; bunlarla birlikte ilgili adaptörlerin de kurulması da gerekecektir. Bu aşama, tüm araçların sorunsuz bir şekilde birlikte çalışmasını sağlayacak ve olası sorunları önceden giderecektir.



Şekil 9. Project PreCICE Bağlama

c) **Hesaplama Süreci:** Bu süreç, model geliştirme için açık kaynaklı araçlar kullanılarak ön işleme ve son işleme aşamalarına ayrılmaktadır. OpenFOAM'da ağ üretimi için GMSH kullanılacak ve aerodinamik model simülasyona hazırlanacaktır. Sürec, aerodinamik analiz için k-w SST türbülans modeli ile RANS denklemlerinin çözülmesini içerecek ve Katlanabilir kanat ucu cihazlarıyla donatılmış yüksek açıklıklı kanatların incelenmesi, uçak performansını artırmak ve hesaplama simülasyondaki zorlukları anlamak için önemli olan karmaşık bir aerodinamik fenomenler dizisini ortaya çıkaracaktır. Bu fenomenler arasında, katlanabilir kanat uçlarının değişen geometriyle sürekliçe azaltma ve kaldırma iyileştirmesini hesaplamak için kritik olan vorteks dökülmeye ve etkileşimi vardır. Dinamik stall, türbülanslı koşullarda veya manevralarda etkilerini dengelemek için kontrol stratejileri geliştirilecektir. Rüzgar yükü azaltma alt yapısı, ani aerodinamik yükleri azaltmadan kanatlanabilir mekanizmaların potansiyelini ortaya çıkaracak, bu da yolculuk kalitesini ve yapısal bütünlüğü artıracaktır. Ağıskan-Yapı Etkileşimi (FSI), kanat esnekliği ve hava akışı arasındaki etkileşimi incelemeye anahatdır ve daha verimli uçak tasarımlarına yol açmaktadır. Ayrıca, çırpmma ve sapma gibi aeroelastik fenomenler ile sınır tabakası kontrolü, kanat ucu dinamiklerinin kararlılığı sürdürmede ve aerodinamik verimliliği optimize etmedeki kritik rolünü ortaya çıkaracak, yenilikçi tasarım ve kontrol yaklaşımı zemin hazırlayacaktır.

d) **Bağlama Mekanığı:** PreCICE OpenFOAM adaptörü, aerodinamik ve yapısal alanlar arasındaki etkileşimi kolaylaştırıp ve kanat hareketi simülasyonu için OpenFOAM'in pointDisplacement fonksiyonunu kullanacaktır. Katlanabilir kanat dinamiklerinin kapsamlı bir şekilde simülasyonu edilmesini sağlamak için döner hareketleri yönetmek amacıyla foldForce sınıfı gibi ek işlevler tanıtılacaktır.

e) **Simülasyon Uygulaması:** Metodoloji, aerodinamik ve yapısal modeller için ayrı prosedürlerin titizlikle ayarlanması 2D ve 3D FSI simülasyonlarının yürütülmesine doğru ilerleyecektir, bu da kapsamlı bir analiz imkanı sağlayacaktır. NAS²

konfigürasyonunda simülasyon için kritik vakalar belirlenecektir.

f) **Veri Interpolasyonu ve Haritalama:** PreCICE, örtüşmeyen ağlar için En Yakın Komşu, En Yakın Projeksiyon ve Radial Basis Function interpolasyonu gibi çeşitli veri interpolasyon yöntemleri sunmaktadır. Daha ince aerodinamik çözüm ağı ve daha kaba yapısal ağı göz önüne alındığında, FSI nüanslarını ayrıntılı bir şekilde yakaladıktaki etkinliği nedeniyle Radial Basis Function interpolasyonu seçilmiştir.

g) **Amaç ve Doğrulama:** Proje kapsamında sadece modelleme yapmakla kalmayıp, katlanabilir kanat ucu aeroelastığının anlaşılması ve optimizasyonunu geliştirmek, bu simülasyonları daha geniş bir aeroelastik analiz ve çok disiplinli optimizasyon (MDO) çerçevesine entegre etmek hedeflenmektedir. Optimizasyon sonrası doğrulama ve nihai testlerde CFD kritik bir rol oynarken, entegre FSI simülasyon yöntemi, doğru ve verimli aero-servo-elastik analiz için esastır.

2.3.3. Güçlü İki Yönlü Bağlama Yöntemi ile Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI): "Güçlü iki yönlü bağlama" tipik olarak sıkı bir bağlamayı ifade etmektedir; burada akışkan ve yapısal çözücüler sıkı bir şekilde entegre edilmekte ve sürekli veya çok kısa aralıklarla bilgi alışverişi yapılmaktadır. Güçlü iki yönlü bağlamada, akışkan ve yapısal tepkiler birbirlerini önemli ölçüde etkilemektedir ve bir çözüme ulaşılana kadar iteratif olarak güncellenmektedir. Şekil 12'te sunulan akış diyagramı, Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI) analizi için güçlü iki yönlü bağlama olarak bilinen sofistik bir hesaplama yaklaşımını özetlemektedir. Bu yöntem, yüksek açıkkılık kanatların katlanabilir kanat ucu ile doğrusal olmayan aeroelastik yapısının detaylı incelenmesi için kritik olup, yapısal dinamik ve gelen akış aerodinamigi arasındaki etkileşim aero-yapının performansı için kritik öneme sahiptir. Burada tartışılan FSI analizi, geçici bir simülasyonun tek bir zaman adımı içinde iteratif adımları içermektedir ve bir sonraki zaman aşamasına geçmek için hem CFD hem de CSD alanlarında yakınsamayı gerektirmektedir. Her iterasyon içinde, akış alanı, OpenFOAM gibi CFD çözucusu kullanılarak bir yakınsama durumuna çözülür. Bu, kanat yapısına etki eden aerodinamik kuvvetlerin detaylı bir şekilde anlaşılması sağlar. Bu aerodinamik kuvvetler daha sonra yapısal çözücüye, yapısal ağı üzerine interpolasyon yapılarak aktarılır ve bu da yapısal çözücüün aerodinamik etkiyi doğru bir şekilde dikkate almasını mümkün kılar.

Aerodinamik kuvvetlere yanıt olarak, yapısal çözücü, katlanabilir kanat ucu ile birlikte kanadın deformasyonlarını hesaplayarak yapısal tepkiyi yansıtmaktadır. Yapısal deformasyonlar, akışkan ağı üzerine interpolasyon yapılarak CFD çözucusuna geri beslenmektedir ve bu işlem sonunda, deformasyonlu bir akışkan alanındaki edilmektedir. Bu veri alışverişi, akışkan ve yapı arasındaki karşılıklı etkileşimi yakalamak için kritiktir. Analiz, aerodinamik kuvvetler ve yapısal deformasyonların belirli bir eşik değerinin altına düşüğü bir durumu hedeflemektedir, bu da yakınsamanın sağlandığını göstermektedir. Bu durum, etkileşimlerin dengelendiğini ve simülasyonun bir sonraki zaman adımına gelebileceğini garanti etmektedir. Güçlü iki yönlü bağlama yöntemi, akışkan ve yapı arasındaki yakınsamanın bir zaman adımı içinde zorunlu olmadığı, bu nedenle simülasyonun doğruluğunu potansiyel olarak azaltan zayıf iki yönlü bağlama yöntemi ile tezat oluşturmaktadır.

Bu süreci CFD analizi için OpenFOAM yazılımını (SST k-w modeli kullanarak) uyarlamak, aerodinamik analizlerin kapsamını OpenFOAM'un gelişmiş simülasyon yetenekleriyle genişletir. OpenFOAM ile yapılan CFD simülasyonları, kanat çevresindeki akış alanını ayrıntılı ve hassas bir şekilde incelemeye olanak tanır, özellikle de kanat ucu cihazları üzerinde yoğunlaşacaktır. Bu simülasyonlar, geleneksel doğrusal ve düşük doğruluklu aerodinamik modellerin kısıtlamalarını aşarak türbüfans, ana kanadın büyük deformasyonları, yüksek kanat ucu dönüşleri, dinamik stall ve ana kanat ile kanat ucu arasındaki boşlukta oluşan vortekslerin detaylı analizlerini içerir. Bu yaklaşım, yapısal tepkinin akış alanını ve akışın da yapısal tepkiyi belirgin şekilde etkilediği doğrusal olmayan aeroelastik analizler için kritik bir önem taşır.

Veri transferi, yapısal ağı ile aerodinamik ağı arasında beş adımı içerecektir. Veri transferini kolaylaştırmak için, Şekil 10'te görüldüğü gibi, dört komşu düğüm arasında Lagrange polinomu interpolasyonu kullanılacaktır. Adımlar şu şekildedir:

Aerodinamik Kuvvetlerin Hesaplanması: Aerodinamik yükleri hesaplamak için aerodinamik analiz güncellenecektir.

Kuvvet Transferi: Aerodinamik kuvvetleri FEM yapısal çözucusuna aktarılacaktır.

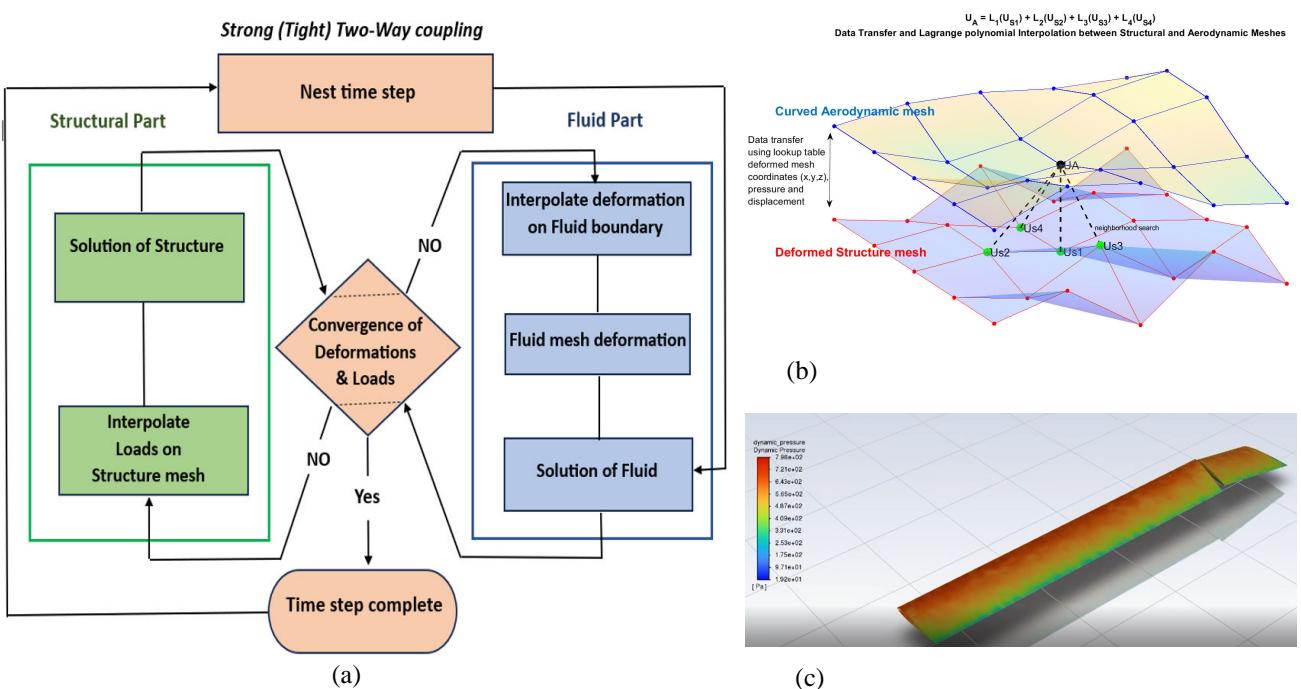
Yapısal Deformasyon Hesaplanması: Yeni deformasyonu hesaplamak için yapısal analiz gerçekleştirilecektir.

Yer Değiştirme Transferi: Güncellenen yapısal yer değiştirmeleri aerodinamik ağa geri aktarılacaktır.

Yakınsama Kontrolü: Yakınsama kontrol edilecektir. Kuvvetler ve yer değiştirmeler belirtilen tolerans dahilinde yakınsamamışsa, iteratif döngü tekrarlanacaktır.

2.3.4. farklı türbüfans modellerinin kullanımı: Hafif akış ayrımalarında k-w-SST veya Spalart-Allmaras gibi eddy viscosity bazlı modeller yeterli olmaktadır. Ancak stall gibi kuvvetli akış ayrımalarının meydana geldiği durumlarda Reynolds Stress Model (RSM) veya Delayed Detached Eddy Simulation (DDES) gibi türbüfans modellerinin kullanımı daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu durumlarda hesaplama süreleri %30 ila %60 civarında artabilmektedir. Projede geliştirilecek olan kodda elastik katı etkileşimi hesaplamaya dahil edilmeden önceki ön çalışmada bu türbüfans modeli seçimi ve doğrulaması yapılacaktır. Çözücünün geliştirilmesinde kullanılması planlanan OpenFOAM kodunda yukarıda bahsedilen türbüfans modelleri halihazırda mevcut olduğu için bu modellerin baştan kodlanmasına gerek olmayacağıdır. Aşırı akış ayrımalarında türbüfans modeli performansına yönelik kapsamlı bir inceleme yapmak için sekiz karşılaştırılmış hesaplamalı çalışma, bir DNS çalışması ve bir yüksek çözünürlüklü RANS simülasyonu olmak üzere 10 çalışma ele alınmıştır. Reynolds sayısının 1000 ile $1,6 \times 10^6$ arasında değiştiği çalışmalarla sınır tabaka akışları, serbest kayma akışları, hava kanatları ve rüzgar türbinleri gibi çeşitli akış konfigürasyonları incelenmiştir. Farklı türbüfans modelleri, çeşitli akış koşulları altında değişen performans sergilemektedir. Spalart-Allmaras modeli, iki boyutlu sınır tabaka akışları için iyi performans gösterirken, iki denkleme dayalı modellere kıyasla daha düşük hesaplama maliyetine sahiptir. Ancak, kararsız akışlarda recirculation bölgesinin uzunluğunu tutarlı bir şekilde yüksek tahmin etmektedir [26]. İki denkleme dayalı modeller, özellikle k-ε türevleri ve k-w SST modeli, yüksek rüzgar hızlarında iyi performans sergilemeye, ancak duvar yakını modellemesine kritik düzeyde bağımlılık göstermektedir [27]. Özellikle k-w SST

modeli, bazı çalışmalarda güçlü performans sergilerken, diğerlerinde doğruluk konusunda zorlanmış ve recirculation bölgesinin uzunluğunu yüksek tahmin etmektedir [28]. Reynolds Stres Modelleri (RSM), DNS verileriyle daha iyi uyum sağlamakta ve karmaşık üç boyutlu akışlarda anizotropik etkileri daha iyi yakalamaktadır. Ancak, genellikle daha kısa ayrılma bölgeleri tahmin etmekte ve önemli ölçüde daha yüksek hesaplama maliyetleri gerektirmektedir [29]. Baldwin-Lomax gibi basit cebirsel modeller en büyük hataları göstermekte; genellikle ayrılmayı çok erken tahmin ederek karmaşık akışlarda zayıf performans sergilemektedir [30]. Uygulamalarda kullanılan çözüm parametreleri, model performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle duvar yakınında ve yüksek gradyanlı bölgelerde ağı çözünürlüğü, doğru sonuçlar elde etmek için kritik öneme sahiptir [31]. Çalışmalar, özellikle kararsız karaktere sahip akışların durağan durum simülasyonlarında; duvar yakını modelleme, sınır koşullarının doğru tanımlanması ve uygun yakınsama kriterlerinin önemini vurgulamaktadır [32]. Tübünlans modellerinin güvenilirliği akış koşullarına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Çoğu model, bağlı akışlarda makul bir doğruluk sergilerken; ayrılmış akışlar, özellikle büyük ölçekli ayrılmalar söz konusu olduğunda güvenilirlikleri önemli ölçüde azalmaktadır [26]. Güçlü basınç gradyanları, ayrılmaya tahmininde erken ya da geç tahmin hatalarına yol açmaktadır ve geometrik karmaşıklık, daha basit modellerin etkinliğini azaltmaktadır [33]. Kararsız akışlar ise beraberinde özel zorluklar getirmektedir; çoğu model, ayrılmaya ve tekrar bağlanması noktalarını doğru tahmin etme konusunda başarısız olmaktadır [26]. k-w SST gibi bazı iki denkleme dayalı modellerin farklı akış koşullarında iyi güvenilirlik sunmaktadır ancak tek bir tübünlans modelinin hem ayrılmayı hem de tekrar bağlamayı tüm aşırı akış koşulları için tutarlı şekilde doğru tahmin edemediğini gösterilmiştir [28]. Her model, doğruluk, hesaplama maliyeti ve sayısal uygulamaya duyarlılık açısından belirli ödünlere layık görülmektedir [27]. Laminer-tübünlans geçiş içeren akışlar için, y -Reθ geçiş modelleri daha iyi performans göstermektedir, ancak tamamen tübünlanslı akışlarda zorlanmaktadır [27]. İkincil akışlar veya karmaşık üç boyutlu geometriler içeren durumlarda, doğrusal olmayan veya Reynolds stres modelleri, daha yüksek hesaplama maliyetine rağmen daha doğru tahminler sağlamaktadır [29]. Proje kapsamında önerilen simülasyon yaklaşımı, katlanabilir kanat ucu davranışının çeşitli koşullar altında daha derin bir şekilde anlaşılması sağlanmakla kalmayacak, aynı zamanda teorik çalışmaları pratik deneylerle birleştirerek havacılık mühendisliğinde çığır açıcı ilerlemeler için yenilikçi uçak tasarım iyileştirmelerinin temelini atacaktır.



Şekil 10. a) İki Yönlü Bağlantı Yöntemi b) Yapısal ve Akişkan Ağları Arasındaki Veri Transferi c) Katlanabilir Kanadın FSI Analizi (Yürüttüçü tarafından analiz yapılmış)

2.3.5. Aktif Akıllı Kontrol Sistemi ve Aero-Servo-Elastik Analiz Entegrasyonu: Proje kapsamında kanatların gerçek zamanlı olarak değişen aerodinamik koşullara dinamik bir şekilde uyum sağlamasını mümkün kılacak sofistik bir akıllı kontrol sistemi (bkz. Şekil 11) geliştirilmesi planlanmıştır. Bu sistem, gelişmiş öngörü algoritmalarından ve kapsamlı bir yerlesik sensör ağından yararlanarak, istenen ve gerçek aerodinamik performans arasındaki farkı minimize etmeyi amaçlayarak kanadın şeklini akıllıca module edecektir. Bu yenileyin merkezinde, kontrol sisteminin komutlarına yanıt olarak kanadın şeklini veya yüzey özelliklerini fiziksel olarak dönüştüren bir şekil değiştirme mekanizmasının entegrasyonu yer alacak ve bu sayede aerodinamik verimlilik ve yükün azaltılması önemli ölçüde artacaktır. Model Öngörü Kontrolü (MPC) ve sensör füzyonu teknikleri kullanılarak tasarlanacak olan sistem, gelecekteki durumları öngörüp kanat ucunun konumunu eniyi şekilde ayarlayarak performans iyileştirilmesini sağlayacaktır. Şekil değerlendirme mekanizması ile akıllı kontrol stratejisinin sinerjisi, detaylı aero-servo-elastik simülasyonlarla desteklenecek; bu da kanadın çeşitli uçuş koşulları altındaki davranışını öngörmeyen yanı sıra, bu teknolojilerin gerçek dünya zorluklarına karşı dayanıklılığını artıracaktır. Bu kapsamlı yaklaşım, aerodinamik, yapısal mekanik ve kontrol mühendisliği alanlarını bir araya getirerek uçak tasarımında yeni bir standardın belirlenmesine yol açabileceği öngörlülmektedir. Kontrol

girdilerini optimize ederek hassas morfolojik ayarlamaları gerçekleştirmek ve simülasyon sonuçlarına dayalı olarak yinelemeli optimizasyonlar yapmak, önerilen projenin havacılık endüstrisini ileriye taşıyan yenilikçi ruhun bir kanıtı olarak durmasını sağlayarak adaptif, verimli ve güvenli yeni nesil uçakların geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır. Bir şekil değiştirme mekanizmasıyla entegre olan ve aero-servo-elastik analiz gerçekleştiren akıllı bir kontrol sistemi için matematiksel bir formülasyon tasarlama, birden fazla karmaşık bileşeni içerir. Burada, temel unsurlara odaklanan basitleştirilmiş bir versiyon sunulmuştur:

Amaçlar:

- 1- Akıllı Kontrol Sistemi Tasarımı ve Uygulaması:

Amaç Fonksiyonu: Değişen aerodinamik koşullar altında, istenen ve gerçek kanat şekli veya performans ölçütleri arasındaki farkı minimize etmek.

$$\min_{u(t)} \left[\int_{t_0}^{t_f} (y_{\text{desired}}(t) - y_{\text{actual}}(t))^2 dt \right] \quad (2)$$

Burada, $u(t)$ t anındaki kontrol girdisi, $y_{\text{desired}}(t)$ istenen kanat şekli veya performans ölçütü, ve $y_{\text{actual}}(t)$ gerçek kanat şekli veya performans ölçütüdür.

2. Gerçek Zamanlı Kanat Adaptasyonu İçin Şekil Değiştirme Mekanizmasının Entegrasyonu:

Adaptasyon fonksiyonunun görevi akıllı kontrol sisteminden gelen kontrol girdisine ($u(t)$) bağlı olarak kanadın şekil veya yüzey özelliklerini (S) ayarlamaktır.

$$S(t+1) = S(t) + \Delta S(u(t)) \quad (3)$$

3. Optimum Performans için Aero-Servo-Elastik Analizin Gerçekleştirilmesi: Analiz Denklemi:

Kanadın davranışını öngörmek amacıyla aerodinamik kuvvetleri (F_{aero}), yapısal dinamikleri (F_{struct}), ve kontrol girdileri Denklem 4'de gösterildiği gibi birleştirilir.

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + Kx(t) = F_{\text{aero}}(x(t), u(t)) + F_{\text{struct}}(x(t)) \quad (4)$$

Denklem 4'de, M , C , ve K sırasıyla kütle, sönümleme ve rijitlik matrislerini temsil ederken, $x(t)$ kanadın deformasyonunu temsil eden durum vektörüdür.

Görevler:

1. Akıllı Kontrol Sisteminin Geliştirilmesi ve Entegrasyonu

- Sensör Verilerinin Kullanımı: Gerçek zamanlı kararları bilgilendirmek için sensör verileri (D_{sensor}) kullanılacaktır.
- MPC Tasarımı: Kanadın dinamikleri ve aerodinamik özelliklerine dayalı tahmin modeli ile bir Model Öngörülü Kontrol (MPC) sistemi tasarlanacaktır.
- Kontrol Algoritması: Gelecekteki durumları tahmin etmek ve kontrol girdilerini optimize etmek için MPC'yi kullanarak $u(t)$ hesaplanacaktır.

$$u^*(t) = \arg \min_{u(t)} J(x(t), u(t)) \quad (5)$$

Denklem 5'de J tahmin edilen aerodinamik ve yapısal tepkileri içeren maliyet fonksiyonudur.

2. Morfing Mekanizmasının Uygulanması:

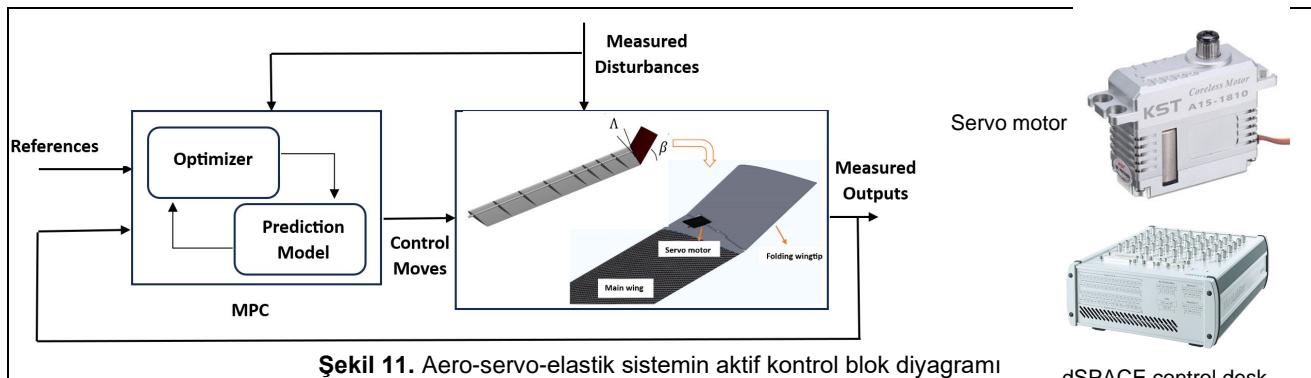
- Aktüatör Dinamiklerinin Entegrasyonu: Aktüatörlerin dinamikleri ve kısıtlamaları kontrol modeline dahil edilecektir.
- Kanat Şeklinin Güncellenmesi: Optimize edilmiş kontrol girdilerine dayalı olarak kanat şekli güncellenecektir.

3. Aero-Servo-Elastik Analiz ve Optimizasyon:

- Iteratif Simülasyonlar: Aerodinamik kuvvetler, kontrol girdileri ve kanadın elastik özellikleri arasındaki etkileşimi modellemek için iteratif simülasyonlar gerçekleştirilecektir.
- Optimizasyon: Simülasyon sonuçlarına dayanarak tahmin modelini ve kontrol stratejileri iyileştirilecek, böylece gerçek dünya koşulları altında dayanıklılık ve optimum performans sağlanacaktır.

Önerilen matematiksel formülasyon, morfing mekanizması ve aero-servo-elastik analiz ile sorunsuz bir şekilde entegre olan bir akıllı kontrol sisteminin geliştirilmesi için bir temel sağlayacak ve kanat tasarımında ilerlemeyi teşvik edecektir.

Akıllı kontrol sistemlerinde Model Öngörü Kontrolü (MPC) ve sensör füzyonu tekniklerini kullanan servomotorlar, MPC'nin kararlarını fiziksel olarak uygulayan anahtar bileşenlerdir; hesaplamalı komutları doğrudan hassas mekanik eylemlere çevirirler. Yüksek hassasiyet ve hızlı tepki verme yetenekleri, entegre sensör verilerine dayalı olarak gerçek zamanlı ince ayarların uygulanması için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, servomotorlar, sistemin geri besleme döngüsüne katkıda bulunarak, sensör füzyonu ve MPC tahminlerinin doğruluğunu artıran hayatı gerçek zamanlı konum veya operasyonel veriler sağlamaktadır. Böylece, sistemin dinamik koşullara hızlı ve doğru tepkilerle uyum sağlaması garanti edilecektir.



Şekil 11. Aero-servo-elastik sistemin aktif kontrol blok diyagramı

dSPACE control desk

2.3.6. Katlanabilir Kanat Uç Mekanizmasının Darbeli Rüzgâra Maruz Kalması Durumunda İncelenen Parametreler:

Katlanabilir kanat uç mekanizmasının darbeli rüzgâr yükleri altındaki tepkisini anlamak için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamigi (CFD), Yapısal Dinamik Analizleri (CSD) ve kontrol sistemleri simülasyonları eş zamanlı olarak yürütülecektir. Aerodinamik performans açısından kaldırma ve sürükleme katsayılarının değişimi, akış ayrılması (stall) ve girdaplı akış yapılarının incelenmesi hedeflenmektedir. Özellikle OpenFOAM gibi açık kaynaklı yazılımlar kullanılarak zamana bağlı akış analizleri yapılacak ve Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS), Large Eddy Simulation (LES) veya Detached Eddy Simulation (DES) modelleri ile türbülans yapıları değerlendirilecektir. Kanat yüzeyi boyunca basınç dağılımı, akış rejiminin değişim süresi, kontrol mekanizmasının aerodinamik verimliliğe etkisi gibi kritik parametreler analiz edilecek, böylece katlanabilir kanat ucunun rüzgâr darbelerine nasıl tepki verdiği belirlenecektir.

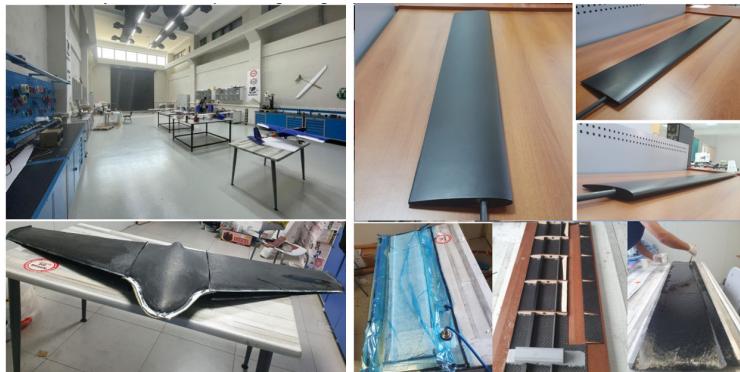
Yapısal dinamik ve aeroelastik performans açısından, NAS² yazılımı ile kanat köküne binen eğilme momenti (WRBM) ve titreşim frekanslarının rüzgâr yükleriyle ilişkisi inceleneciktir. Darbeli rüzgâr frekansları ile kanadın doğal titreşim frekansları arasındaki etkileşim analiz edilerek olası rezonans etkileri önceden tahmin edilecektir. Ayrıca, servo motorların ve aktuatör bağlantılarının mekanik yük değişimleri ve yorulma analizleri gerçekleştirilecektir. Yapısal olarak kanat ucunun bükülmeye deformasyonları hesaplanacak ve aeroelastik stabilitenin korunup korunmadığı değerlendirilecektir. Tüm bu analizler, kanat ucunun uzun vadeli dayanıklılığını ve uçuş güvenliğini sağlamak amacıyla yürütülecektir.

Kontrol sisteminin performansını değerlendirmek için, dSPACE Control Desk ve MATLAB/Simulink tabanlı simülasyonlar yürütülecektir. Servo motorun tepki süresi, tork kapasitesi ve enerji tüketimi gibi kritik parametreler analiz edilerek, aktif kontrol sisteminin darbeli rüzgârlar karşısındaki etkinliği değerlendirilecektir. Model Predictive Control (MPC) algoritmalarının servo motor ile uyumu test edilerek kanat ucunun optimum hareket profili belirlenecektir. Anlık geri besleme mekanizmaları ile servo motorların rüzgâr yüklerine verdiği tepki süresi ölçülecek, böylece aktif kontrol sisteminin dinamik stabilizasyonu iyileştirilecektir. Tüm bu süreçlerin sonunda, katlanabilir kanat ucunun aerodinamik, yapısal ve kontrol sistemleri açısından optimize edilmiş bir şekilde çalışması sağlanacaktır.

2.3.7. Aktif Katlanabilir Kanat Ucuna Sahip Kompozit Kanadın İmalatı ve Yapısal Testi: Kanat ana yapısı, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık oranına sahip karbon fiber kompozit malzemeden, katlanabilir kanat ucu ise hafifliği ve kolay üretilebilirliği ile öne çıkan Lightweight PLA (LW PLA) malzemeden 3D yazıcı ile üretilicektir. Karbon fiber kompozit, havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılan, yüksek dayanıklılık ve düşük yoğunluk sağlayan bir malzeme olup, kanat ana gövdesinin yapısal stabilitesini ve uzun ömürlü performansını artırmak amacıyla seçilmiştir. Düşük esneklik katsayısı sayesinde, kanat yük altındayken aerodinamik formunu koruyarak burulma ve sarmalara karşı daha dirençli hale gelecektir. Ayrıca, karbon fiberin hafifliği, İHA'nın genel ağırlığını artırmadan taşıma kapasitesini iyileştirecek ve aerodinamik verimliliği yükseltecektir. Kanat ucu için ise LW PLA tercih edilerek, ağırlık optimizasyonu sağlanırken, 3D yazıcı ile üretim sayesinde kompleks geometrilerin düşük maliyetle üretilmesi ve hızlı prototipleme imkanı sunulacaktır. Bu özellikler, katlanabilir kanat ucunun düşük enerji tüketimiyle servo motorlar tarafından daha hassas ve verimli şekilde kontrol edilmesini mümkün kılacaktır. Katlanabilir kanat ucunun ana gövdeye bağlılığı menteşe mekanizması ve bağlantı noktaları da 3D yazıcı ile PLA malzemeden üretilicektir. PLA, düşük maliyetli, hafif ve kolay şekillendirilebilir bir malzeme olup, servo motor bağlantı noktalarının hassas üretimine olanak sağlayarak mekanik stabiliteti artıracaktır. Bu malzemenin kullanımı, katlanabilir mekanizmanın test aşamalarında düşük maliyetle üretilmesine ve gerektiğinde hızlı modifikasyon yapılmasına imkan tanıyacaktır. PLA'nın düşük yoğunluğu, menteşe mekanizmasının ağırlık yükünü minimize ederken, servo motorların daha düşük moment ile etkin kontrol sağlamaına yardımcı olacaktır. Bu üretim stratejisi sayesinde, katlanabilir kanat ucu mekanizması hem hafif hem de aerodinamik olarak optimize edilmiş bir yapıya sahip olacak, test sürecinde servo motorların ürettiği momentleri karşılayabilecek mekanik dayanımı sağlayacaktır.

Yazılım paketinin doğruluğunu sağlamak, sonlu elemanlar sayısal modeliyle uyumlu hale getirmek ve katlanabilir kanat ucuna sahip kompozit bir kanadın aerodinamik performansını bir rüzgar tünelinde incelemek için, başlangıçta bir üretim süreci gerçekleştirilecektir. Bu süreç, optimizasyon çalışmalarından elde edilen bilgiler doğrultusunda yönlendirilecektir. Bu amaçla, Adana ATÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde özel bir kompozit atölyesi bulunmaktadır. Tek yönlü karbon fiberden yapılan kompozit ana kanadın inşası, kalıplar kullanılarak ve el yarımına ile vakum torbalama teknikleri uygulanarak gerçekleştirilecektir. Öğrenci bursiyerlerden ve teknik personelden oluşan bir ekip, bu üretim sürecini denetleyecektir. Şekil 12, Adana ATÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü'nde ana kompozit kanadın üretilmesine

adanmış kompozit üretim atölyesini ve Dr. Farsadi'nin rehberliğinde katlanabilir kanat ucunun üretimeinde kullanılan büyük ölçekli 3D yazıcıyı göstermektedir.



Şekil 12. Ana kompozit kanadın üretimi için kompozit üretim atölyesi ve katlanabilir kanat ucunun üretime için büyük ölçekli 3D yazıcı, Adana ATÜ, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü

Projede önerilen kanat profili NACA 0010 olup, rüzgar tüneli testleri ve aeroelastik deneyler için bir kompozit İHA kanadı üretme hedefi doğrultusunda seçilmiştir. RÜZGEM'in 2,5 m x 2,5 m test kesitine uygun olacak şekilde tasarlanan kanat, hem deneysel çalışmaların yürütülmesini kolaylaştırmakta hem de sayısal analizlerle doğrulama yapılmasına olanak tanımaktadır.

Önerilen temel kanat (baseline wing), 1.25 m yarı açılık uzunluğuna sahip olup, buna ek olarak 20 cm ile 30 cm arasında değişen katlanabilir kanat ucu mekanizması (Folding Wingtip mechanism) ile toplam kanat açılığı 1.45 m ile 1.55 m arasında olacaktır. Hüküm kenarı uzunluğu (chord length) 20 cm olarak belirlenen bu yapı, dengeli bir geometriye sahiptir. Kanat, süpürme açısı 0 derece ve yükseklik oranı (aspect ratio) 14 olacak şekilde tasarlanmıştır, yüksek aerodinamik verimlilik sağlamaya yönelik optimize edilmiştir. Bu tasarım, yüksek en-boy oranına sahip kanatların düşük sürükleme ve yüksek kaldırma üretme avantajlarını kullanarak aerodinamik verimliliği artırmayı amaçlamaktadır. Simetrik bir kanat profili (NACA 0010) seçilmesi, akış koşullarının daha iyi kontrol edilmesine, yük dağılımının daha dengeli olmasına ve test sonuçlarının tekrarlanabilir olmasına olanak tanımaktadır. Simetrik profiller, özellikle düşük hücum açılarında nötr moment dağılımı sağlayarak, aeroelastik testlerde ve yük azaltma mekanizmalarının etkinliğinin değerlendirilmesinde daha güvenilir sonuçlar sunmaktadır. Özellikle katlanabilir kanat ucu mekanizmasının (FWT) aktif kontrol sistemi ile nasıl tepki verdienenini anlamak açısından, bu seçimin testlerin hassasiyetini artırın önemli bir faktör olduğunu açıklar. Asimetrik profiller ise belirli hücum açıları için optimize edilmiş ve farklı kaldırma kuvvetleri oluşturarak testlerin doğruluğunu etkileyebilecek dengesizlikler yaratır. Bu nedenle, projenin bu aşamasında simetrik bir kanat profili tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra, kompozit kanadın üretim süreci de bu tercihi desteklemektedir. Kompozit malzemelerden üretilen kanatların kalıplar (mold) ile üretimi, asimetrik profillere kıyasla simetrik kanatlar için daha kolay ve maliyet açısından daha düşük bir süreç gerektirir. Bu durum, üretim sürecinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlarken, testlerin daha sistematik ve verimli bir şekilde gerçekleştirilemesine olanak tanımaktadır.

2.3.8. Darbeli Rüzgar Jeneratörü ile Donatılmış Rüzgar Tüneli Testleri ve Veri Analizi: Katlanabilir kanat ucu mekanizmasının darbeli rüzgâr koşulları altındaki dinamik tepkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilecek deneyler, ODTÜ RÜZGEM'e ait büyük ölçekli alçak hızlı rüzgar tünelinde yapılacaktır. Bu tünel, 2,5 m x 2,5 m kesit boyutları ve 10 m uzunluğu ile düşük türbülans seviyesinde (%0,1) yüksek kaliteli akış sunmakta, 100 m/s'ye kadar hava hızı kapasitesiyle detaylı aerodinamik testlere olanak tanımaktadır. Proje kapsamında planlanan deneySEL çalışmalar, 15–25 m/s aralığında üç farklı sabit rüzgar hızı altında gerçekleştirilecek. sıkıştırılamaz ve düşük Mach sayılı ($M < 0.15$) akış rejimi içinde güvenilir veri toplanmasını sağlayacaktır. Testlerde kullanılacak kompozit kanat modeli, 20 cm aralığında hücum kenarı uzunluğuna ve 1.25 m yarı açılığa sahiptir. Katlanabilir kanat ucu mekanizması, servo motor, aktuatör, menteşe ve sensör sistemleri ile entegre edilmiştir. Servo motorlar, kanat yapısına gömülü şekilde yerleştirilerek akış bozucu etkilerden korunacak; kablolar ise kanat içindeki taşıyıcı kiriş (spar) boşluğundan geçirilip, yük hücresinin yanından dışarıya çıkarılacaktır. Testlerde, dSPACE Control Desk platformu üzerinden Model Predictive Control (MPC) algoritması ile servo motorların açısal kontrolü sağlanacak ve sistemin darbeli rüzgâr etkilerine verdiği tepki gerçek zamanlı olarak izlenecektir. Kanat kök eğilme momenti (WRBM), titreşim profilleri, açısal konumlar ve deformasyonlar, gerinim ölçerler ve ivmeölçerler aracılığıyla yüksek örnekleme frekansı (5 kHz) ile kaydedilecektir. Döner tabla sistemi ile hücum açısı hassas şekilde ayarlanacak, kanat modeli test kesiti içinde simetrik olarak konumlandırılacak aerodinamik dengenin korunması sağlanacaktır.

2.3.9. Rüzgar Tüneli Deneylerinde Aktif Kontrol Mekanizmasının Entegrasyonu: Proje kapsamında, aktif kontrollü katlanabilir kanat ucu (ACFWT) sisteminin rüzgar tüneli testlerine entegre edilmesi için gelişmiş sensörler, yük hucreleri, kontrol algoritmaları ve servo motorlar kullanılarak detaylı bir test altyapısı oluşturulacaktır. Deney sisteminin kontrol masası (Control Desk) ve kanat mekanizması (Wing Mechanism) olmak üzere iki ana bileşenden oluşacaktır. Deney sırasında aktif kontrol sisteminin yönetimi, dSPACE tabanlı bir kontrol platformu kullanılarak gerçekleştirilecektir. Bu platform, kanat ucu mekanizmasına bağlı servo motorları kontrol etmek, rüzgar yükleri altındaki dinamik tepkileri analiz etmek ve model öngörülü kontrol (MPC) gibi gelişmiş kontrol algoritmalarını uygulamak için kullanılacaktır. Sistemin etkin çalışması için yük hucreleri, ivmeölçerler ve açısal konum sensörleri gibi çeşitli geri besleme mekanizmaları kullanılacaktır. Kanat köküne monte edilen yük hucreleri, kanat kökündeki eğilme momentlerini (WRBM) ölçerek rüzgar yüklerinin etkisini belirleyecektir. Aynı zamanda ivmeölçerler ve yer değiştirme sensörleri, titreşim ve

deformasyon profillerini çıkararak aktif kontrol sisteminin doğru ve hızlı tepki vermesini sağlayacaktır. Servo motorların açısal konum sensörleri sayesinde kanat ucunun katlanma açısı gerçek zamanlı izlenecek ve dSPACE sistemi aracılığıyla dinamik PWM sinyalleri oluşturularak servo motorlara gönderilecektir. Böylece, rüzgar tünelinde oluşturulan turbülans koşullarına göre kanat ucunun en uygun açıda konumlanması sağlanacaktır.

- Aktif kontrollü katlanabilir kanat ucu mekanizması, servo motorlar, mekanik menteşeler ve aktuatörlerden oluşan bir sistemle kontrol edilecektir. Bu sistem, kanat ucunun aerodinamik yük altındaki deformasyonunu aktif olarak yönetmek amacıyla tasarlanmıştır. Servo motorlar, MPC kontrolüne dayalı olarak anlık rüzgar yüklerine göre kanat ucunun açısını ayarlayarak yapısal dengeyi optimize edecektir. PWM sinyalleri ile beslenen bu motorlar, hızlı ve hassas tepkiler vererek sistemin aeroelastik stabilitesini korumasına yardımcı olacaktır. Deney sırasında rüzgar tünelinde oluşturulacak 1-cosine ve harmonik rüzgar darbelerine karşı kanat ucunun farklı açılarda hareket etmesi sağlanacak ve farklı frekans ve amplitüdü test senaryoları uygulanarak sistemin dinamik tepkisi değerlendirilecektir. Bu sistem, sadece pasif bükülmeyi değil, aynı zamanda servo motorlarla aktif kontrolü de mümkün kılarak ani rüzgar yüklerine karşı dinamik tepkiler üretimesini sağlayacaktır.

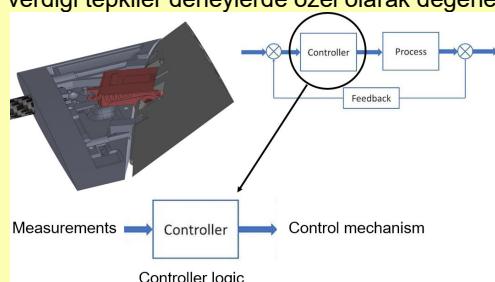
- Deneysel çalışmalar kapsamında aktif kontrol mekanizması, üç farklı test senaryosu üzerinden değerlendirilecektir. İlk aşamada kanat ucunun sabit olduğu referans senaryosu uygulanarak, herhangi bir aktif kontrol olmaksızın sistemin doğal aeroelastik tepkisi belirlenecektir. Bu temel veri, aktif sistemin etkinliğini kıyaslamak için baz alınacaktır. İkinci aşamada servo motorlar kilitli bırakılarak, pasif katlanabilir kanat ucu hareketleri analiz edilecektir. Bu durumda, kanat ucunun sadece aerodinamik yükler altında nasıl tepki verdiği ve doğal burulma eğilimleri detaylı şekilde incelenecaktır. Üçüncü ve en kritik test senaryosu ise aktif kontrollü katlanabilir kanat ucu testidir. Bu aşamada, MPC algoritmaları kullanılarak servo motorların rüzgar darbelerine gerçek zamanlı yanıt vermesi sağlanacaktır. Deneylerin temel çıktıları arasında kanat kökündeki eğilme momentlerinin ve titreşimlerin azalması, sistemin dinamik tepki hızı, enerji tüketimi ve kontrol etkinliği yer alacaktır. Bu kapsamlı testler sayesinde kanat ucu mekanizmasının gerçek uçuş senaryolarına uygunluğu ve yük hafifletme kapasitesi detaylı şekilde değerlendirilecektir.

- Rüzgar tüneli testlerinde servo motorların aerodinamik yükler altındaki tepkisi, kontrol hassasiyeti ve dinamik stabilitesi detaylı olarak incelenecaktır. Kanat ucu hareketinin aktif olarak kontrol edilebilmesi için servo motorlar, mekanik menteşe sistemi ve açısal konum sensörleriyle entegre edilecektir. PWM sinyalleriyle çalışan servo motorlar, Model Predictive Control (MPC) algoritması ile gerçek zamanlı yönlendirilerek ani rüzgar darbelerine karşı dinamik tepki verecektir.

- Servo motorun entegrasyonu, kanat iç yapısına yerleştirilen montaj noktaları ve menteşe mekanizması ile sağlanacaktır. Şekilde gösterildiği gibi, servo motor, kanat ana yapısına bağlanarak menteşe sisteme hareket aktaracak ve kanat ucunun belirlenen açılarda bükülmesini sağlayacaktır. Test sürecinde, servo motorun aşırı yüklenme, gecikme ve hassasiyet kaybı yaşayıp yaşamadığı takip edilerek sistemin güvenilirliği artırılacaktır. Eğer performans yetersiz kalırsa, kontrol algoritmaları optimize edilecek veya daha yüksek tork kapasiteli motor seçenekleri değerlendirilecektir. Servo motorların rüzgar tüneli testlerinde akışı bozma ihtimalini ortadan kaldırmak amacıyla, projede özel bir entegrasyon yaklaşımı benimsenmiştir. Servo motorlar, kanat yapısının içine mümkün olduğunda gömülü yerleştirilecek şekilde tasarlanmış olup, dışa taşan hacimleri minimumda tutulacaktır. Bu sayede motorların, test sırasında aerodinamik yüzeye türbüfansı oluşturarak basınç dağılımını bozması ya da akış karakteristığını etkilemesi engellenenecektir. Bu yerleşim şekliyle, hem aerodinamik ölçümllerin hassasiyeti korunacak hem de test sonuçlarının doğruluğu artırılacaktır. Ayrıca, servo motorların elektriksel bağlantıları için kullanılan kablolar, kanadın içindeki taşıyıcı kiriş (spar) boşluğundan geçirilerek yönlendirilecektir. Kablolardan, kanat yüzeyinde herhangi bir çıkıştı oluşturulmadan, kanat köküne ulaştıktan sonra yük hücresinin (load balance) yanından dışarıya çıkarılması planlanmıştır. Bu düzenlemeye, rüzgar tüneli içerisindeki serbest akışın bozulmasını önlemekte ve test sırasında servo motor kontrol sisteminin görünmez bir şekilde çalışmasına olanak tanımaktadır. Böylece, hem yapısal hem aerodinamik tasarım bütünlüğü korunarak, gerçekçi ve güvenilir deneyel sonuçlar elde edilmesi sağlanacaktır.

Rüzgar tüneli testlerinde servo motorların performansı, hassasiyeti ve aerodinamik yükler altındaki tepkisi detaylı bir şekilde analiz edilecektir. Katlanabilir kanat ucu mekanizmasının aktif kontrolü, servo motorların doğru çalışmasına ve hızlı tepki verebilmesine bağlıdır. Bu nedenle, servo motorların rüzgar yükleri altında nasıl çalıştığı, mekanik dayanıklılığı ve kontrol algoritmalarına verdiği tepkiler deneylerde özel olarak değerlendirilecektir.

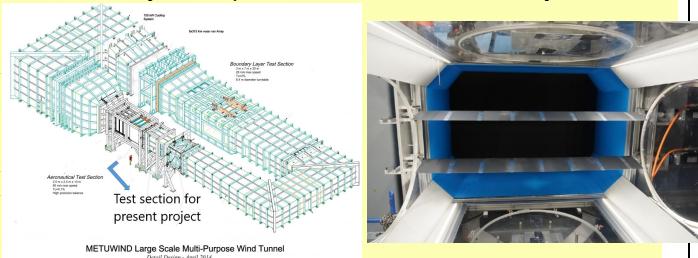
Şekil 13.
Servo motor ve kanat ucu mekanizması



Test Matrisi: Aktif katlanabilir kanat ucuna sahip bir kanat modelinin, darbeli rüzgar jeneratörü bulunan bir rüzgar tünelinde yapılacak deneyel testi için kapsamlı bir test matrisi tasarlama amacıyla, sonuçları etkileyebilecek tüm değişkenleri kapsamak gereklidir. Bu değişkenler arasında serbest akış hızı, darbeli rüzgar frekansları, darbeli rüzgar genliği, hıcum açıları ve kanat ucu konfigürasyonları (açılma açısı ve kanat ucu uzunluğu) ile kontrol döngüsü özellikleri yer alır. Proje kapsamında yürütülecek teorik ve deneyel çalışmaların sınırlarını belirlemek amacıyla kapsamlı bir test planı oluşturulmuştur. Bu plan doğrultusunda, 15 m/s, 20 m/s ve 25 m/s serbest akış hızlarında, 2 Hz, 4 Hz, 6 Hz, 8 Hz ve 10 Hz rüzgar darbe frekanslarında ve 2° ile 4° hıcum açılarında testler gerçekleştirilecektir. Testlerin amacı, kanat

ucunun aerodinamik yükler altındaki stabilitesini değerlendirmek, aktif kontrol mekanizmasının etkisini incelemek ve rüzgar yükü altında yapısal titreşimlerin nasıl değiştiğini belirlemektir. Bu kapsamında, kanat ucu iki farklı konfigürasyonda test edilecektir: açık (extended) ve katlanmış (folded). Bu projede, katlanabilir kanat ucu mekanizmasının performansını farklı aerodinamik ve yapısal koşullar altında değerlendirebilmek amacıyla 3 farklı rüzgar hızı (örneğin 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s), 5 farklı darbeli rüzgar frekansı (2 Hz – 10 Hz arası) ve 2 farklı hücum açısı (örneğin 2° ve 4°) olmak üzere toplam 30 senaryo tanımlanmıştır. Her bir senaryo hem pasif (servo kilitli) hem de aktif kontrollü (MPC algoritmasıyla çalışan) kanat ucu konfigürasyonları için ayrı ayrı uygulanacak ve böylece toplamda 60 farklı test/simülasyon durumu oluşturulacaktır.

Test senaryoları belirlenirken, kanat ucunun farklı hızlarda ve freksnlarda nasıl bir aerodinamik tepki verdiği detaylı olarak incelenecaktır. 1-cosine ve harmonik rüzgar darbeleri oluşturularak, aktif kontrol sisteminin anlık tepkileri değerlendirilecektir. Servo motorları kontrol edilen katlanabilir kanat ucunun, bu farklı koşullarda aerodinamik verimliliği artırıp artırmadığı gözlemlenecektir. Kanat kök eğilme momentleri (WRBM) ve titreşim seviyeleri ölçülerek, pasif ve aktif kontrol mekanizmaları karşılaştırılacaktır. Burada amaç, aktif kontrol sisteminin hangi koşullarda en iyi performansı gösterdiğini ve yapısal zorlanmaları en azı indirdiğini belirlemektir.



Şekil 14. ODTÜ RÜZGEM büyük ölçekli rüzgar tüneli ve test bölümü.

2.3.10. Aktif kanat ucu cihazlarının karmaşık tasarım ve ağırlık sorunlarının giderilmesi: Katlanabilir kanat uçları, rüzgar yüklerini azaltma (GLA) açısından büyük avantajlar sunarken, tasarım sürecinde ek ağırlık ve mekanik karmaşıklık gibi mühendislik zorluklarını da beraberinde getirmektedir. Bu projede, hafif malzemelerin kullanımı, optimize edilmiş mekanik tasarım ve entegre kontrol sistemleriyle bu sorunlar ele alınacaktır. Katlanabilir kanat ucu, 3D yazıcı ile üretilen hafif PLA (LW PLA) malzemeden üretilicek, böylece kanadın toplam ağırlığı minimumda tutulacaktır. Mekanik bağlantı noktalarında metal yerine PLA kullanılarak, gereksiz ağırlık artışı önlenecek ve servo motorların en uygun ağırlık/tork oranına sahip modeller arasından seçilmesiyle enerji verimliliği artırılacaktır. Ayrıca, servo motorlar ve bağlantı elemanları, aerodinamik sürüklemeye artırmadan gömülü bir yapıda tasarlanarak, ağırlık merkezi kaymaları minimize edilecektir. Topoloji optimizasyonu ile mekanik bağlantıların daha hafif ve dayanıklı hale getirilmesi, tasarımın hem hafif hem de aerodinamik olarak verimli olmasını sağlayacaktır. Tasarımın karmaşıklığını azaltmak için hareketli parça sayısı en azı indirilecek ve servo motorlar doğrudan kanat ucunu kontrol edecek şekilde basitleştirilmiş bir menteşe mekanizması kullanılacaktır. Kontrol sistemi, dSPACE platformu üzerinden optimize edilerek, uçuş sırasında katlanabilir kanat ucunun açısını otomatik olarak ayarlayacak şekilde entegre edilecektir. Gerçek zamanlı geri besleme mekanizmaları ile gereksiz hareketler önlenecek enerji tüketimi azaltılacak ve mekanik dayanıklılık artırılacaktır. Ayrıca, aerodinamik optimizasyon kapsamında kanat ucunun katlandığında sürükleme oluşturmuyacak şekilde tasarlanması ve belirli uçuş koşullarında aktif kontrol mekanizmasının sürüklememeyi azaltarak enerji tüketimini düşürecek şekilde çalışması sağlanacaktır. Rüzgar tüneli testleri ile katlanabilir kanat açısının kanat kökündeki eğilme momentine (WRBM) etkisi ölçülerek, en uygun katlanma açısı belirlenerek gereksiz hareketlerin önüne geçilecektir. Böylece, tasarımın hem aerodinamik hem de yapısal avantajlar sağlaması ve uçuş güvenliğini artırması mümkün olacaktır.

2.4. Tasarım Parametreleri: Tasarım parametrelerinin detayları, ekte yer alan tabloda derli toplu bir şekilde sunulmuştur.

Parametre	İnceleme Yöntemi	Proje Amacıyla İlgili Katkısı
Katlanabilir Kanat Ucu Açısı (β)	CFD, Rüzgar Tüneli Testi	Kanat ucunun açısal davranışının kontrolü
Servo Motor Tork Kapasitesi	Rüzgar Tüneli Testi, Deneysel Karşılaştırma	Aktif kontrol için yeterli moment üretimi
Servo Motor Tepki Süresi	Simülasyon, Gerçek Zamanlı Test	Rüzgar yüklerine hızlı yanıt verebilme
Kanat Kök Eğilme Momenti (WRBM)	CSD, Deneysel Strain Ölçümü	Yük azaltımı doğrulama ve optimizasyon
Kanat Ucu Esnekliği	CFD-CSD, Malzeme Testleri	Esnek yapının aeroelastik davranışı
Aerodinamik Kuvvetler (cL, cD)	CFD, OpenFOAM	Sürükleme ve kaldırma katsayılarının takibi
Başınç Dağılımı	CFD, Rüzgar Tüneli Başınç Sensörleri	Aerodinamik davranışın lokal incelenmesi
Girdap Yapıları ve Akış Ayrılması	URANS/DDES Simülasyonları	Turbüfans kaynaklı yüklerin modellenmesi
Yüzey Deformasyonu (Defleksiyon)	CSD, DIC Ölçümleri	Kanat deformasyonlarının izlenmesi
Titreşim Frekansları	CSD, GVT	Titreşimi davranışlarının belirlenmesi
Enerji Tüketimi	Gerçek Zamanlı Kontrol Platformu	Enerji etkinliği ve motor uygunluğu
MPC Kontrol Algoritması Performansı	MATLAB-Simulink (MPC Simülasyonu)	Kontrol doğruluğu ve tepki yeterliliği
Yük Azaltma Verimliliği (GLA)	CFD, Rüzgar Tüneli Testi	GLA başarısının ölçülmesi
Servo Motor İşinme Profili	Motor Sıcaklıkları Ölçümü (Thermocouple)	Termal güvenilirlik doğrulaması
Malzeme Türü ve Katman Yapısı	Malzeme Karakterizasyonu, Optimizasyon	Yapısal dayanım ve üretim uygunluğu
Servo Motor Entegrasyon Yöntemi	Tasarım Gömülü Montaj, Spar İçinden Geçiş	Aerodinamik akış bozulmasını azaltma
Akış-Rezistans Etkileşimi	CFD Simülasyonu, Akış Görselleştirme	Akış kontrolüyle sistem stabilitesi
Gecikme Süresi (Control Delay)	Kontrol Algoritması Zamanlama Analizi	Gerçek zamanlı kontrol güvenilirliği

3. PROJE YÖNETİMİ

3.1. Yönetim Düzeni: İş Paketleri (İP), Görev Dağılımı ve Süreleri

3.1.1. İş-Zaman Çizelgesi

Projede yer alacak başlıca iş paketlerinin hangi sürede gerçekleştirileceği "İş-Zaman Çizelgesi" doldurularak verilir. Literatür taraması, gelişme ve sonuç raporu hazırlama aşamaları, proje sonuçlarının paylaşımı, makale yazımı ve malzeme alımı iş paketi olarak gösterilmemelidir.

İŞ-ZAMAN ÇİZELGESİ (*)

İP No	İş Paketi Adı	Projenin Başarısındaki Önemi (%)**	Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(***)	AYLAR																																			
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
1	Yapısal model oluşturma ve doğrulama	20%	T. Farsadi, M. Ahmadi, A. Kayran, Bursiyer 1,																																				
2	Aeroelastik Model ve MDO Optimizasyonu	20%	T. Farsadi, M. Ahmadi, H. C. Onel, Bursiyer 1 I. H. Tuncer (Danışman)																																				
3	Katlanabilir kanat ucu ile akıllı kontrol ve entegrasyon	25%	T. Farsadi, M. Ahmadi, H. C. Onel, Bursiyer 1, bursiyer 2, M. Friswell (Danışman)																																				
4	Kanat üretimi ve doğrulama testleri	15%	T. Farsadi, M. Ahmadi, A. Kayran, Bursiyer 2,																																				
5	Rüzgar Tuneli Testlerinin Gerçekleştirilmesi ve Veri Analizi	20%	T. Farsadi, A. Kayran Bursiyer 1, Bursiyer 2 M. Perçin (Danışman) M. Friswell (Danışman)																																				

(*) Çizelgedeki satırlar gerektiği kadar genişletilebilir ve çoğaltılabılır.

(**) Sütun toplamı 100 olmalıdır.

(***) İP'de görev alacak kişilerin isimleri ve görevleri (araştırmacı, danışman, bursiyer ve yardımcı personel) yazılır. Bu aşamada bursiyer(ler)in isimlerinin belirtilmesi zorunlu değildir.

Bursiyer 1 (Doktora Öğrencisi) ve Bursiyer 2 (Yüksek lisans öğrencisi)

3.1.2. İş Paketleri

İŞ PAKETİ TABLOSU	
İP No: 1	İP Adı: Yapısal Modelin Yaratılması, Çözümü ve Doğrulaması
İP Hedefi: Geliştirilecek teori ve sayısal modeller, aktif kontrollü kanat ucu cihazlarını içeren kanadın yapısal modellerini kapsayacaktır. Sayısal simülasyonlar gerçekleştirilecek ve bu simülasyonlar, yapısal tepkileri analiz etmek ve modeli deneysel verilerle doğrulamak amacıyla kullanılacaktır (Dinamik analiz için Yer Titreşim Testleri (GVT) ve statik analiz için Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC)).	Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*) 1. T. Farsadi 2. M. Ahmadi 3. A. Kayran 4. Bursiyer 1
İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler: 1.1. Yapısal Modelin Yaratılması: Kanat yapısının ve kanat ucu cihazlarının geometrik ve malzeme özelliklerini tanımlanacaktır. Rijitlik, kütle ve sönütleme özelliklerini dikkate alarak yapısal bileşenleri temsil eden bir sonlu elemanlar modeli geliştirilecektir. Doğru bir yapısal analiz için uygun sınır koşulları ve yükleme senaryoları analiz çalışmalarına dahil edilecektir.	
1.2. Yapısal Çözüm: NAS ² içinde Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) tekniklerini kullanarak yapısal hareket denklemleri çözülecektir. Farklı yükleme durumlarında kanat yapısındaki deformasyonları, gerilmeleri ve birim şekil değiştirmeleri öngörmek için sayısal yöntemler uygulanacaktır. Dinamik tepkileri yakalamak amacıyla zaman ortamı analizi için algoritmalar uygulanacaktır. 1.3. Yapısal Model Doğrulaması: Aktif kontrollü kanat ucu cihazlarıyla donatılmış ölçüklendirilmiş kanat modelleri üzerinde testler gerçekleştirilecektir. Yapısal deformasyonlar ve tepkiler gerinim ölçüler, ivmeölçüler ve diğer sensör cihazları kullanarak ölçülecektir. Sayısal tahminleri, deneysel verilerle karşılaştırarak yapısal model güncellenecek ve model doğrulanacaktır. Gerekirse, tahmin yeteneklerini geliştirmek için doğrulama sonuçlarına dayanarak model tekrar yinelenecektir.	
İP'nin Başarı Ölçütü: Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir.	
Doğu bir aeroelastik model simülasyonu yapabilmek için, doğruluk kayıplarını önlemek amacıyla doğru ve eksiksiz bir doğrusal olmayan yapısal modelleme elde etmek önemlidir. HARW yapıları önemli deformasyonlar yaşar. Geleneksel yapısal hareket denklemleri, bu tür aşırılıkları modellemede verimli değildir. Bu sınırlamayı aşmak için, İP1'de geometrik olarak doğrusal olmayan varsayımlar kullanılmalıdır. Bu aşamada, geliştirilen çözümün yapısal simülasyon için yetenek ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla, literatürdeki veriler kullanılarak sayısal olarak ve daha sonra İP5'te gerçekleştirilecek deneysel çalışmalarla doğrulama çalışmaları yapılacaktır. Sayısal ve deneysel modellerle karşılaşıldığında, statik deformasyonlar ve doğal freksanslardaki fark %5'ten az olmalıdır.	
Ara Çıktılar: İP için öngörülen ve başarı ölçütünün gerçekleştireceğini somut olarak gösteren (teknik rapor, liste, diyagram, analiz/ölçüm sonucu, algoritma, yazılım, anket formu, verim, ham veri vb.) ara çıktılarına ilişkin bilgi verilir.	
1. Rapor: NAS ² kullanılarak kompozit refrans kanat tasarımi. 1. Makale: Geometrik olarak doğrusal olmayan aeroelastik uyarlama yoluyla yüksek en-boy oranlı kompozit kanatların optimizasyonu. 1. Konferans: Optimize edilmiş kanat modelinin simülasyonu ve üretimi.	
Risk(ler)in Tanımı	Alınacak Tedbir (ler) (B Planı)
Yazılım Uyumluluğu ve Hesaplama Kaynakları	Potansiyel Etki: CFD ve NAS ² nin entegrasyonu uyumluluk sorunlarına neden olarak gecikmelere veya hatalara yol açabilir. Risk Seviyesi: Orta Alınacak tedbir (Plan B): Uyumluluk sorunları için alternatif yazılımlar (SU2, Calculix, Fenics) kullanılacak. Hesaplama gücü yetersiz kalırsa ODTÜ, ATÜ ve Swansea Üniversitesi'nin HPC altyapısı devreye sokulacak.
Süpervizör ve Araştırmacı Eksikliği	Potansiyel Etki: Kilit personelin projeden ayrılması, bilgi kaybı ve gecikmeler Risk Seviyesi: Yüksek Alınacak tedbir (Plan B): Anahtar araştırmacılar ayrırsa, projeye atanacak yedek araştırmacılar belirlendi. Prof. Altan Kayran yürütücülüğü devralmaya hazır. Alternatif danışmanlar proje sürecine entegre edilecek.
İP No: 2	İP Adı: Aeroelastik Model ve MDO Optimizasyonu
İP Hedefi: Entegre bir çerçeve geliştirilecektir. Bu çerçeve, katlanabilir kanat uçlarının aeroelastik analizini ve Çok Disiplinli Tasarım Optimizasyonunu (MDO) gelişmiş bir akışkan-yapı etkileşim (FSI) simülasyon yaklaşımıyla birleştirecektir. Bu yaklaşım, etkileşim dinamiklerini yüksek doğruluk ve verimlilikle yakalamak için CFD ve CSD yöntemlerini içermektedir. CFD, optimizasyon döngüsü içinde doğrudan kullanılmasa da, optimizasyon için hızlı aero modelinin doğrulanmasında ve optimizasyon sonrası nihai testlerin yapılmasında kritik bir rol oynayacaktır. Amaç, MDO aracılığıyla katlanabilir kanat uçlarının tasarımını optimize etmek ve CFD simülasyonları kullanılarak doğrulama ve iyileştirme sağlamaktır.	

İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:

2.1. Metodoloji Benimseme ve Kurulum: Hesaplamlı Akışkanlar Dinamiği'ni (CFD) optimizasyon döngüsüne entegre etmek için bir çerçeve oluşturulacaktır; bu çerçeve, daha düşük güvenilirlikteki 3D panel metod yöntemlerine dayanan aero model oğrulanmasına ve optimizasyon sonrası nihai testlerin gerçekleştirilemesine odaklanacaktır. Katlanabilir kanat uçları için CFD ve CSD yöntemlerini kullanarak bir akışkan-yapı etkileşimi simülasyon yaklaşımı benimsenecektir. Ön işleme ve son işleme aşamalarını kapsayan hesaplama süreci tanımlanacaktır. PreCICE bağlama kütüphanesi, OpenFOAM-PreCICE adaptörü, OpenFOAM yazılımı, NAS²-python özelleştirilmiş adaptörü ve NAS² yazılımı gibi gerekli yazılım araçları belirlenecek ve kurulumları gerçekleştirilecektir.

Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*)

1. T. Farsadi
2. M. Ahmadi
3. H. C. Onel
4. I. H. Tuncer
5. Bursiyer 1

2.2. Test ve Doğrulama: Kurulmuş yazılımın işlevsellliğini doğrulamak ve potansiyel sorunları belirlemek amacıyla bir vaka çalışması üzerinden kapsamlı testler gerçekleştirilecektir. Akışkan-yapı etkileşimi altyapısının sorunsuz çalışması sağlanacak ve karşılaşılan zorluklar için çözümler sunulacaktır.

2.3. Simülasyon Kurulumu: Belirtilen boyutsal konfigürasyonları kullanarak 2-D ve 3-D akışkan-yapı etkileşimi simülasyonları gerçekleştirilecektir. OpenFOAM için çözüm ağları oluşturmak amacıyla GMSH programını kullanarak aerodinamik modeller kurulacak ve Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri ile Euler denklemleri çözülecektir. Aerodinamik çözümleri elde etmek için k-w SST türbülans modeli için RANS denklemleri uygulanacaktır.

2.4. Akışkan-Yapı Etkileşimi: NAS²de belirlenen kritik durumlar için kurulan konfigürasyonlar kullanılarak akışkan-yapı etkileşimi simülasyonlarını gerçekleştirilecektir. Veri interpolasyonu için PreCICE kullanarak, çözüm ağı Özelliklerine bağlı olarak uygun yöntemler (örneğin, En Yakın Komşu haritalama, En Yakın Projeksiyon haritalama, Radyal Tabanlı Fonksiyon interpolasyonu) seçilecektir.

2.5. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasını kullanarak, kompozit katman düzeni, sırası, fiber açısı ve kanadın açıklık yönündeki bölgelere ayrılmışla ilgili değişkenlerin optimizasyonunu hedeflenecektir. Minimum güvenlik faktörleri, çırpinma ve sapma hızlarına ilişkin aeroelastik kararlılık, darbeli rüzgar yüklemesi, üretim yöntemi ve birincil ve ikincil (kesme) burkulma ile kompozit hasarların önlenmesi gibi hususları kapsayan PSO algoritması, belirlenen tasarım kısıtları içerisinde hareket etmek üzere tasarlanacaktır. Optimizasyon sürecinin genel amacı, kanat ağırlığını minimize ederken aynı zamanda birim burulma faktörünü maksimize etmektir. Kompozit kanatta burulma-bükülme etkileşim potansiyelini araştıran bu çalışmada, birim burulma faktörü, kanat ucundaki burulmanın dikey sapmaya oranı ile belirlenecektir.

İP'nin Başarı Ölçütü: Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir.

Optimizasyon döngüsü içinde CFD/CSD yöntemlerinin entegrasyonu, hızlı aero modelin doğrulanması ve nihai optimizasyon sonrası testlerin yapılmasına odaklanılarak başarılı bir şekilde gerçekleştirilecektir. FWT için FSI simülasyon yaklaşımı etkili bir şekilde uygulanacak ve test edilecek, yüksek doğruluk ve verimlilik sağlanacaktır. Kanat tasarım, MDO ile optimize edilecek, CFD simülasyonları kullanılarak doğrulanacak ve rafine edilecektir; hedef, kanat ağırlığını ve WRBM'yi minimize etmektir. Tüm simülasyonlar, WP5'te gerçekleştirilemesi planlanan rüzgar tüneli ve türbülans jeneratörü ile donatılmış deneyle hem statik hem de dinamik olarak doğrulanacaktır. Sayısal ve deneysel modellerle karşılaştırıldığında, statik ve dinamik aeroelastik analizler arasındaki fark sırasıyla %5 ve %10'dan az olmalıdır.

Ara Çıktılar: İP için öngörülen ve başarı ölçütünün gerçekleştireceğini somut olarak gösteren (teknik rapor, liste, diyagram, analiz/ölçüm sonucu, algoritma, yazılım, anket formu, verim, ham veri vb.) ara çıktılarına ilişkin bilgi verilir.

2. Rapor: Katlanabilir kanat ucu bulunan kanadın aeroelastik ve MDO çalışması (NAS²/CFD).

2. Makale: Katlanabilir kanat ucu bulunan kanadın CFD/CSD etkileşim analizi.

2. Konferans: Kanat ucu cihazlarının entegrasyonu yoluyla optimize edilmiş kompozit kanatta türbülans yükü hafifletme verimliliği.

Risk(ler)in Tanımı	Alınacak Tedbir (ler) (B Planı)
Model Karmaşıklığı ve Yapısal Esneklik Etkisi	<p>Potansiyel Etki: FSI dinamiklerinin doğruluğunun sağlanamaması, simülasyonların başarısız olması Risk Seviyesi: Yüksek Alınacak tedbir (Plan B): Basitleştirilmiş kıyaslama testleriyle aşamalı model doğrulama uygulanacak. DeneySEL testlerden elde edilen veriler doğrudan sayısal modellere entegre edilerek optimizasyon döngüsü oluşturulacak.</p>
Yazılım Uyumluluğu ve Hesaplama Kaynakları	<p>Potansiyel Etki: PreCICE, OpenFOAM ve NAS²nin entegrasyonu uyumluluk sorunlarına neden olarak gecikmelere veya hatalara yol açabilir. Risk Seviyesi: Orta Alınacak tedbir (Plan B): Uyumluluk sorunları için alternatif yazılımlar (SU2, Calculix, Fenics) kullanılacak. Hesaplama gücü yetersiz kalırsa ODTÜ, ATÜ ve Swansea Üniversitesi'nin HPC altyapısı devreye sokulacak.</p>
Türbülans Modeli Hataları	<p>Potansiyel Etki: İlk seçilen türbülans modelinin rüzgar tüneli test sonuçlarıyla uyşumaması Risk Seviyesi: Orta</p>

	Alınacak tedbir (Plan B): K-Epsilon, K-Omega SST ve DES türbülans modelleri alternatif olarak test edilecek. Sayısal simülasyonlardan önce deneysel test verileri ile türbülans model doğrulama aşamaları gerçekleştirilecek.
--	--

İP No: 3	İP Adı: Akıllı Kontrol Sistemi ve Aero-Servo-Elastik Analiz Entegrasyonu
-----------------	---

İP Hedefi: Bu iş paketi kapsamında, katlanabilir kanat uç mekanizmasının tasarım parametriklerinin optimizasyonu, sayısal simülasyonlar ve deneysel testler ile detaylı olarak incelenecaktır. Model Öngörü Kontrolü (MPC) algoritması ve sensör füzyonu kullanılarak, kanat ucunun gerçek zamanlı olarak en uygun açısal konumuna ayarlanması sağlanacaktır. Sayısal analizler ve rüzgar tüneli testleriyle kanat ucunun darbeli rüzgar yüklerine verdiği tepki, aerodinamik yüklerin azaltılması ve yapısal stabilité değerlendirilecektir.

İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:

3.1. Sensör Füzyonu ve Akıllı Kontrol Sistemi Geliştirme

- 1) Gerçek Zamanlı Veri Toplama: Kanat boyunca hava akış hızı, basınç dağılımı ve yapısal gerilmeleri ölçen sensörler entegre edilecektir.
- 2) Sensör Füzyonu ile Akıllı Kontrol: Toplanan veriler MPC çerçevesinde işlenerek, aerodinamik yüklerin azaltılması için katlanabilir kanat ucunun en uygun açısının hesaplanması sağlanacaktır.
- 3) Gerçek Zamanlı Veri İşleme: Servo motorların açısal hareketleri rüzgar tüneli testlerinden gelen anlık verilere göre optimize edilecektir.
- 4) Aero-servo-elastik sistem entegrasyonu: Kanat ucu hareketi, servo motor yanıt süresi ve yük dağılımı açısından değerlendirilerek sistem doğruluğu artırılacaktır.

3.2. Sayısal Simülasyonlar ile Optimizasyon ve Doğrulama

- 1) Kanat Ucu Açısı (β) Optimizasyonu: -45° ile 45° arasında farklı açılarda aerodinamik yük değişimleri analiz edilecektir.
- 2) Aerodinamik Simülasyonlar (CFD): OpenFOAM kullanılarak, farklı katlanma açılarda basınç dağılımı, girdap yapıları ve akış ayrımları incelenecaktır.
- 3) Yapısal Dinamik Analizler (CSD): NAS² yazılımı ile, kanat kökündeki eğilme momenti (WRBM) ve titreşim frekansları analiz edilecektir.
- 4) MPC Algoritmalarının Test Edilmesi: Sayısal simülasyonlarda aktif kontrol algoritmaları test edilerek servo motor performansı ve enerji tüketimi optimize edilecektir.

3.3. Rüzgar Tüneli Testleri ve Gerçek Zamanlı Doğrulama

- 1) Gerçek Zamanlı Yük ve Titreşim Ölçümleri: Kanat köküne binen momentler, aerodinamik kuvvetler ve titreşim seviyeleri ölçülecektir.
- 2) Aktif Kontrol ile Katlanabilir Kanat Ucu Testi: Servo motor kontrollü kanat ucunun, rüzgar tünelinde farklı hız ve darbeli rüzgar senaryolarında nasıl tepki verdiği gözlemlenecektir.
- 3) Enerji Tüketimi ve Motor Performansı: Servo motorların rüzgar yüklerine karşı tepkisi, tork kapasitesi ve güç tüketimi analiz edilecektir.
- 4) Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması: Rüzgar tüneli testlerinden elde edilen veriler, sayısal modellerle karşılaştırılarak kontrol sisteminin doğruluğu ve optimizasyonu sağlanacaktır.

Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*)

1. T. Farsadi
2. M. Ahmadi
3. H. C. Onel
4. M. I. Friswell
5. Bursiyer 1
6. Bursiyer 2

İP'nin Başarı Ölçütü: Başarı ölçüyü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir.

Akıllı aktif kontrollü kanat ucu, dinamik aerodinamik koşulları tahmin etmek ve bunlara yanıt vermek için sensör füzyonu kullanılarak etkili bir şekilde tasarlanacak ve uygulanacaktır. Kapsamlı sayısal simülasyonlar, kanat sisteminin rafine edecek ve doğrulayarak optimize edilmiş aerodinamik performansı ve yük yönetimini gösterecektir. Rüzgar tünelinde entegrasyon ve testler, sistemin gerçek zamanlı adaptasyon yeteneğini ve performans iyileşmesini doğrulayacaktır.

Ara Çıktılar: İP için öngörülen ve başarı ölçütünün gerçekleşeceğini somut olarak gösteren (teknik rapor, liste, diyagram, analiz/ölçüm sonucu, algoritma, yazılım, anket formu, verim, ham veri vb.) ara çıktılarına ilişkin bilgi verilir.

3. Rapor: Aktif kontrol algoritmasının tasarımını (SF/MPC).
3. Makale: Akıllı aktif kontrollü kanat ucunun tasarımını ve entegrasyonunu.
3. Konferans: Akıllı Kontrol Sistemi, Morfing Mekanizması ve Aero-Servo-Elastik Analizin Entegrasyonu.

Risk(ler)in Tanımı	Alınacak Tedbir (ler) (B Planı)
Yazılım Uyumluluğu ve Hesaplama Kaynakları	<p>Potansiyel Etki: PreCICE, OpenFOAM ve NAS² nin entegrasyonu uyumluluk sorunlarına neden olarak gecikmelere veya hatalara yol açabilir.</p> <p>Risk Seviyesi: Orta</p> <p>Alınacak tedbir (Plan B): Uyumluluk sorunları için alternatif yazılımlar (SU2, Calculix, Fenics) kullanılacak. Hesaplama gücü yetersiz kalırsa ODTÜ, ATÜ ve Swansea Üniversitesi'nin HPC altyapısı devreye sokulacak.</p>
Katlanabilir Kanat Ucu Montaj ve Kontrol	Potansiyel Etki: Kanat ucu mekanizmasının servo motor entegrasyonu sırasında aerodinamik bozulmaların ortaya çıkması

Sorunları	<p>Risk Seviyesi: Yüksek</p> <p>Alınacak tedbir (Plan B): Servo motor montajından önce sistem doğrulama testleri yapılacak. Kanat ucu açısının servo motor yanıt süresine etkisi önceden analiz edilerek testler optimize edilecek. Yedek servo motor sistemleri kullanılacak.</p>
Deneysel ve Sayısal Sonuçlar Arasında Uyuşmazlık	<p>Potansiyel Etki: Sayısal simülasyonların deneysel verilerle uyumsuz olması, model hatalarına yol açması</p> <p>Risk Seviyesi: Yüksek</p> <p>Alınacak tedbir (Plan B): Deneysel test verileri ile sayısal analizler arasında erken aşamada kıyaslama yapılacak. Optimizasyon süreçleri ile model parametreleri gerçek uçuş senaryolarına uygun hale getirilecek.</p>
İP No: 4	İP Adı: Kanat Ucu Cihazlı Kanat İmalatı
İP Hedefi:	Aktif kontrollü kanat ucu cihazlarıyla donatılmış uçak kanatlarının imalatını gerçekleştirilecek, böylece sayısal simülasyonların ve rüzgar tüneli test sonuçlarının deneysel olarak doğrulanmasını sağlayacaktır. İmalat sürecinde kanat ucu cihazlarının yapısal bütünlüğü, aerodinamik performansı ve işlevselliği güvence altına alınacaktır.
İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:	<p>4.1. Tasarım ve Prototipleme: Sayısal simülasyonlar ve mühendislik spesifikasyonlarına dayanarak kanat ve entegre kanat ucu cihazlarının tasarımını tamamlanacaktır. Kanat yapıları ve harekete geçirme sistemleri dahil olmak üzere kanat bileşenlerinin imalatı için ayrıntılı mühendislik çizimleri ve spesifikasiyonlar oluşturulacaktır. Tam ölçekli imalat öncesi ilk doğrulama ve testler için kanatların ve kanat ucu cihazlarının prototipleri ve ölçekli modelleri üretilicektir.</p> <p>4.2. Üretim Süreci: Ana kanat yüzeylerinin imalatı için ağırlık, dayanıklılık ve üretilebilirlik gibi faktörleri göz önünde bulundurarak UD karbon fiber malzemeleri ve vakum torbalama imalat teknigi kullanılcaktır. Kanat yapıları, 3D baskılı kanat ucu cihazı ve diğer ilgili bileşenler, onaylanmış tasarım spesifikasiyonlarına göre imal edilecektir. Bu prosedür, kompozit imalat laboratuvarımızda gerçekleştirilecektir.</p> <p>4.3. Montaj ve Entegrasyon: Üretilen kanat bileşenlerini ve kanat ucu cihazlarını montaj prosedürleri ve montaj talimatlarına uygun olarak tam bir kanat haline getirilecektir. Kanat ucu cihazlarının aktif kontrolünü sağlamak için kontrol servo motoru, sensörler ve kablo demetleri kanat yapısına entegre edilecektir. Montajın uygunluğunu, işlevsellliğini ve performansını doğrulamak için fonksiyonel testler ve denetimler gerçekleştirilecektir.</p>
İP'nin Başarı Ölçütü:	Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya niceł olarak belirtilir.
	Bu iş paketinde ana hedef, İP.1 ve 3'de türetilen ve çözülen yapısal hareket denklemlerini doğrulamak ve yapısal analizle başa çıkmak için sayısal alt programları optimize etmektir. Kanadın yapısal modelini doğrulamak için modal testler yapılacaktır. Bu modal test, yapısal frekansları 400 Hz'e kadar yakalayabilen PONTOS sistemi kullanılarak DIC enstrümanı ile gerçekleştirilecektir. Modal test sırasında, yapının doğal frekansları (uzama, burulma ve eğilme modları dahil) ve bunlara karşılık gelen mod şekilleri elde edilecektir. ODTÜ'nün modal test laboratuvarındaki mevcut altyapıya göre, testi 6+ veya 20+ veri kaydediciye sahip çekici uyarıcılar veya sarsıcı uyarıcılar ile gerçekleştirilebiliriz. Sınırlayıcı faktör, test sırasında belirlenecek olan maliyet ve sonuçlar için gereken çözünürlük olacaktır. Çalışmanın başarılı bir şekilde değerlendirilmesi için, teorik simülasyonlar ile deneysel denemeler arasındaki doğal frekans farkı %5'ten az olmalıdır.
Ara Çıktılar:	İP için öngörülen ve başarı ölçütünün gerçekleşeceğini somut olarak gösteren (teknik rapor, liste, diyagram, analiz/ölçüm sonucu, algoritma, yazılım, anket formu, verim, ham veri vb.) ara çıktılarına ilişkin bilgi verilir.
4. Rapor: Kompozit refrans kanat ve Akıllı aktif kontrollü kanat ucunun üretimi	
Risk(ler)in Tanımı	Alınacak Tedbir (ler) (B Planı)
Katlanabilir Kanat Ucu Montaj ve Kontrol Sorunları	<p>Potansiyel Etki: Kanat ucu mekanizmasının servo motor entegrasyonu sırasında aerodinamik bozulmaların ortaya çıkması</p> <p>Risk Seviyesi: Yüksek</p> <p>Alınacak tedbir (Plan B): Servo motor montajından önce sistem doğrulama testleri yapılacak. Kanat ucu açısının servo motor yanıt süresine etkisi önceden analiz edilerek testler optimize edilecek. Yedek servo motor sistemleri kullanılacak.</p>
İP No: 5	İP Adı: Rüzgar Tüneli Testlerinin Gerçekleştirilmesi ve Veri Analizi
İP Hedefi:	Bu iş paketi, aktif kontrollü kanat ucu cihazlarıyla donatılmış kanadın rüzgarlı koşullardaki performansını değerlendirmek amacıyla kapsamlı rüzgar tüneli testlerinin gerçekleştirilemesini hedeflemektedir. Toplanan veriler, darbeli rüzgar yükü azaltma sisteminin etkinliğini değerlendirmek ve sayısal tahminleri doğrulamak için analiz edilecektir. Deneysel aeroelastik testler, Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nin, bir darbeli rüzgar yük jeneratörü ile donatılmış büyük rüzgar tünelinde gerçekleştirilecektir (Şekil 17'de görüldüğü gibi).

İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:

5.1. Rüzgar Tüneli Test Kurulumunun Hazırlanması: Kanat ile aktif kontrollü kanat ucu cihazlarını taklit eden test modellerinin tasarımını ve imalatı. Aerodinamik kuvvetleri, kanat deformasyonlarını ve kontrol sistemi tepkilerini ölçmek için gerekli enstrümantasyonun kurulumu. Test sırasında doğruluk ve güvenilirlik sağlamak amacıyla ölçüm cihazlarının kalibrasyonu.

Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*)

1. T. Farsadi
2. A. Kayran
3. Bursiyer 1
4. Bursiyer 2
5. M. Perçin
6. M. Friswell

5.2. Rüzgar Tüneli Deneylerinin Gerçekleştirilmesi: Çeşitli darbeli rüzgar profilleri altında, sabit durum ve geçici darbeli rüzgar girdileri dahil olmak üzere rüzgar tüneli testlerinin gerçekleştirilmesi. Kanat ucu cihazlarının dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla darbeli rüzgar yoğunluğu, frekansı ve yönünde kademeli değişiklikler ile sistematik testlerin yapılması. Aerodinamik yükler, kanat deformasyonları, kontrol sistemi girdileri ve diğer ilgili parametreler hakkında verilerin kaydedmesi.

5.3. Veri Toplama ve Analizi: Rüzgar tüneli testlerinden elde edilen deneysel verilerin toplanması, organize edilmesi, verilerin doğruluğunun ve tutarlılığının sağlanması. Aktif kontrollü kanat ucu cihazlarının darbeli rüzgar kaynaklı yükleri hafifletme performansını değerlendirmek için kaydedilen verilerin analiz edilmesi. Deneysel sonuçları sayısal simülasyonlar ve teorik tahminlerle karşılaştırarak darbeli rüzgar yük azaltma sisteminin etkinliğinin doğrulanması. Deneysel veriler ile hesaplamalı modeller arasındaki eğilimlerin, korelasyonların ve tutarsızlıkların belirlenmesi.

İP'nin Başarı Ölçütü: Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir.

Bu iş paketi, doğrusal olmayan aeroelastik simülasyonları rüzgar tüneli Darbeli Rüzgar Yükü Hafifletme Performansının ile doğrulamayı amaçlamaktadır. Testler, RÜZGEM'in rüzgar tüneli tesisinde gerçekleştirilecektir. Ana çıktılar hem niteliksel hem de niceliksel olacaktır. Tepki kalitesi, hem sayısal simülasyonlarda hem de test çıktılarında aynı olmalıdır. Ayrıca, RBM zaman tepkisi ve aktif kontrol tepkisi eşiklerine karşılık gelen değerler, doğrusal olmayan kararlı durum tepki genlikleri ve kararlı durum tepki frekans içerikleri, sayısal simülasyonlarla en fazla %10'luk bir sapma içinde uyumlu olmalıdır. Veri toplama, kanadın köküne yerleştirilen 3 eksenli ivmeölçerler ile sağlanabilir ve limit çevrim salınımıları.

Ara Çıktılar: İP için öngörülen ve başarı ölçütünün gerçekleştireceğini somut olarak gösteren (teknik rapor, liste, diyagram, analiz/ölçüm sonucu, algoritma, yazılım, anket formu, verim, ham veri vb.) ara çıktılarına ilişkin bilgi verilir.

5. Rapor: Kompozit referans kanadı ve akıllı aktif kontrollü kanat ucunun rüzgar tüneli testleri.

4. Makale: Akıllı aktif kontrollü kanat ucunun deneysel rüzgar tüneli çalışması.

Patent: Yenilikçi akıllı aktif kontrollü kanat ucu için başvuru belgesi.

Final Rapor: Akıllı aktif kontrollü kanat ucunun aeroelastik analizi - Teori ve Deney Karşılaştırması.

Risk(ler)in Tanımı	Alınacak Tedbir (ler) (B Planı)
Rüzgar Tüneli Model Üretim ve Montaj Hataları	<p><i>Potansiyel Etki:</i> Kompozit kanat üretiminde kalıp toleransları ve montaj hatalarının veri doğruluğunu etkilemesi</p> <p><i>Risk Seviyesi:</i> Yüksek</p> <p><i>Alınacak tedbir (Plan B):</i> Kompozit üretim süreci için hassas kalıp toleransları belirlenecek ve üretim sonrası detaylı kalite kontrol testleri uygulanacak. ODTÜ ve ATÜ tesisiinde üretim başarısız olursa, Swansea Üniversitesi'nde yedek üretim planlanacak.</p>
Ekipman Arızaları ve Rüzgar Tüneli Kullanım Sorunları	<p><i>Potansiyel Etki:</i> ATU ve ODTU'daki rüzgar tüneli ekipmanında meydana gelen arızalar veri kalitesini etkileyebilir</p> <p><i>Risk Seviyesi:</i> Orta</p> <p><i>Alınacak tedbir (Plan B):</i> Rüzgar tüneli arızalarına karşı yedek test planları oluşturulacak. ATÜ ve ODTÜ tesisiinde test mümkün olmazsa, Swansea Üniversitesi'ndeki rüzgar tüneli kullanılacak.</p>
Deneysel ve Sayısal Sonuçlar Arasında Uyuşmazlık	<p><i>Potansiyel Etki:</i> Sayısal simülasyonların deneysel verilerle uyumsuz olması, model hatalarına yol açması</p> <p><i>Risk Seviyesi:</i> Yüksek</p> <p><i>Alınacak tedbir (Plan B):</i> Deneysel test verileri ile sayısal analizler arasında erken aşamada kıyaslama yapılacak. Optimizasyon süreçleri ile model parametreleri gerçek uçuş senaryolarına uygun hale getirilecek.</p>

3.2. Araştırma Olanakları

Projenin yürütüleceği kurum ve kuruluşlarda var olan ve projede kullanılacak olan altyapı/ekipman (laboratuvar, araç, makine-teçhizat, vb.) olanakları belirtilir.

ARAŞTIRMA OLANAKLARI TABLOSU (*)

Kuruluşta Bulunan Altyapı/Ekipman Türü, Modeli	Projede Kullanım Amacı

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi:

- 1- İki yüksek performanslı bilgisayar ile donatılmış ileri simülasyon laboratuvarı.
- 2- Mekanik test makinesi.
- 3- Kompozit üretimi için atölye.
- 4- Uçuş dinamiği ve robotik için ileri düzeyde laboratuvar.

İleri Simülasyon Laboratuvarı: İki yüksek performanslı bilgisayar ile donatılmış olan bu laboratuvar, katlanabilir kanat uçlarının aerodinamik ve yapısal davranışlarını analiz etmek, akıllı kontrol algoritmalarını optimize etmek ve sistem tepkilerini doğru bir şekilde tahmin etmek için gerekli detaylı CFD ve CSD simülasyonlarının gerçekleştirilemesinde kritik bir rol oynayacaktır.

Mekanik Test Makinesi: Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için hayatı öneme sahiptir. Özellikle katlanabilir kanat ucu yapılsılıçın uçuş koşullarının yaratacağı yüklerle karşı dayanımı sağlamak. Bu veriler, yapısal bütünlük analizlerini destekleyecektir ve kanat için malzeme seçiminde önemli bir rol oynayacaktır.

Kompozit Üretim Atölyesi: Kanadın güç-ağırlık oranını optimize etmek amacıyla prototip kanadın geliştirilmesi ve deneylerin yapılmasını olağanı sağlayacaktır. Bu tesis, deneysel doğrulama için bileşenlerin üretilmesi ve konseptin uygulanabilirliğinin gösterilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Uçuş Dinamiği ve Robotik Laboratuvarı: Katlanabilir kanat ucunun operasyonu için kritik öneme sahip akıllı aktif kontrol sistemleri ve harekete geçirme mekanizmalarının test edilmesi ve doğrulanması için gerekli araçları ihtiyacılıktır. Bu laboratuvar, kontrol sisteminin uçak performansını ve kararlılığını artırmadaki etkinliğini değerlendirmek için destek sağlayacaktır.

ODTÜ

- 1- Çift kanatlı darbeli rüzgar jeneratöründe sahip büyük ölçekli rüzgar tüneli.
- 2- Zemin titreşim testi tesisi.
- 3- Dijital Görüntü Korelasyon (DIC) sistemi.

Çift Kanatlı Darbeli Rüzgar Jeneratöründe Sahip Büyük Ölçekli Rüzgar Tüneli: Bu tesis, kontrollü koşullar altında aerodinamik testlerin yapılması açısından kritik öneme sahiptir ve katlanabilir kanat uçları üzerindeki darbeli rüzgar etkilerinin deneysel olarak izlenmesini sağlayacaktır. Rüzgar tünel testleri belirli darbeli rüzgar profillerini oluşturma yeteneği sayesinde, kanat ucunun aeroelastik performansının ve bunun genel uçak kararlılığı ve verimliliği üzerindeki etkisinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanıyacaktır.

Titreşim Test Tesisi: Kanadın, kanat ucu cihazının ve servo motorun yapısal dinamiklerini bir bütün olarak değerlendirmek için esastır. Bu tesis, doğal frekansların, mod şekillerinin ve sönmüşleme özelliklerinin belirlenmesine olanak tanımaktadır. kompozit malzemeler ve katlanabilir mekanizmalar içeren tasarımların yapısal bütünlüğünü ve aeroelastik kararlılık analizlerini yüksek doğrulukta gerçekleştirebilmek sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Dijital Görüntü Korelasyon (DIC) Sistemi: Kanat yüzeylerindeki deformasyon, yer değiştirme ve gerimlerin temassız bir yöntemle ölçülmesi ve görselleştirilmesini sağlamaktadır. Bu sistem, sayısal modellerin doğrulanması ve özellikle kompozit kanatlar ve akıllı kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve test edilmesi sırasında malzeme ve yapısal davranışın yük altında anlaşılmaması için son derece değerlidir.

4. YAYGIN ETKİ

4.1. Projeden Elde Edilmesi Öngörülen Çıktılara İlişkin Bilgiler

Çıktı Türü	Öngörülen Çıktı (lar)	Çıktının Elde Edilmesi İçin Öngörülen Zaman Aralığı (*)
Bilimsel/Akademik Çıktılar	<p>1- Projenin her aşamasının sonuçları, aeroelastisite alanında ilgilenen öğrenciler çekmek amacıyla ATÜ/ODTÜ üniversitelerinde ve ulusal havacılık konferanslarında ayrı ayrı sunulacaktır. Sonuçlar ayrıca uluslararası konferans bildirileri veya seminerler aracılığıyla paylaşılacaktır. Proje kapsamında en az 6 konferans bildirisi yayınlanması beklenmektedir.</p> <p>2- Kanat yapılarının doğrusal olmayan aeroelastisitesi, akıllı kontrol sistemi, katlanabilir kanat ucu ile darbeli rüzgar yükü hafifletme konularındaki teorik ve deneysel bilgi, ATÜ Üniversitesi'nde İleri Simülasyon Laboratuvarı'nda oluşturulacaktır. Araştırma merkezi, aeroelastisite ile ilgili gelecekteki araştırma faaliyetleri için daha kapsamlı bir temel haline gelecektir. Bu laboratuvar, Türkiye'deki ilk laboratuvarlardan biri olacaktır.</p> <p>3-Bu araştırmanın sonuçları ve bulguları, büyük rüzgar turbinini kanatlarının, döner kanatların, yük taşıyan uçak kanatlarının aeroelastisitesi gibi diğer ilgili akademik alanlara uygulanabilir. RÜZGEM ile işbirliği içinde, rüzgar turbinini analizine yönelik aeroelastik yazılım geliştirme konusunda bir öneri hazırlamak için iletişim kurulacaktır.</p> <p>4-Projenin çığır açan yönlerini prestijli yayınlarda yarmak amacıyla, Q1 kategorisinde en az 3 ila 4 makalenin yayınlanması hedeflenmektedir.</p>	<p>1- 24-30 ay – 30-36 ay</p> <p>2- Projeden sonra ilk 1 sene içinde</p> <p>3-Projeden sonra ilk 1 sene içinde</p> <p>4-12-18 ay – 18-24 ay – 24-36 ay</p>

Ekonomik/Ticari/Sosyal Çıktılar	<p>1-Bu proje kapsamında geliştirilen uzmanlık ve yazılım, yüksek kanat açılığına sahip daha verimli ve hafif bir kanat yapısının oluşturulması potansiyeline sahiptir. Bu ilerleme, özellikle askeri ve gözetleme İHA'larının performansı açısından büyük fayda sağlayacaktır. Geliştirilen yazılım paketi, konsolide edilmiş bilgi birikimi sayesinde hem ulusal hem de uluslararası yatırıım ve satın alma için ilgi çekebilir. Ayrıca, yerli havacılık sanayilerini güçlendirme potansiyeline sahip olup, yabancı havacılık ürünlerine olan bağımlılığı azaltabilir.</p> <p>2-İller Simülasyon Laboratuvarı, Baykar ve TUSAŞ gibi yüksek performanslı hava araçları üreten köklü sanayi kuruluşlarını destekleyerek güvenliğin artırılmasında kritik bir rol oynayacaktır. Bu proje kapsamında elde edilen başarılar, özellikle tamamen doğrusal olmayan ve verimli bir tescilli aeroelastik yazılımın tanıtımı, bu hedefe önemli ölçüde katkıda bulunacaktır.</p>	1- Projeden sonra ilk 1 sene içinde 2- Projeden sonra ilk 1 sene içinde
Araştırmacı Yetiştirilmesi ve Yeni Projeler Oluşturulmasına Yönelik Çıktılar	<p>Bu proje kapsamında, özellikle darbeli rüzgar yüklerini hafifletmek amacıyla katlanabilir kanat ucu cihazlarına odaklanan, CFD ve CSD'nin birleşimi üzerine yoğunlaşan, yüksek esneklikli kanatların aeroelastisitesi üzerine bir doktora tezi hazırlanacaktır. Ayrıca, biri CFD sayısal simülasyonlarına, diğer ise deneysel rüzgar tüneli testlerine odaklanan iki yüksek lisans tezi planlanacaktır. Hem teorik hem de deneysel aeroelastisiteyi kapsayan çeşitli alt sistemler ve temalar, birçok lisans bitirme projesi için de fırsatlar sunacaktır.</p>	Proje süresince 1 Doktora tezi Projenin başlangıcından itibaren 2 master tezi Projenin başlangıcından itibaren

4.2. Öngörülen Etkiler

Proje başarıyla tamamlandığında, aktif kontrollü katlanabilir kanat ucu teknolojisinin geliştirilmesi ile havacılık ve savunma sanayii başta olmak üzere insansız hava araçları (İHA), yeni nesil sivil yolcu uçakları ve çevre dostu hava taşımacılığı sistemleri gibi geniş bir uygulama alanında kullanılabilirliği öngörmektedir. Özellikle Airbus'in Horizon 2050 ve Avrupa Birliği'nin Flightpath 2050 hedefleri doğrultusunda geliştirilen hidrojen yakıtlı veya elektrikli hava araçlarında bu teknolojinin, yük azaltımı, enerji verimliliği ve aerodinamik performans açısından önemli katkılar sunması beklenmektedir. Ayrıca, özel sektör Ar-Ge birimleri, uçak üreticileri ve havacılık sistemleri geliştiricileri için doğrudan uygulanabilir bir yenilik ortaya konacaktır. Bu kapsamında, proje çıktılarının, sürdürilebilir havacılık politikaları geliştirilen kamu kurumları (örneğin Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, SHGM) ve stratejik yol haritaları belirleyen politika yapıcı kuruluşlar (örneğin TÜBİTAK, Savunma Sanayii Başkanlığı) ile paylaşılması planlanmaktadır. Sosyo-ekonomik olarak, proje, sürdürilebilir ve akıllı ulaşım çözümlerine katkı sunarak düşük emisyonlu ve çevre dostu havacılık teknolojilerinin gelişimini destekleyecektir. Aerodinamik yükleri azaltan ve yakıt tüketimini optimize eden katlanabilir kanat ucu mekanizmaları sayesinde, sera gazı salımının azaltılması ve karbon ayak izinin düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu katkı, hem Avrupa Yeşil Mutabakatı'nın havacılıkla ilgili hedeflerine hem de Türkiye'nin On İkiinci Kalkınma Planı'nda yer alan "yeşil dönüşüm, rekabetçi üretim ve sürdürülebilir çevre" başlıklarıyla doğrudan ilişkilidir. Ayrıca proje, yüksek nitelikli araştırmacıların eğitilmesi, üniversite-sanayi iş birliklerinin güçlendirilmesi ve yerli teknolojilerin geliştirilmesi yoluyla Ar-Ge ekosistemine katkı sunarak eğitim kalitesi, teknoloji üretimi ve istihdam gibi alanlarda da önemli etkiler yaratacaktır.

4.3. Proje Sonuçlarının Yayılımı ve Bilim İletişimi Kapsamında Gerçekleştirilecek Faaliyet Planı

Hedef Kitle: Bu proje kapsamında geliştirilecek aktif kontrollü katlanabilir kanat ucu teknolojisinin yayılımı; akademisyenler, politika yapıcılar, özel sektör ve genel kamu olmak üzere dört ana hedef kitleye yönelik olarak planlanmıştır. Akademik alanda SCI/SCI-Expanded dergilerde makaleler yayımlanacak ve uluslararası konferanslarda bildiriler sunularak bilimsel katkı sağlanacaktır. Politika yapıclara yönelik teknik raporlar hazırlanacak ve kamu kurumlarına özel seminerlerle proje çıktılarının havacılık politikalarına entegrasyonu desteklenecektir. Özel sektör için savunma ve havacılık firmalarıyla Ar-Ge iş birlikleri geliştirilecek; teknoloji tanıtım günleri ve teknik toplantılar düzenlenecektir. Genel kamuya ulaşmak amacıyla sosyal medya içerikleri, popüler bilim yazıları, basın bültenerleri ve tanıtım videoları hazırlanacak.

Hedefler ve Beklenen Kazanımlar: Hedefler ve Beklenen Kazanımlar gibi stratejik öneme sahip konularda farkındalıkın artırılması ve bilgi birikiminin yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Proje kapsamında geliştirilecek yenilikçi katlanabilir kanat ucu teknolojisinin, enerji verimliliği, uçuş güvenliği ve çevresel sürdürilebilirlik açısından sağlayacağı katkıların farklı paydaşlara aktarılması, bu alandaki bilimsel ve teknolojik ilerlemenin hızlandırılmasına olanak tanıyacaktır. Akademik camiada yeni araştırmaların teşvik edilmesi, kamu politikalarının bilimsel verilerle desteklenmesi ve sanayide Ar-Ge yatırımlarının yönlendirilmesi gibi çok yönlü kazanımlar öngörmektedir. Ayrıca, gençlerin ve öğrencilerin projeye dahil edilmesiyle mühendislik alanına ilginin artması ve nitelikli insan kaynağının gelişimine katkı sağlanması beklenmektedir. Bu nedenle proje sonuçlarının hedef kitle ile paylaşılması, sadece akademik değil, toplumsal ve ekonomik düzeyde de önemli ve kalıcı etkiler yaratacaktır.

Kullanılacak Araçlar: Proje çıktıları, farklı hedef kitlelere etkili biçimde ulaştırmak amacıyla akademik yayınlar, çalıştaylar, sosyal medya içerikleri ve proje web sitesi gibi araçlarla yaygınlaştırılacaktır. Akademisyenler için makaleler ve konferans sunumları, sanayi ve karar vericiler için teknik raporlar ve toplantılar planlanmıştır. Genç bireyler ve toplum genelinde farkındalık oluşturmak amacıyla infografik, video ve STEM temali atölye çalışmaları düzenlenecek; dijital platformlar aracılığıyla geniş kitlelere erişim sağlanacaktır. Bu araçlar, hedef kitlenin etkileşim biçimleri gözetilerek seçilmiştir.

Zamanlama: Yaygınlaştırma faaliyetleri proje süresine yayilarak aşamalı biçimde gerçekleştirilecektir. Projenin ilk yılında, farkındalık oluşturmak amacıyla bir web sitesi kurulacak ve sosyal medya hesapları aktif hale getirilecektir. İkinci yıl boyunca bilimsel çıktılar hazırlanacak ve ulusal/uluslararası konferanslara katılım sağlanacaktır. Son yılda ise çalıştay, teknik seminerler ve sanayi odaklı toplantılarla proje çıktılarının farklı paydaşlarla paylaşımı gerçekleştirilecek, aynı dönemde popüler bilim içerikleri ve infografikler de yayımlanacaktır. Tüm süreç boyunca yayılım faaliyetleri güncel gelişmelere paralel şekilde güncellenecektir.