

## 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 beklenir. Değerlendirme projenin özgün değeri, yöntemi, yönetimi ve yaygın etkisi başlıkları altında yapılacaktır. Araştırma proje önerisi değerlendirme formuna ulaşmak için [tıklayınız](#).**

<b>Proje Başlığı: PERVANELİ HAVA ARAÇLARININ YALPALAMA KARARSIZLIK DAVRANIŞLARININ ANALİTİK VE SAYISAL YAKLAŞIMLAR İLE İNCELENMESİ</b>
<b>Proje Yürütücüsü: Doç. Dr. Seher EKEN</b>
<b>Projenin Yürütüleceği Kurum/Kuruluş: İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ – UÇAK VE UZAY BİLİMLERİ FAKÜLTESİ</b>

### ÖZET

Türkçe ve İngilizce özetlerin projenin (a) özgün değeri, (b) yöntemi, (c) yönetimi ve (d) yaygın etkisinin ana hatlarını kapsaması beklenir. Her bir özet 600 kelime ile sınırlandırılmalıdır. Bu bölümün en son yazılması önerilir.

#### Proje Özeti

Bu projede, geniş bir yelpazede hava aracı tipleri için pervane yalpalama kararsızlıklarını tahmin etmeye yönelik, hem analitik hem de sayısal yöntemlere dayalı modellemelerin kullanılacağı aeroelastik çözüm araçları geliştirilecektir. Pervane yalpalama kararsızlıklarının tahmin edilebilmesi ve önlenmesi, havacılık tarihinde özellikle pervane yalpalama çarpınması nedeniyle yaşanmış ölümcül kazalar dikkate alındığında uçuş güvenliği açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bunun yanında, son yıllarda özellikle batarya teknolojisinin de gelişimiyle birlikte temiz enerji kullanan yenilikçi hava aracı tasarımları ortaya çıkmaktadır. Örneğin düşey kalkış/iniş yapabilen çok-rotorlu otonom hava araçları veya sabit kanatlı ve kanada yayılı elektrik itki sistemine sahip hava araçları için uçuş performansı, kararlılık ve kontrol ve uçuş güvenliği açılarından pervane yalpalama kararsızlıklarının tespit edilmesi önem arz etmektedir. Ayrıca, "NASA Ames Araştırma Merkezi"nde "Mars rotorcraft" ve gezegen hava aracı tasarımı çalışmalarında görüldüğü kadarı ile Mars'ta pervaneli tasarımların kullanılması, Dünya'ya kıyasla ince atmosfer koşullarında düşük sönüm sonucu ortaya çıkan pervane yalpalama probleminin aşılamaması sebebiyle oldukça zor görünmektedir. Bu bağlamda projenin temel hedefleri pervaneli itki sistemleri içeren bu yenilikçi hava aracı konseptlerinin hem ön tasarımında hızlı sonuç verecek analitik yöntemlere dayalı pervane yalpalama tahmin araçları hem de daha yüksek doğruluğa sahip hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ve hesaplamalı yapı dinamiği (HYD) yöntemlerine dayanan çözüm araçları geliştirmektir.

Geliştirilecek analitik aeroelastik çözüm aracı dört farklı kapsamda ele alınacaktır. İlk model pervane-motor idealize sistemini içerecektir ve Ribner pervane teorisi ile birleştirilerek analizler gerçekleştirilecektir. Houbolt ve Reed'in pervane aerodinamiği teorisinin kullanılacağı ikinci modelde elastik kanat etkisi dâhil edilecektir. Aynı zamanda Ribner ve Houbolt-Reed aerodinamik yöntemine itki üreten pervane etkileri ve sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat düzeltmeleri yapılacaktır. Üçüncü modelde ise aerodinamik şerit teorisi kullanılarak menteşeli pala etkisi incelenecek ve pervane yalpalama kararlılık sınırları elde edilecektir. Dördüncü modelde ise elastik kanat üzerine yerleştirilmiş elastik pervane modeli kurulacaktır. Parametrik olarak tasarlanacak çözücü ile n adet yayılı pervaneli konfigürasyon için pervane yerleşimi ve ağırlık değişkenlerinin yalpalama kararsızlığı üzerine etkisi de incelenebilecektir. Literatürde yer almayan bu yöntem projenin özgün değerlerinden birini oluşturmaktadır.

Yalpalama kararsızlığının çözümü için analitik modellerin yanında sayısal yöntemlerin kullanıldığı hesaplama araçları da geliştirilecektir. Bunlardan ilkinde aeroelastisite alanında oldukça başarılı bir yazılım olan MSC NASTRAN ile n-pervaneli elastik kanat konfigürasyonu oluşturulacak ve pervane yalpalama analizi yapılacaktır. Buna ek olarak açık kaynak kodlu HYD ve HAD çözücülerinin bağlaştırılmasına dayanan bir akışkan - yapı etkileşimi çözüm aracı geliştirilerek çoklu pervane tasarımlarına uygulanacaktır. Akışkan çözücüsü olarak OpenFOAM, yapı çözücüsü olarak MBDyn açık kaynak kodlu yazılımlarını kullanan ve bu çözücülerin bağlaşması için PreCICE bağlaşım kütüphanesi kullanan bir hesaplama aracı tasarlanacak ve çoklu-pervane konfigürasyonlarına yönelik simülasyonlar yapılacaktır.

Proje İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesinde Doç. Dr. Seher Eken yürütücülüğünde 30 ayda gerçekleştirilecektir. Proje ekibinde, akışkan-yapı etkileşimi alanında uzman araştırmacı Dr. Öğr. Üyesi Ali Eken yer alacaktır. Ayrıca, projede görev alacak 2 yüksek lisans, 1 doktora öğrencisi ile ülkemizde bilim insanlarının yetiştirilmesine katkı sağlayacaktır. Elde edilecek sonuçların en az 2 adet uluslararası yayında yayımlanacağı öngörülmektedir. Son olarak, proje çıktıları milli kaynaklarla tasarlanacak çevre dostu elektrik motorlu-pervaneli hava araçlarının tasarımında kullanılabilecek aeroelastik analiz ve simülasyon araçları arasında öncü olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** pervane yalpalama çarpınması, elektrikli-pervaneli hava araçları, turboprop, tiltrotor, MSC NASTRAN, akışkan-yapı etkileşimi

**Title : INVESTIGATION OF WHIRL FLUTTER INSTABILITY BEHAVIOR OF PROPELLER AIRCRAFT BY ANALYTICAL AND NUMERICAL APPROACHES****Summary**

In this project, aeroelastic simulation tools will be developed that use modeling based on both analytical and numerical methods to predict propeller whirl instabilities for a wide range of aircraft types. Being able to predict propeller whirl instabilities is of great importance in terms of flight safety, considering the fatal accidents that have occurred in aviation history, especially due to propeller whirl flutter. In addition, in recent years, especially with the development of battery technology, innovative aircraft designs that use clean energy have emerged. For example, for multi-rotor autonomous aircraft capable of vertical take-off/landing or aircraft with fixed wings and distributed electric propulsion system, it is important to detect propeller whirl instabilities in terms of flight performance, stability and control and flight safety. In addition, as seen in the "Mars rotorcraft" and planetary aircraft design studies at the "NASA Ames Research Center", the use of propeller designs on Mars seems to be quite difficult since the problem of propeller whirl, which occurs as a result of low damping in thin atmospheric conditions compared to Earth, cannot be overcome. In this context, the main objectives of the project are both propeller whirl prediction tools based on analytical methods that will provide rapid results in the preliminary design of these innovative aircraft concepts containing propeller propulsion systems, and solution tools based on high fidelity CFD and CSD methods.

The analytical aeroelastic solution tool to be developed will be discussed in four different contexts. The first model will include the propeller-motor idealized system and analyses will be performed by combining it with Ribner's propeller aerodynamic method. In the second model, where Houbolt-Reed's theory of propeller aerodynamics will be used, the elastic wing effect will be included. At the same time, thrust generating propeller effects, compressibility and aspect ratio corrections will be applied to the Ribner and Houbolt-Reed's aerodynamic methods. In the third model, the hinged blade effect will be examined using the aerodynamic strip theory and the propeller whirl stability boundaries will be obtained. In the fourth model, an elastic propeller model located on an elastic wing will be installed. With the solver to be designed parametrically, the effect of propeller spanwise location and weight values on whirl instability can be examined for a configuration with n-distributed propellers. This method, which is not included in the literature, constitutes one of the unique values of the project.

In addition to analytical models, numerical tools will also be developed to solve whirl instability. In the first of these, an n-propeller elastic wing configuration will be created with MSC NASTRAN, a very successful software in the field of aeroelasticity, and propeller whirl stability analysis will be performed. In addition, a fluid-structure interaction solution tool based on the coupling of open source CFD and CSD solvers will be developed and applied to multiple propeller designs. A simulation tool that uses OpenFOAM as a fluid solver and MBDyn open source software as a structural solver and the PreCICE coupling library to couple these solvers will be designed and simulations for multi-propeller configurations will be made.

The project will be coordinated by Seher Eken at ITU in 30 months. The project will be carried out with a team of an expert researcher in the field of fluid-structure interaction Dr. Ali Eken. In addition, this project will give rise to graduate theses of 2 MSc students and 1 PhD student which will directly contribute to scientists' population in our country. Finally, the project outputs will be a pioneer among the aeroelastic analysis simulation tools that can be used in the design of environmentally friendly electric propeller aircraft to be designed in our country.

**Keywords:** propeller whirl flutter electric propeller aircraft, turboprop, tiltrotor, MSC NASTRAN, fluid-structure interaction

**1. ÖZGÜN DEĞER****1.1. Konunun Önemi, Projenin Özgün Değeri ve Araştırma Sorusu veya Hipotezi**

Proje önerisinde ele alınan konunun kapsamı ve sınırları ile önemi literatürün eleştirel bir değerlendirmesinin yanı sıra nitel veya nicel verilerle açıklanır.

Özgün değer yazılırken projenin bilimsel kalitesi, farklılığı ve yeniliği, hangi eksikliği nasıl gidereceği veya hangi soruna nasıl bir çözüm geliştireceği ve/veya ilgili bilim veya teknoloji alan(lar)ına kavramsal, kuramsal ve/veya metodolojik olarak ne gibi özgün katkılarda bulunacağı literatüre atıf yapılarak açıklanır. Kaynaklar <http://www.tubitak.gov.tr/ardeb-kaynakca> sayfasındaki açıklamalara uygun olarak EK-1'de verilir.

Projenin araştırma sorusu ve varsa hipotezi veya ele aldığı problem(ler)i açık bir şekilde ortaya konulur.

Jiroskopik yalpalama olarak adlandırılan pervane yalpalaması (dönmesi) (whirl flutter), esnek bir şekilde monte edilmiş bir motor ve pervane sisteminde ortaya çıkan bir kararsızlık olayıdır. Bu kararsızlık, dönme hareketinde artan genliklere yol açarak yapının hasarlanmasına neden olmaktadır. Uçuş emniyeti için risk oluşturan bu durumun önlenerek uçuş zarfından eliminasyonu gerekmektedir. Tarihsel olarak, ilk olarak 1950'lerin sonlarında turbo-prop tipi hava araçlarında gözlenmiştir. İlk kaza 1960 yılında bir nakliye uçağında gerçekleşmiştir (Cecrdle 2015). Bu uçağın enkazında, pervanelerden birinin; dönme eksenini normaline 35°'lik bir açı yapacak şekilde kırıldığını fark edilmiştir (Donham ve Watts 2000). Yine o yıllarda bir Lockheed L-188 C Electra II modeli yolcu uçağında pervane yalpalama çirpınması oluşarak

ve uçak kırma uğrayarak ölümcül kazalar yaşanmıştır (Cecrdle 2015). Kazaların sebebini araştırmak için NASA rüzgâr tünellerinde birçok test gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak; kazanın, pervane destek bağlantısının katılık ve sönüm karakterinde oluşan azalma sonucu ortaya çıktığı raporlanmıştır. 1960'lı yıllara denk gelen iki kazanın ardından, FAA pervane yalpalama çirpinması için kurallar ve yeni yönetmelikler belirleyerek yürürlüğe koymuştur (EASA 2019). Bu değişikliğin ardından, uçak üreticisi; tıpkı klasik çirpimada olduğu gibi sertifikaya edilecek hava aracının operasyon yürüttüğü uçuş zarfında pervane yalpalama kararsızlığı görülmediğini testler ve/veya analiz yoluyla göstermek zorundadır. Bu durum pervane yalpalama çirpinmasının günümüz havacılığında bilinmesi için önem arz eden bir konu olduğunu göstermektedir.

Pervane yalpalama çirpinması ile alakalı ilk çalışma 1938'de Taylor ve Browne (1938) tarafından yapılmıştır. Birkaç yıl sonra, Scanlan ve Truman (1950) tarafından başka bir çalışmada, "rijit bir pervanenin dönmesinin kanat normal mod şekillerini ve frekanslarını etkileyebileceği" gösterilmiştir. Bu sıralarda, bu olay bazı uçak tasarımcıları tarafından dikkate alınmış, ancak daha sonra büyük güvenlik marjlarının karşılandığı düşünülerek, bu tür bir uygulamadan vazgeçilmiştir (Reed ve Bennet 1963). 1960 ve 70'li yıllarda, pervane yalpalamasını anlamaya yönelik çok sayıda analitik ve deneysel çalışma yapılmıştır (Bennet ve Bland 1963, Bennet ve Bland 1964, Reed ve Bland 1961, Reed 1966, Reed 1967). Sahadaki önemli bir analitik çalışma Ribner (1945) tarafından yapılmıştır. Ribner bu çalışmasında düzlem içi pervane aerodinamik kuvvetlerinin ve jiroskopik hareketler nedeniyle ortaya çıkan momentlerin analitik ifadelerinin çıkarımını yapmıştır. Bu kuvvetler, yunuslama/sapma açıları ve yunuslama/sapma açısı oranlarına göre aerodinamik türevler cinsinden ifade edilmektedir. Aerodinamik türevlerin hesaplanması için iyi bilinen analitik yöntemlerin arasında Ribner (1945) tarafından geliştirilen yöntemin yanında, Houbolt ve Reed (1962) tarafından geliştirilen yöntem de bulunmaktadır. Her iki yöntem de şerit teorisini (strip theory) kullanarak sanki-daimi (quasi-steady) aerodinamik yaklaşımla bir pervanede oluşan aerodinamik yüklemeyi hesaplamaktadır. Proje kapsamında, öncelikle Ribner ve Houbolt-Reed'in yönteminin literatürdeki mevcut hallerine göre hesaplamalar yapılacak, ardından her iki yöntem itki üreten pervane ile sıkıştırılabilirlik ve sonlu kanat etkilerine yönelik düzeltmelerle yeniden uyarlanarak genişletilecektir.

Pervane yalpalama çirpinması olayının önemi, elektrik-pervaneli hava araçlarının artan popülaritesiyle birlikte daha belirgin hale gelmiştir. Hava araçlarında elektrik motorlarının kullanılması sonucunda ortaya geleneksel olmayan çok farklı pervane yerleşimine sahip konfigürasyonlar çıkabilmektedir. Elektrik-pervaneli motorlar diğer pervaneli motor gruplarına göre çok daha hafif ve kompakt yapıda oldukları için kanat üzerinde farklı konumlara farklı kombinasyonlarda yerleştirilebilmektedir. Ancak, kompakt yapıları sebebiyle, pervane ve pivot (destek) noktası arasındaki mesafenin kısa olmasını yüzünden yalpalama kararlılıkları olumsuz etkilenmektedir. Bu türden aeroelastik sınırlamalar nedeniyle uçuş zarfının daralması söz konusu olmakta ve hava aracı istenen performansı gösterememektedir. Bu nedenle, son yıllarda giderek yaygınlaşan elektrikle çalışan pervaneli hava araçları için pervane yalpalama kararsızlığının tasarım sürecinde değerlendirilmesi son derece hayati ve kritik bir husus haline gelmiştir (Xu 2020).

Ek olarak, elektrik-pervaneli hava araçlarının kullanımının ve yaygınlığının Kentsel Hava Hareketliliği (Urban-Air-Mobility) sisteminin kurulması ile daha da artması öngörülmektedir (Radotich 2022, Koch 2022). Kentsel Hava Hareketliliği sisteminin, Dünya çapında 2035 yılında 20 binden fazla hava aracı ile 60 milyar Euro'luk büyük bir pazara alanına sahip olacağı tahmin edilmektedir (Tuncal ve Uslu 2021). Bu harekete dâhil olacak yeni nesil, çevre dostu, hızlı ve verimli performans özelliklerine sahip hava aracı konseptlerine ihtiyaç vardır.



Şekil 1. X-57 Maxwell (Hoover vd. 2018)

Bu noktada, Şekil 1'de verilen NASA'nın tamamen elektrikli tanıtım aracı olan X-57 Maxwell'e değinmek gerekmektedir. Çevre dostu bu hava aracı kendine sınıfına göre enerji tüketiminde beş kat azalma sağlamıştır. Araç, seyir koşullarında itki sağlamak için tasarlanmış kanat ucunda iki büyük pervane motor ve yüksek taşıma koşullarında çalışmak üzere tasarlanmış on iki adet kanat üstünde pervaneli motor içermektedir (Şekil 1). Aerodinamik performansı artırmak için kanat üzerine çeşitli konfigürasyonlarda birden fazla pervane yerleştirilmiştir. Pervanelerin düşük hızlardaki yüksek verimliliği sayesinde birçok yeni nesil uçak konseptinde olduğu gibi tahrik sistemi seçiminin kanat açıklığı boyunca yayılmış büyük pervanelere yönelmesi beklenen bir durumdur.

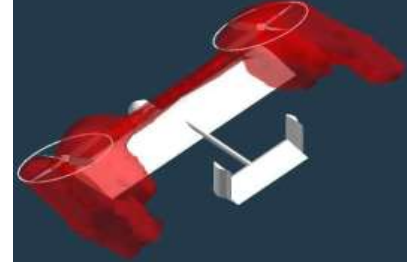
Ancak Kanada'da bağlı çok sayıda büyük pervaneye sahip yüksek açıklık oranlı bir kanat için, yalpalama çirpinma sınırları büyük önem taşımaktadır. Nitekim, X-57 konfigürasyonu tasarımında, büyük kanat ucu motorları ve çok sayıda yüksek taşıma tahrik sistemlerinin kanat boyunca yerleştirirken karşılaşılan en büyük zorluk pervane yalpalama kararsızlığı olmuştur. Kanat-pylon doğal frekansları, mod şekilleri, pervane aerodinamiği, pervane ataleti, kanat aerodinamiği ve pervane esnekliği gibi birçok değişkene bağlı olan bu sorunun çözülmesi için birçok çalışma yürütülmüştür (Heeg vd. 2017; Hoover vd. 2018; Hoover ve Shen 2018; Hoover 2018; Heeg vd. 2019). Kanada yayılı elektrik-pervaneli hava araçları için tasarımın seyirini değiştiren pervane yalpalama çirpinması olayını tahmin eden yöntemlerin geliştirilmesi oldukça önemli olacaktır. Projede bu ihtiyaca yönelik olarak aeroelastik çözüm araçları geliştirilerek, elektrik motorlu tahrik sistemine ve farklı yerleşim yapılandırmasına sahip yeni nesil hava araçları tasarımıda kullanılacaktır.

Günümüz için önemli olan başka bir hava aracı tipi ise bazı pervane konfigürasyonlarında daha güçlü ve daha büyük pervaneler kullanmak suretiyle dikey kalkış/iniş yeteneğine sahip VTOL tipi hava araçlarıdır. Ancak, bu hava aracı tipinde, pervane yalpalaması kararsızlığı özellikle uçak modundaki tiltrotorların seyir hızını sınırlamaktadır, ayrıca çözümlemesi tipik pervaneli hava araçlarından çok daha karmaşık bir fenomendir. YAH-64 Apache ileri saldırı helikopterinin (Silverthorn 1987) birinci aşama geliştirilmesi sırasında ileriye doğru bir pervane yalpalama çirpinması tahmin edilerek gözlemlenmiştir. Kararsızlığın nedeni, pala yunuslama açısı ile pervane direğinin eğilmesi arasındaki destek bağlantısı olarak belirlenmiştir. AH-64D Longbow Apache'nin geliştirilmesi sırasında, yine benzer bir sebep ile

aynı kararsızlık tekrar ortaya çıkmıştır (Kunz 2005). Ek olarak, XV-15 ve V-22 tiltrotor hava araçlarında, seyir uçuşu sırasında hava aracının maksimum hızını belirleyen kritik bir faktör yalpalama kararlılık sınırıdır. Bu nedenle, VTOL tipi hava araçları için pervane yalpalama çirpınma kararlılığının uçuş sınırlarından çıkarılması son derece kritik ve önem arz eden bir konudur.

Bu konu üzerine analitik çalışmalar Johnson (1975), Kvaternik (1973) ile Kvaternik ve Kohn (1977) ve Kunz (2005) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda yapılan modellemede kanat esnekliği göz ardı edilerek tiltrotor pervanelerinin getirdiği serbestlik dereceleri eklenmektedir. Projede önerilen pervane yalpalama çözüm araçları, VTOL tarzı hava araçlarını da kapsayacak şekilde genişletilecektir. Bu kapsamda geliştirilecek modeller uzay araştırmalarında kullanılmaya başlayan döner kanatlı araçlar için de kullanılabilir (Örnek olarak 2020 yılında Mars-Jezero kraterine inmeyi başaran Ingenuity helikopteri). Dünya'da, helikopter palalarında meydana gelen düzlem dışı sapmalar, üzerine etkiyen aerodinamik kuvvetler tarafından sönümlenirken, bu durum Dünya'ya göre ince bir atmosfer tabakasına sahip Mars gezegeninde yeterli seviyede gerçekleşmemektedir.

Mars hava araçları için NASA Ames Araştırma Merkezi farklı tiltrotor tasarımları üzerinde çalışmaktadır (Young 2021). Örnek olarak Şekil 2'de verilen tasarım sunulabilir. Mars'ta kullanılacak tiltrotor konseptlerinde, ultra hafif yapıların kullanılması gerekliliği düşük eğilme/burulma katılığına sahip yapılar ortaya çıkaracaktır. Bu da, hava aracı helikopter modunda iken operasyonda yüksek derecede eğilmiş rotorların maksimum ileri hızını sınırlayacaktır. Hava aracı yüksek hızlı uçak modundayken ise maksimum ileri hızı pervane yalpalama kararsızlığı yüzünden sınırlanacaktır. Bahsedilen aeroelastik kararsızlık konuları, hali hazırda potansiyel olarak Dünya'daki hava araçlarında kendini gösterirken, Mars'ta bu konuların çözülmesi daha zor olacaktır (Young 2021).



Şekil 2. Mars Tiltrotor (Young vd. 2021)

Yukarıda sunulan literatürden görüleceği üzere, pervane yalpalama çirpınması; yaklaşık bir asır önce turboprop hava araçlarında ilk ortaya çıkışından bu yana, son yıllarda yaygınlaşan elektrik-pervaneli hava araçları ve VTOL tipi hava aracı ihtiyaçlarına karşılık, yeniden güncel bir konu haline gelmiştir. Projede, incelenen literatüre paralel olarak, pervane yalpalama çirpınmasını tahmin etmek için literatürde mevcut bazı analitik ve sayısal modellerin genişletilmesi ve yeni modellerin kurulması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda geliştirilecek aeroelastik çözüm araçları, günümüz konseptlerini de içeren geniş bir yelpazede hava aracı tipleri için pervane yalpalama kararsızlıklarını tahmin edecek kabiliyette olacaktır. Proje süresince dört analitik ve iki sayısal model geliştirilecektir. Bu modellerin özellikle günümüz hava araçları için önem arz edecek kabiliyetleri aşağıda listelenmiştir:

**Analitik Model I'**de izole edilmiş bir pervane-motor sisteminin yalpalama kararsızlığı incelenecektir. Proje önerisi içinde en basit modellerden biri olan bu modelde pervane aerodinamik türevleri Ribner ve Houbolt-Reed yöntemleri kullanılarak hesaplanacaktır. Bu yöntemlerin mevcut versiyonlarında pervane itkisi sıfır alınarak, pervaneyi sadece hava akımının döndürdüğü kabul edilmiştir. Pervane yalpalama çirpınması ile ilgili birçok çalışmada (Reed ve Bland 1961, Bennett ve Bland 1964, Hoover vd. 2017, Xu 2020, Böhnisch vd. 2022), yüksek hızlı uçuş koşullarında geleneksel ve esnek olmayan (rijit) pervaneler için pervane itkisinin yalpalama kararsızlığı üzerinde küçük bir etkisi olduğunu varsayılmaktadır (Reed 1967). Ancak, özellikle yeni nesil hava araçları söz konusu olduğunda, yüksek itki üreten pervaneler için itki; yalpalama çirpınması hesabında dikkat edilmesi gereken bir büyüklük haline gelmektedir. Proje kapsamında, bu ihtiyaca cevaben, Ribner (1945) ve Houbolt-Reed (1962) yöntemlerinin mevcut versiyonlarında olmayan itki üreten pervane katsayısının hesaba katıldığı bir formülasyon geliştirilecektir. Bu formülasyon ile gerçekleştirilen analizlerde pervane itkisinin, yalpalama kararsızlığını üzerinde etkisini incelenecektir.

**Analitik Model II'**de kanada yayılı tahrik sistemlerinin pervane yalpalama çirpınma analizi için bir model sunulacaktır. Benzer olarak literatürde Xu (2020), Böhnisch vd. (2022), Hoover vd. (2017)'in çalışmaları bulunmuştur. Geliştirilecek modelde kanat elastik kabul edilerek kanadın esnekliğinin yalpalama kararsızlığına olan etkisini incelenecektir. Elastik kanat üzerinde n-pervaneli konfigürasyon için gerçekleştirilecek formülasyon geliştirilerek ve yapının ayrıklaştırılması için genişletilmiş Galerkin yöntemi (Eken 2015) kullanılacaktır. Uygulanacak yöntem projede sunulan yöntemsel yeniliklerden biridir. Ayrıca, proje kapsamında yürütülecek başka bir konu da n-pervaneli konfigürasyonda pervanelerin büyüklüklerinin ve konumlarının etkisinin incelenmesidir. Bu kapsamda Xu 2020, Böhnisch vd. (2022), çalışmalarında rastlanmayan, hem pervanelerin yerleşimi hem de ağırlık değişkenlerinin yalpalama kararsızlığı üzerine kombine etkileri incelenecektir. Yalpalama kararsızlığının pervane yerleşim konfigürasyonuna oldukça duyarlı olması sebebiyle n-pervaneli konfigürasyon geliştirilmesi ve analizlerinden elde edilecek sonuçlar literatüre öncü olacaktır. Son yıllarda yeni yeni çalışılan bu konu üzerinde bu kapsamda bir çalışma mevcut değildir. Ancak, bahsedilen n-pervaneli konfigürasyon için ağırlık ve yerleşim kombinasyonlarına göre yalpalama kararlılık analizlerinin başarılı bir şekilde tamamlanması, her bir konfigürasyon için karmaşık denklem sisteminin uygun formda elde edilmesi ile mümkün olacaktır. Bu amaçla, formülasyon, Mathematica Parametrik Programlama Dili kullanılarak geliştirilecektir. N-pervaneli konfigürasyon için  $n$  sayısının istenen değerleri programa girildiğinde formülasyon ve matrislerin elde edilmesi tamamen bilgisayar ortamında yapılacaktır. Son olarak Xu (2020), Böhnisch vd. (2022), Hoover vd. (2017)'in çalışmalarında pervanenin itki üretmediği varsayılmaktadır. Projede geliştirilecek modelde ise itki üretimi de hesaba katılarak, elastik kanat üzerine monte n-pervaneli konfigürasyonun yalpalama kararlılık sınırları elde edilecektir.

**Analitik Model III**'te VTOL hava aracı tipleri için literatürde bulunan Kunz (2005), Johnson (1973) ve Kavternik (1975) çalışmaları kullanılarak yalpalama kararsızlık analizleri gerçekleştirilecektir. Bu model ile projenin kapsadığı hava aracı tiplerine VTOL tipinin dâhil edilecektir. Ayrıca bu modelden elde edilen çıktıların, bir sonraki analitik modelin geliştirilmesi için önemli olacaktır.

**Analitik Model IV**'te Analitik Model II ve III'te sunulan yapısal ve aerodinamik formülasyonun birleştirilmesi ve genişletilmesi ile tamamen yeni bir model geliştirilecektir. Bu model, elastik kanat üzerine yerleşmiş n adet elastik pervaneli konfigürasyon için yalpalama çarpınma kararsızlığını tahmin eden bir yaklaşım sunacaktır. Yeni nesil pervane teknolojilerinin kullanıldığı hava araçlarında yalpalama kararsızlığını tahmin etmek için kullanılabilecektir. Bu model için geliştirilecek formülasyon yine Mathematica programıyla kurulacak ve matrislerin eldesi tamamen bilgisayar ortamında otomatize edilecektir. Analitik Model II'dekine benzer şekilde pervanelerin yerleşimi ve ağırlıklarının yalpalama kararsızlığı üzerine etkileri değerlendirilecektir.

**Sayısal Model I**'de MSC/NASTRAN'da SOL 75 (/SOL 145) isimli çözücü ile pervane/nasel aerodinamik ve jiroskopik kuvvetleri hesaplanacaktır. Pervane yalpalama kararsızlığı çözümleri elde etmek için bir ön işlemci kullanılarak ve 2- ve 3-boyutlu olmak üzere iki tane konfigürasyon analiz edilecektir. N-pervaneli elastik kanat konfigürasyonu için literatürde bulunmayan çözümler elde edilecek ve farklı pervane-motor-kanat sistemi konfigürasyonuna göre kararlılık sınırları çizdirilecektir. Ayrıca, proje kapsamında .f06 dosyasının okunmasına yönelik bir kod geliştirilecektir.

**Sayısal Model II** kapsamında pervane yalpalama çarpınma analizleri için hesaplamalı akışkan-yapı etkileşimi yöntemlerine dayanan bir çözüm aracı geliştirilecektir. Dönen pervane için akışkan-yapı etkileşim simülasyon modelleri literatürde mevcut olup (Zhangskanov 2022), pervane yalpalama kararsızlığı özelinde bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu kapsamda akışkan-yapı etkileşimi için PreCICE bağlaşımlı kütüphanesi, akışkan çözücüsü için OpenFOAM, elastik yapı için MBDyn yapısal çözücü kullanılacaktır. Ayrıca ayrı çözücülerin PreCICE ile birlikte çalışmaları ile özel adaptörlere ihtiyaç vardır. Pervane yalpalama kararsızlığını bulmak için pervane uç noktasının zamana bağlı değişimleri elde edilecek, artan-sabit-azalan genlik davranışını yakalanarak çarpınma durumu yakalanacaktır. Kurulacak akışkan-yapı etkileşim simülasyon modeli, herhangi bir kurulum veya bakım ücretine tabii olmadan ve gerektiği zaman yazılımın ihtiyaca göre uyarlanmasına müsaade eden tamamen açık-kaynaklı kodların kullanımını içermektedir.

Son olarak proje kapsamında turboprop, pistonprop, elektrikli pervaneli hava araçlarından, V/STOL tipi hava araçlarına, hem geniş bir yelpazede hava araçları için hem de yeni nesil pervaneleri kapsayan yalpalama çarpınma tahminlerine yönelik aeroelastik çözüm araçları geliştirilecektir. Bu çözüm araçlarına ek olarak, planlanan kapsamlı parametrik çalışmalar ile birlikte proje önerisi, ulusal ve de küresel ölçekte önem arz eden çıktılar üretecektir.

## 1.2. Amaç ve Hedefler

Proje önerisinin amacı ve hedefleri açık, ölçülebilir, gerçekçi ve proje süresince ulaşılabilir nitelikte olacak şekilde yazılır.

Projede, turboprop, pistonprop motorlu hava araçları ile yayılı pervaneli elektrik motorlu sistemlere sahip hava araçları ve V/STOL tarzı geleneksel olmayan hava araçları için pervane yalpalama kararsızlıklarını tahmin edecek, analitik ve sayısal tabanlı modellemelerin kullanılacağı aeroelastik çözüm araçları geliştirilecektir. Öncelikle analitik modellere toplu bir genel bakış için Şekil 3'ten faydalanılabilir.

Analitik model I için pervane-motor idealize sistemi Ribner (1945) ve Houbolt-Reed (1962) pervane aerodinamik yöntemleri kullanılarak analizler gerçekleştirilecektir. İtki üreten pervane etkileri ile sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat düzeltmeleri yapılarak aerodinamik yöntemler güncellenecektir. İlerleme oranı, yunuslama ve sapma yay sabitleri değerleri ve göbek noktasından pivot noktası arasındaki mesafenin yalpalama kararsızlığını üzerinde etkileri incelenecektir.

Analitik Model II'de elastik kanat etkisi dahil edilerek pervane yalpalama analizleri yapılacaktır. Ribner ve Houbolt-Reed pervane aerodinamik yöntemleri itki üreten pervane etkileri ile sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkilerine göre yeniden düzenlenerek kullanılacaktır. Tek-pervaneli ve çoklu-pervaneli elastik kanat konfigürasyonları için hem formülasyon geliştirilecek hem de parametrik çalışmalar yürütülecektir.

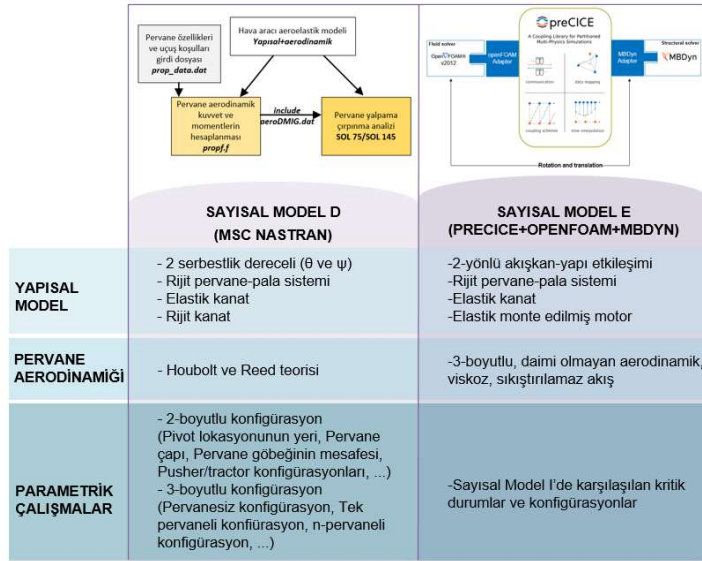
Analitik Model III'te elastik pervane modeli ile VTOL hava araçlarına uygun yalpalama kararsızlık analizleri gerçekleştirilecektir. Aerodinamik şerit teorisi kullanılarak tiltrotorlar için önerilen bu modelin pervane yalpalama kararlılık sınırları elde edilecektir.

Analitik Model V'te ise II ve III'te elde edilen formülasyon elastik kanat ve elastik pervane yaklaşımları özelinde birleştirilerek yeni bir model kurulacaktır. Aerodinamik şerit teorisi kullanılarak pervane yalpalama kararlılık sınırları elde edilecektir. Pervanelerin farklı ağırlık ve yerleşim kombinasyonlarına göre birçok sayıda analiz yapılarak, geniş kapsamlı bir parametrik çalışma yürütülecektir.



	ANALİTİK MODEL I (REED VE BLAND)	ANALİTİK MODEL II (BENNET VE BLAND, XU)	ANALİTİK MODEL III (JOHNSON, KVATERNİK, KUNZ)	ANALİTİK MODEL IV
<b>YAPISAL MODEL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 serbestlik dereceli</li> <li>- Rijit pervane-pala sistemi</li> <li>- Rijit kanat</li> <li>- Elastik monte edilmiş motor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 serbestlik dereceli</li> <li>- Rijit pervane-pala sistemi (<i>n</i>-pervane)</li> <li>- Elastik kanat</li> <li>- Elastik monte edilmiş motor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 serbestlik dereceli</li> <li>- Menteşeli pala-pervane sistemi</li> <li>- Rijit kanada elastik monte motor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4+2 serbestlik dereceli</li> <li>- Menteşeli pala-pervane sistemi</li> <li>- Elastik kanada elastik monte motor</li> </ul>
<b>PERVANE AERODİNAMİĞİ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ribner (1945)</li> <li>- Houbolt ve Reed (1962)</li> <li>- İtki üreten pervane + sıkıştırılabilirlik + sonlu kanat etkileri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ribner (1945)</li> <li>- Houbolt ve Reed (1962)</li> <li>- İtki üreten pervane + sıkıştırılabilirlik + sonlu kanat etkileri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aerodinamik şerit teorisi, Johnson (1975)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aerodinamik şerit teorisi, Johnson (1975)</li> </ul>
<b>PARAMETRİK ÇALIŞMALAR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- İlerleme oranı</li> <li>- Sapma ve yunuslama katılık değerleri</li> <li>- Pervane göbeğinden pivot noktasına olan uzaklık</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tek pervaneli konfig. için farklı ağırlık ve yerleşim kombinasyonları</li> <li>- N-pervaneli konfig. için farklı ağırlık ve yerleşim kombinasyonları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pala geometrik özellikleri</li> <li>- Pylon fiziksel özellikleri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pala geometrik özellikleri</li> <li>- Pylon fiziksel özellikleri</li> </ul>

Şekil 3. Analitik modellerin tanıtımı



Şekil 4. Sayısal modellerin tanıtımı

Projenin ikinci ana amacı pervane yalpalama kararlılık analizleri için sayısal modellerin geliştirilmesidir. İlk olarak Sayısal Model I'de MSC/NASTRAN yazılımı kullanılarak elastik kanat ve rijit pervane yapısal modeli kurulacak ve yalpalama analizleri gerçekleştirilecektir. Pervane matrislerinin hesaplanması için MSC/NASTRAN'ın içinde hazır bulunan bir ön-işlemci program kullanılacaktır. 2-boyutlu ve 3-boyutlu konfigürasyonlar için çeşitli parametrik çalışmalar yürütülecektir.

Projede önerilen Sayısal Model II'de ise dönen 2-boyutlu pervane-motor sistemi ile ve 3-boyutlu pervane-elastik kanat sistemi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinin hesaplamalı yapı dinamiği yöntemleri ile bağlaşımlarını kuran akışkan-yapı etkileşim simülasyonları yapılacaktır. Sayısal modellerin kapsamında detaylar Şekil 4'te verilmiştir.

## 2. YÖNTEM

Projede uygulanacak yöntem ve araştırma teknikleri (veri toplama araçları ve analiz yöntemleri dahil) ilgili literatüre atıf yapılarak açıklanır. Yöntem ve tekniklerin projede öngörülen amaç ve hedeflere ulaşmaya elverişli olduğu ortaya konulur.

Yöntem bölümünün araştırmanın tasarımını, bağımlı ve bağımsız değişkenleri ve istatistiksel yöntemleri kapsamı gerekir. Proje önerisinde herhangi bir ön çalışma veya fizibilite yapıldıysa bunların sunulması beklenir. Yöntemlerin iş paketleri ile ilişkilendirilmesi gerekir.

Projede, pervane yalpalama çarpınmasını tahmin etmek için literatürde mevcut bazı analitik ve sayısal modellerin genişletilmesi ve yeni modellerin kurulması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, proje süresince geliştirilmesi amaçlanan dört analitik ve iki sayısal modeli içeren aeroelastik çözüm araçları, günümüz konseptlerini içeren geniş bir yelpazede hava aracı tipleri için pervane yalpalama kararsızlıklarını tahmin edecek kabiliyette olacaktır. Basitten karmaşığa doğru sıralanan bu modeller ile hava aracının ön tasarım aşamasında düşük doğruluklu yalpalama tahmininden, daha ileri tasarım aşamalarında kullanılmak üzere yüksek doğruluklu tahminler elde edilebilecektir.

Analitik modeller, pervane yalpalama kararsızlığı olayının yalın bir matematik modelini kurarak fiziksel öngörü elde etmek önemli fayda sağlamaktadır. Belirli kabuller altında hareketi yöneten denklem sistemi elde edildikten sonra,

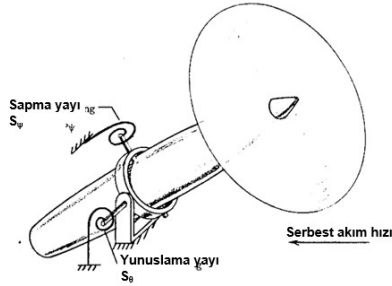
pervane-kanat-motor sistemine ait birçok farklı geometrik, fiziksel ve mekanik parametrelerin yalpalama kararsızlığına etkisi incelenebilmektedir. Aynı zamanda analitik modeller sayesinde, hava aracı tasarımının ilk aşamalarında, örnek olarak yayılı pervanelere sahip bir kanat analizi için birden fazla pervanenin sistematik olarak eklenmesine izin veren bir analitik araç kullanılarak tasarımın seyrini yönlendirecek ve gerekirse değiştirecek oldukça kritik çıktılar sağlanabilmektedir. Ancak analitik yöntemler, sınırlı serbestlik dereceleri, görece basit geometrilere uygulanabilir olmaları ve pervane aerodinamiği ile ilgili belli varsayımları kullanmaları sebebiyle daha yüksek doğrulukta çözümler elde etmek için sayısal yöntemlerin kullanıldığı araçlara başvurulmaktadır. Sonuç olarak, hava aracının nihai tasarımı geliştikçe, yalpalama çırpınma marjının uçuş zarfı içindeki herhangi bir uçuş koşulu için yeterli olmasını sağlamak amacıyla daha rafine tekniklerin kullanılması gerekmektedir.

Projede geliştirilecek dört analitik model ve iki sayısal model için izlenecek yöntem aşağıda açıklanmıştır. Dört analitik modelden ilk ikisi pervane tahrikli hava araçlarının yalpalama kararsızlıklarının tahmini için uygun, üçüncü olarak analitik model ise VTOL tipi dikey iniş/kalkış yapabilen hava araçları için kullanılabilecek bir modeldir. Dördüncü model ise bu üç modelin birleştirilmesi ve genişletilmesi işe oluşturulacak tamamiyle özgün bir modeldir.

Not olarak, proje kapsamında önerilen analitik ve sayısal modeller için örnek pervane-kanat-motor konfigürasyonlarının ilgili parametreleri örnek problemin sunulduğu çalışmalardan alınacaktır.

#### İŞ PAKETİ 1: ANALİTİK MODEL İN OLUŞTURULMASI

Analitik Model 1'in kurulması projedeki ilk iş paketidir. Bu kapsamda, pervane tahrikli motorlara sahip uçakların yalpalama kararsızlıklarının çözümü için literatürde yer alan Reed ve Bland (1961)'in çalışmasından faydalanılacaktır. Reed ve Bland'ın bu çalışmasında Şekil 5'te verildiği gibi pervane ekseninin dikey (yunuslama) düzlemde ve yatay (sapma) düzlemde açılabilir saptmalarına izin verecek şekilde esnek monte edilen rijit bir motor-pervane kombinasyonunun dinamik aeroelastik kararlılıkları analiz edilmiştir. Proje kapsamındaki ilk iş paketinde literatürdeki bu model mevcut hali kullanılacağı gibi pervane aerodinamik yöntemleri, literatürde yer almayan eklemeler ve düzeltmeler ile desteklenecektir. Yöntemlere yapılacak güncellemeler pervane aerodinamik modeli bölümünde detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 5. Pervane-motor sistemi şematik gösterimi, (Reed ve Bland 1961)'dan uyarlanmıştır.

**Yapısal Model:** Bu modelde, pervane disk,  $\Omega$  açılabilir hızı ile dönmekte olup rijit kabul edilerek, palaların elastik etkisi dikkate alınmamıştır. Turbo pervaneli, piston-pervaneli ve elektrik-pervaneli motorlu sabit kanatlı hava araçlarının yalpalama kararsızlıklarının hesaplanması için ön tasarım aşamasında kullanılabilecek başlangıç seviyesi bir modeldir. Pratikte düşük açıklık oranına sahip pervanelerin kullanıldığı sabit kanatlı hava araçlarında palaların esnemesi ihmal edilebilmektedir. Bunun yanında helikopter gibi yüksek açıklık oranına sahip palaların kullanıldığı hava araçlarında pervane sisteminde palaların etkisini hesaba katmak gerekmektedir ve bu sebeple bu model döner kanatlı hava araçlarının yalpalama kararsızlıklarını tahmin etmede yetersiz kalmaktadır. Reed ve Bland'ın (1961) modeli yukarıda ifade edilen sistemin çözümlemesini sunmaktadır. Pervane-motor sisteminin hareketini ifade etmek için sistemin kinetik ve potansiyel enerjisi ile sönüm sebebiyle ortaya çıkan enerji kayb ifadeleri yazılır (Reed ve Bland 1961).

$$T = \frac{1}{2} I_x (\Omega^2 + 2\Omega\dot{\psi}) + \frac{1}{2} I_y (\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2)$$

$$U = \frac{1}{2} S_\theta \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} S_\psi \dot{\psi}^2$$

$$D = \frac{1}{2} \frac{S_\theta g_\theta}{\omega} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \frac{S_\psi g_\psi}{\omega} \dot{\psi}^2$$

Burada,  $\theta$  yunuslama açısı ve  $\psi$  sapma açısıdır. Bu sistemin x-eksenine göre atalet momenti  $I_x$ , y-eksenine göre  $I_y$ 'dir.  $S_\theta$  ve  $S_\psi$  sırasıyla yunuslama ve sapma doğrultusundaki yay sabitleridir.

$g_\theta$  ve  $g_\psi$  sönüm oranlarıdır. Son olarak, yunuslama hız oranı  $\dot{\theta}$ , sapma hız oranı  $\dot{\psi}$ , pervane dönüş hızı  $\Omega$  ve sistemin frekansı  $\omega$ 'dır.

$g_\theta$  ve  $g_\psi$  sönüm oranlarıdır. Son olarak, yunuslama hız oranı  $\dot{\theta}$ , sapma hız oranı  $\dot{\psi}$ , pervane dönüş hızı  $\Omega$  ve sistemin frekansı  $\omega$ 'dır.

$g_\theta$  ve  $g_\psi$  sönüm oranlarıdır. Son olarak, yunuslama hız oranı  $\dot{\theta}$ , sapma hız oranı  $\dot{\psi}$ , pervane dönüş hızı  $\Omega$  ve sistemin frekansı  $\omega$ 'dır.

$g_\theta$  ve  $g_\psi$  sönüm oranlarıdır. Son olarak, yunuslama hız oranı  $\dot{\theta}$ , sapma hız oranı  $\dot{\psi}$ , pervane dönüş hızı  $\Omega$  ve sistemin frekansı  $\omega$ 'dır.

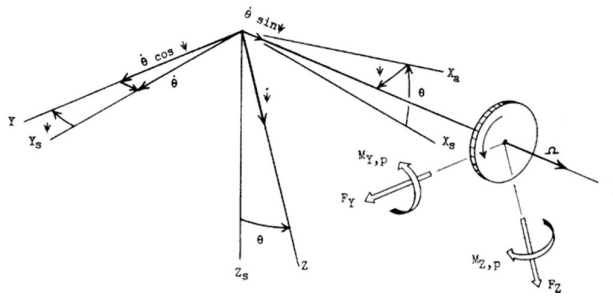
$g_\theta$  ve  $g_\psi$  sönüm oranlarıdır. Son olarak, yunuslama hız oranı  $\dot{\theta}$ , sapma hız oranı  $\dot{\psi}$ , pervane dönüş hızı  $\Omega$  ve sistemin frekansı  $\omega$ 'dır.

Lagrange Denklemleri yardımıyla  $\psi$  ve  $\theta$  serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi elde edilir (Meirovitch 2010)

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k \quad k = 1, 2, \dots, n$$

Burada, Lagrangian  $L=T-U$  (kinetik enerji – potansiyel enerji) olarak ifade edilir.  $Q_k$  genelleştirilmiş kuvvet terimidir.

**Pervane aerodinamik modeli:** Yalpalama kararsızlık analizlerinde jiroskopik hareketler nedeniyle ortaya çıkan düzlem içi pervane aerodinamik kuvvetlerinin ve momentlerinin hesaplanması gerekmektedir. Yunuslama/sapma açılabilir deformasyon ve hız oranlarına göre aerodinamik türevler cinsinden ifade edilen aerodinamik kuvvetler ve momentler belirli konfigürasyonlar için rüzgar tüneli testlerinden (Bennet ve Bland 1963) elde edilebileceği gibi analitik yaklaşımlar kullanılarak da elde edilmektedir. Proje kurgusu içinde deneysel bir çalışmaya yer verilmemiş olup, bu analitik model için aerodinamik türevlerin hesabı iki farklı analitik yöntem ile yapılacaktır. Bu yöntemlerden ilki Ribner (1945) tarafından diğeri ise Houbolt ve Reed (1962) tarafından geliştirilmiştir. Her iki yöntem de şerit teorisini (strip theory) kullanarak sanki-daimi (quasi-steady) aerodinamik yaklaşımla bir pervanede oluşan aerodinamik yüklemeyi hesaplamaktadır. Benzer aerodinamik yaklaşımlar kullanılmakla birlikte, temel farklılıkları aerodinamik türevlerin hesaplanmasındadır.



Şekil 6. Koordinat sistemi ve Euler açıları (Reed ve Bland 1961).

Pervane sisteminin hareketi Şekil 6'da verilmiştir.  $X_s$ ,  $Y_s$  ve  $Z_s$ -eksen takımı, merkezi gimbal noktasında ve  $X$ -,  $Y$ - ve  $Z$ -eksenleri ise güç ünitesi (powerplant) ile yunuslama ve sapma açısı yapar. Referans koordinat sisteminin yere sabitlenmiş koordinat sistemine göre yönelmesini ilişkilendiren Euler açıları yunuslama açısı  $\theta$  ve sapma açısı  $\psi$ 'dir. Bu sistemin toplam açısal hızı, yunuslama oranı  $\dot{\theta}$ , sapma oranı  $\dot{\psi}$  ve pervane dönüş hızı  $\Omega$  olmak üzere 3 vektörel bileşene sahiptir.

Şekil 6'da verilen pervane sistemine göre yunuslama ve sapma eksenlerinde oluşan aerodinamik kuvvetler ve bu eksenler etrafındaki aerodinamik momentler aşağıdaki şekilde ifade edilir (Xu 2020).

$$F_Z = \frac{1}{2} \rho V^2 S \left( C_{Z_\theta} \bar{\theta} + C_{Z_\psi} \bar{\psi} + C_{Z_q} \frac{\dot{\theta} R}{V} + C_{Z_r} \frac{\dot{\psi} R}{V} \right) \quad (5a)$$

$$M_{Y,p} = \rho V^2 S R \left( C_{m_\theta} \bar{\theta} + C_{m_\psi} \bar{\psi} + C_{m_q} \frac{\dot{\theta} R}{V} + C_{m_r} \frac{\dot{\psi} R}{V} \right) \quad (5b)$$

$$F_Y = \frac{1}{2} \rho V^2 S \left( C_{Y_\theta} \bar{\theta} + C_{Y_\psi} \bar{\psi} + C_{Y_q} \frac{\dot{\theta} R}{V} + C_{Y_r} \frac{\dot{\psi} R}{V} \right) \quad (5c)$$

$$M_{Z,p} = \rho V^2 S R \left( C_{n_\theta} \bar{\theta} + C_{n_\psi} \bar{\psi} + C_{n_q} \frac{\dot{\theta} R}{V} + C_{n_r} \frac{\dot{\psi} R}{V} \right) \quad (5d)$$

Denklem (5a)-5(d)'de  $\rho$  hava yoğunluğu,  $V$  serbest akım hızı,  $S$  pervane disk alanı,  $R$  pervane hub yarıçapını sembolize etmektedir.

$\bar{\theta} = \theta - \frac{l \dot{\theta}}{V}$  ve  $\bar{\psi} = \psi - \frac{l \dot{\psi}}{V}$  efektif yunuslama ve sapma açılarıdır.  $F_Y$  ve  $F_Z$  aerodinamik kuvvetleri;  $M_{Y,p}$  ve  $M_{Z,p}$  ise moment terimlerini göstermektedir.

Şekil 6'da gösterilen gimbal merkezine göre pervaneye etki eden yunuslama ve sapma aerodinamik momentleri ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} M_Y &= M_{Y,p} + l F_Z \\ M_Z &= M_{Z,p} + l F_Y \end{aligned} \quad (6)$$

Burada,  $l$  gimbal ekseninden pervane düzlemine olan mesafedir. Altsimge  $P$  pervaneye ait büyüklükleri,  $Y$  ve  $Z$  ise  $Y$  ve  $Z$  eksenlerindeki büyüklükleri ifade etmektedir. Burada verilen aerodinamik kuvvet ve moment ifadeleri Ribner (1945) ve Houbolt ve Reed (1962) yöntemleri için geçerli olup Analitik Model I ve II ile Sayısal Model I'in hareket denklemlerinde eşitliğin sağ tarafında uygun formda kullanılacaktır. Ribner ve Houbolt-Reed yöntemleri Denklem 5(a)-5(d)'da gösterilen  $C_{Z_\theta}$ ,  $C_{Y_\theta}$ ,  $C_{Y_q}$ ,  $C_{Y_r}$ ,  $C_{m_\theta}$ ,  $C_{m_\psi}$ ,  $C_{m_q}$ ,  $C_{m_r}$  ve karşılıkları  $C_{Y_\psi}$ ,  $C_{Z_\psi}$ ,  $C_{Z_r}$ ,  $C_{Z_q}$ ,  $C_{n_\psi}$ ,  $C_{n_\theta}$ ,  $C_{n_r}$ ,  $C_{n_q}$  aerodinamik türevlerini analitik olarak elde etmek için üretilmiştir. İki yöntemin kullandığı yaklaşımlar benzer olsa da temel farklılıkları yukarıdaki aerodinamik türevlerin elde edilmesindedir. Ribner'in yönteminde, iz etkilerinden dolayı ortaya çıkan pervane aerodinamik türevlerini hesaplamak için ifadeler yer almazken, Houbolt-Reed'in yöntemi, iz etkilerini dâhil ederek pervane aerodinamik türevlerinin tam setini hesaplamaya yönelik ifadeler içermektedir. Ayrıca Ribner'in teorisinde faz farkından kaynaklı gecikmeler hesaba katılmaz. Ek olarak, Bennetts ve Bland (1964) belirli bir pervane sistemi konfigürasyonu için rüzgâr tüneli testleriyle pervane türevlerini deneysel olarak elde etmiş ve Ribner ve Houbolt-Reed'in yöntemi ile kıyasladığında iki yöntemin de deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu gösterilmiştir. Aynı zamanda, bu çalışmada, bazı aerodinamik türevler özelinde Houbolt-Reed yönteminin Ribner'den daha iyi sonuç verdiği de gösterilmiştir. Ayrıca Houbolt-Reed'in yöntemi, havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan MSC/NASTRAN programının pervane aerodinamik terimlerinin hesaplanması için kullanılmaktadır.

Bu iş paketi kapsamında her iki yöntem de öncelikle literatürdeki mevcut halleri ile uygulanacaktır. Yöntemlerin literatürdeki mevcut hallerinde, pervanenin itki üretmediği, sadece hava akımının pervaneye döndürdüğü (windmilling) durum ele alınmaktadır ve ayrıca sıkıştırılabilir akış ile sonlu kanat için ilgili düzeltmeleri içermeyen klasik yaklaşımlardır. Pervane yalpalaması tahmininde pervane itkisinin aerodinamik kuvvet ve moment ifadelerine eklenerek modellenmesi yüksek hızlarda, yüksek itkiye sahip motor konfigürasyonlarda doğru bir tahmin yapılabilmesini sağlayacaktır. Bu yöntemler aşağıda detayları verilen durumlar için genişletilecektir.

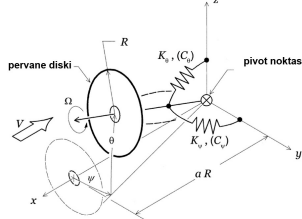
#### **Pervanenin itki ürettiği durum**

Pervane yalpalama çırpınması üzerine yapılan ilk çalışmalarda, yüksek hızlı uçuş koşulları altında geleneksel rijit pervaneler için pervane itki kuvvetinin yalpalama çırpınma kararlılığı üzerinde nispeten küçük bir etkiye sahip olduğu kabul edilmiş ve pervane itki katsayısı  $C_T = 0$  sıfır alınmıştır (Reed ve Bland 1961, Bennett ve Bland 1964, Hoover vd. 2017, Xu 2020, Böhnisch vd. 2022). Bu sayede, itki üreten pervaneler yerine, pervaneye sadece rüzgârın döndürdüğü koşulun, yani pervane yerine eşdeğer rüzgâr değirmeni modelinin kullanılması mümkün olmuş, rüzgâr tüneli modellerinin inşası ve test edilmesini büyük ölçüde kolaylaştırmıştır (Reed 1967). Ancak ilerleyen zamanlarda bu durumun pervane yalpalama çırpınması üzerinde etkisi olduğunu, özellikle düşük hızlı yüksek itmeli uçuşta itki kuvvetinin pervane türevlerinde büyük sapmalara neden olduğu gösterilmiştir (Ravera 1963).

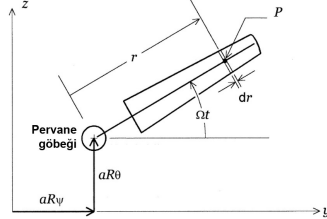


Projede, Ribner ve Houbolt-Reed yöntemleriyle elde edilecek aerodinamik türev ifadeleri, pervane itki katsayısı ifadesinin de hesaba katılacağı şekilde yeniden türetilenlerdir. Pervanenin itki ürettiği durumun modellenmesi için uygulanacak işlemler Ribner ve Houbolt-Reed yöntemleri için benzer olacaktır. Projenin özgün kısımlarından biri olan bu durumun nasıl gerçekleştirileceği aşağıda kısaca açıklanmıştır. Bu kısım aynı zamanda Denklem 5(a)-5(d)'de verilen aerodinamik kuvvet ve moment ifadelerin çıkarımını da içermektedir.

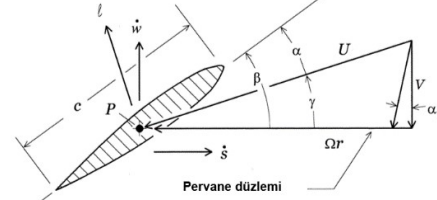
Şekil 7'de,  $R$  yarıçaplı bir pervaneye  $aR$  uzaklıkta bir dönme noktasına sahip bir pervane ele alınmıştır.  $\theta$  yunuslama açısıyla ve  $\psi$  sapma açısıyla eğilen pervane, dönüş noktasında yunuslama ve sapma yönünde elastik yaylar ( $K_\theta, K_\psi$ ) ve sönüm elemanları ( $C_\theta, C_\psi$ ) ile desteklenmiştir (Bielawa 2006).



Şekil 7. Pervane sisteminin temel özellikleri (Bielawa 2006)



Şekil 8. Yer değiştirmiş pervane göbeğinin önden görünüşü (Bielawa 2006)



Şekil 9. Tipik kesitteki hava hızı bileşenleri (Bielawa 2006)

Pervanenin yunuslama ve sapma hareketlerinden kaynaklanan aerodinamik bozuntuları (perturbation) hesaba katmak için üç temel büyüklük kullanılacaktır; bunlar yerel geometrik hücum açısı değişimi ( $\alpha_1$ ), pervane düzlemindeki ve pervane düzlemi dışındaki bozuntu hızları  $\dot{s}$  ve  $\dot{w}$ 'dir. Küçük deplasman kabulü yapılarak, pervanenin ön tarafından bakıldığında, Şekil 8'de,  $\Omega t$  azimut açısında palanın göbekten  $r$  mesafe ötedeki açıklık konumunun koordinatları aşağıdaki şekilde bulunmaktadır (Bielawa 2006):

$$x = w = -\psi r \cos(\Omega t) - \theta r \sin(\Omega t) \quad (7)$$

$$y = aR_\psi + r \cos(\Omega t) \quad (8)$$

$$z = aR_\theta + r \sin(\Omega t) \quad (9)$$

Yunuslama ve sapmaya göre geometrik hücum açısı ise aşağıdaki şekilde ifade edilir (Bielawa 2006):

$$\alpha_1 = \psi \sin(\Omega t) - \theta \cos(\Omega t) \quad (10)$$

Bunun yanında, pala profili ile ilgili geometrik özellikler ve pala hızı teğet ve dik bileşenleri Şekil 9'da gösterilmektedir. Burada gösterilen ( $\dot{s}$ ) ve ( $\dot{w}$ ) bozuntu hızlarının ifadesi şu şekildedir (Bielawa 2006):

$$\dot{s} = aR[\dot{\theta} \cos(\Omega t) - \dot{\psi} \sin(\Omega t)] \quad (11)$$

$$\dot{w} = -r[\dot{\psi} \cos(\Omega t) + \dot{\theta} \sin(\Omega t)] \quad (12)$$

Şekil 7 ve 8'de gösterilen büyüklükler kullanılarak kanat kesitindeki hızın teğet ve dik bileşenleri aşağıdaki şekilde verilmektedir (Bielawa 2006):

$$U_T = \Omega r + \dot{s} + V \sin(\alpha_1) \quad (13a)$$

$$U_D = \dot{w} + V \cos(\alpha_1) \quad (13b)$$

Şekil 8'de palanın verilen konumu için hız ifadesinin  $U^2 = \Omega^2 r^2 + V^2$  olduğu not edilmelidir. Buna göre profil kesitindeki taşıma kuvveti, etkin dinamik basınç ve kesit hücum açısı cinsinden ifade edilebilir:

$$l = \frac{1}{2} \rho \frac{(U_T^2 + U_D^2)}{U_e^2} c_l c \quad (14)$$

Burada efektif hızın karesi, Denklem (13a) ve (13b)'deki ifadelerin karesi alınarak elde edilir. Bozuntu hız ifadelerinin çarpımlarını içeren yüksek mertebe terimleri (YMT) ihmal edilmektedir (Bielawa 2006):

$$U_e^2 = \frac{\Omega^2 r^2 + V^2}{U^2} + 2\Omega r \dot{s} + 2V \dot{w} + 2\Omega r V \alpha_1 + YMT \quad (15)$$

Denklem (14) ile verilen kesit taşıma kuvveti ifadesindeki taşıma katsayısı  $c_l = c_{l\alpha} \alpha$  taşıma eğrisi eğimi ile efektif hücum açısının  $\alpha$  çarpımıyla elde edilir. Efektif hücum açısı ifadesi Şekil 9'da gösterildiği şekilde  $\alpha = \beta - \gamma$  değerindedir. Ayrıca yine Şekil 9'dan  $\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{U_D}{U_T} \right)$  olduğu görülebilir. Bu açı ifadesi, bozuntu hız bileşenleri ayrı vektörel bileşenler olacak şekilde düşünülürse aşağıdaki şekle sadeleştirilebilir (Bielawa 2006):

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{V}{\Omega r} \right) + \frac{\Omega r}{V^2 + \Omega^2 r^2} \dot{w} - \frac{V}{V^2 + \Omega^2 r^2} \dot{s} - \frac{V^2}{V^2 + \Omega^2 r^2} \alpha_1 \quad (16)$$

Bu ifadede yer alan  $\frac{V}{\Omega r}$  terimi, pervane ilerleme oranı  $J$ 'yi ifade etmektedir,  $\frac{J}{\pi} = \frac{V}{\Omega r}$ . Yine bu ifade ile efektif hücum açısı

ve efektif hızın karesi ifadesi taşıma kuvvetinde yerine yazılırsa (Bielawa 2006):

$$l = \frac{1}{2} \rho c_{l\alpha} c (\Omega^2 r^2 + V^2 + 2\Omega r \dot{s} + 2V\dot{w} + 2\Omega r V \alpha_1) \left[ \underbrace{\beta - \tan^{-1}\left(\frac{V}{\Omega r}\right)}_{\alpha_0} - \frac{\Omega r}{U^2} \dot{w} + \frac{V}{U^2} \dot{s} + \frac{V^2}{U^2} \alpha_1 \right] \quad (17a)$$

Denklem (17a)'da verilen kesit taşıma kuvveti ifadesi yalnızca doğrusal terimler dikkate alınacak şekilde aşağıda verilen Denklem (17b)'deki gibi düzenlenir (Bielawa 2006, Xu 2020):

$$l = \frac{1}{2} \rho c_{l\alpha} c U^2 \left[ \alpha_0 - \frac{\Omega r}{U^2} \dot{w} \left( 1 - \frac{2V}{\Omega r} \alpha_0 \right) + \frac{V}{U^2} \dot{s} \left( 1 + \frac{2\Omega r}{V} \alpha_0 \right) + \frac{V^2}{U^2} \left( 1 + \frac{2\Omega r}{V} \alpha_0 \right) \alpha_1 \right] \quad (17b)$$

Yukarıdaki ifadede sadece  $\alpha_0$ 'a bağlı ilk terim daimi ve kalan terimler de daimi olmayan taşıma terimlerini belirtmektedir. İtki üretmeyen bir pervane için  $\alpha_0 = 0$  kabulü yapılarak palalara gelen aerodinamik kuvvetlerin ve momentlerin ifadeleri çıkarılmıştır. Bu ifadeler Denklem 5(a)-5(d)'de verilmektedir. Proje kapsamında itki üreten bir pervane için  $\alpha_0 \neq 0$  alınarak yeniden çıkarım yapılacaktır. Bu şekilde, itki üreten pervane için itki katsayısı elde edilecektir.

#### **Sıkıştırılabilirlik ve Sonlu-Kanat Etkileri**

Denklem (17b)'de verilen kesit taşıma kuvveti ifadesinde  $c_l = c_{l\alpha} \alpha$  ifadesinde yer alan taşıma eğrisi eğimi  $c_{l\alpha} = \frac{dc_l}{d\alpha}$ , sıkıştırılamaz ve sonsuz kanat için  $2\pi$  alınmaktadır. Sonlu-kanadın sıkıştırılabilirlik etiklerini hesaba katmak için Denklem (18)'deki  $c_{l\alpha}$  ifadesi aşağıdaki şekilde değiştirilecektir:

$$c_{l\alpha} = \frac{dc_l}{d\alpha} = \frac{a_0}{1 + \frac{a_0}{\pi AR}} \quad (18)$$

açıklık oranı düzeltmesi

Burada,  $a_0$  ile sembolize edilen büyüklük teorik taşıma eğrisi eğimidir ve  $2\pi$ 'ye eşittir. Görüldüğü gibi bu ifade taşıma eğrisi eğimi ifadesine paydada verilen açıklık oranı  $AR$  ile sonlu kanat etkileri düzeltmesi eklenmiştir. Daha sonra yaygın kullanılan bir yaklaşım olan Prandtl-Glauert Mach sayısı düzeltmesi ile sıkıştırılabilir akış açıklık oranı düzeltmesi yapılacaktır (Bisplinghoff 1983):

Prandtl-Glauert Mach sayısı düzeltmesi:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - M^2}}$$

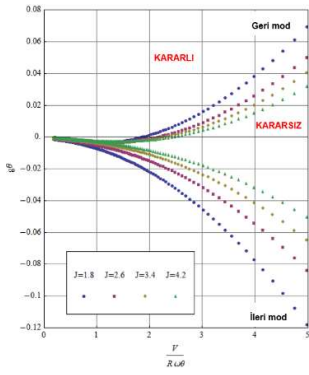
Not olarak, burada kullanılacak Mach sayısı palaya gelen bileşke Mach sayısıdır ve serbest akım hızı Mach sayısına bağlı olarak tekrar düzenlenecektir. Prandtl-Glauert Mach sayısı düzeltmesi basitçe  $c_{l\alpha}$  terimindeki teorik taşıma eğrisi eğimi terimi ile çarpılarak yapılmaktadır (Bisplinghoff 1983):

$$c_{l\alpha} = \frac{dc_l}{d\alpha} = \frac{\frac{a_0}{\sqrt{1 - M^2}}}{1 + \frac{\frac{a_0}{\sqrt{1 - M^2}}}{\pi AR}} \quad (19)$$

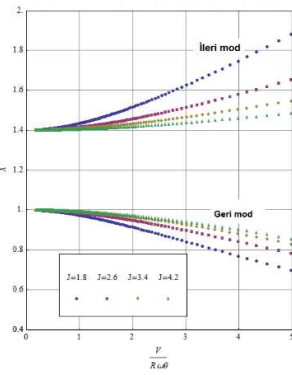
Ribner ve Houbolt-Reed yöntemlerinin ikisi için de taşıma eğimini ifade eden  $c_{l\alpha}$  terimi yukarıda aktarıldığı gibi düzeltmeler ile yeniden formüle edilecektir. Bu şekilde aerodinamik türev ifadeleri güncellenerek analizler tekrarlanacak ve yapılan düzeltmenin sonuçlara etkisi değerlendirilecektir.

Yukarıda kısaca açıklandığı şekilde Ribner ve Houbolt-Reed'in yöntemleri itki üreten pervane ve sonlu-kanat ve sıkıştırılabilirlik etkilerinin düzeltmeleri ile desteklenerek yeniden formüle edildikten sonra her iki yöntemin sonuçları birbirleri ile karşılaştırılacaktır. Bunun yanında projenin özgünlüğü arasında yer alan itki üreten pervane etkilerinin incelemesi ilk olarak bu modelde yapılacaktır. Proje kapsamında sunulan en yalın yalpalama modeli olan bu modelde Ribner ve Houbolt-Reed'in aerodinamik yöntemlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi uygun olacaktır. Pervanenin itki ürettiği ve üretmediği durumlar ( $c_t \neq 0$  ve  $c_t = 0$ ) ile sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat (açıklık oranı) etkileri dikkate alındığı ve ihmal edildiği durumlar için karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilecektir.

**Çözüm yöntemi:** Reed ve Bland (1961) modelinde aerodinamik kuvvetler elde edildikten sonra hareket denklemlerinde yerine yazılarak ve tipik çarpınma analizindeki V-g grafiklerine karşılık gelen hıza göre sönüm grafikleri çizdirilerek çarpınma sınırları elde edilmektedir. Burada nötral kararlılık için gereken sönüm miktarının sıfır olduğu nokta pervane yalpalama kararsızlığı başlangıcı olarak kabul edilir ve sönümün sıfır olduğu noktaya karşılık gelen indirgenmiş frekans değeri okunur. Bu şekilde analizler gerçekleştirilerek pervane yalpalama çarpınma sınırları bulunacaktır. Bu modelin literatürde yer alan versiyonu için Ribner aerodinamik yöntemi kullanılarak belirli bir konfigürasyon için ve kararlılık sınırları elde edilmiştir. Ön çalışma sonucu olan grafikler Şekil 10 ve 11'de verilmiştir (Yıldız vd. 2023).



Şekil 10. Sönümün indirgenmiş frekansa göre değişimi



Şekil 11. Frekansın indirgenmiş frekansa göre değişimi

Şekil 10'da sönümün sıfır olduğu nokta pervane girdap kararsızlığının başlangıcı olarak kabul edilmektedir. Bu grafikte aynı zamanda ilerleme oranı,  $J$ 'nin girdap kararlılığı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Yüksek ilerleme oranı değerlerinde, girdap kararsızlığının daha yüksek indirgenmiş frekanslarda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında ileri ve geri yalpalama modlarının indirgenmiş frekans ile değişimleri Şekil 11'de verilmiştir. Not olarak bu modelde pervane aerodinamik türevlerinin hesabı için Ribner yöntemi kullanılmıştır. Ribner yönteminde yüksek mertebe aerodinamik türev ifadeleri ihmal edilerek sadeleştirilmiş bir yaklaşım ele alınmıştır. Bu yöntemde itki üreten pervane yaklaşımı ile sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkileri dahil edilmemiştir (Yıldız vd. 2023).

**Parametrik çalışmalar:** Analitik Model I kapsamında yürütülecek parametrik çalışmaların öncesinde, temeli Reed ve Bland (1961)'in çalışmasına dayanan modelin doğrulaması yukarıda verilen grafiklerde gösterildiği üzere tamamlanmıştır. Burada kullanılan Ribner'in aerodinamik modelidir. Aerodinamik türevlerin hesabında farklı bir yaklaşım öneren daha kapsamlı Houbolt ve Reed'in yaklaşımı ile çözümler elde edilecektir. Her iki aerodinamik yöntem ile formülasyon ve çözümlerin tamamlanmasının ardından yalpalama kararsızlık hızının ve frekansının aşağıda verilen durumlar için değişimi incelenecektir.

- Ribner ve Houbolt-Reed yöntemlerinin karşılaştırılması
- İlerleme oranı, sapma katılık ve yunuslama katılık değerleri
- Pervane göbeğinden pivot (destek) noktasına olan uzaklık
- İtki üreten pervane etkileri
- Sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkileri dikkate alınarak hesaplanması

Bu iş paketinin en önemli çıktısı ise Ribner ve Houbolt-Reed aerodinamik yöntemlerinin ilk olarak bu modelde formüle edilecek olmasıdır. Bu yöntemlerin itki üreten pervane etkisi ile sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkilerinin dahil edecek şekilde güncellenmesiyle yalpalama çarpınma analizleri gerçekleştirilecektir. İtki üreten pervane etkilerinin yalpalama analizinde incelenmesi özellikle yeni nesil hava aracı tasarımları için kritik öneme sahip, aynı zamanda literatür için özgün bir faaliyet olacaktır. Ayrıca, bu etkilerin, öncelikle Analitik Model I gibi yalın bir modelde değerlendirilmesi daha kolay olacaktır. İş paketinin diğer bir önemli çıktısı ise bu modeli kullanarak oldukça geniş bir parametre aralığında yalpalama analizleri gerçekleştirilmesidir. Analitik Model I, pervane yalpalama çarpınması olayının basitleştirilmiş bir matematiksel modeli olmakla birlikte özellikle ön tasarım aşamasındaki pervaneli hava aracı için tasarımın seyrini yönlendirmede faydalı olacaktır. Diğer yandan, oldukça izole olan bu model, gerçek uçak konfigürasyonlarının aksine, motorun üzerine monte edildiği kanat yapısını rijit kabul ederek, kanada bitişik pervanenin neden olduğu aerodinamik girişim etkileri göz ardı etmektedir. Aynı zamanda pervane rotoru,  $N_p > 2$  palli bir rotor olarak basitleştirilmiş, ayrıca dönen parçaların kinetik enerjisi ihmal edilmiştir. Bahsedildiği gibi ön tasarım aşamasında bu modelden elde edilecek çıktılar faydalı olsa da yapılan kabullerin daha gerçekçi durumlar için geliştirilmesi gereklidir. Bu iş paketinden sorumlu ekip yürütücü Doç.Dr. Seher Eken ve 2 yüksek lisan bursiyeri kapsamaktadır. İş paketinin dört aylık bir süre içinde tamamlanacağı öngörülmüştür.

## İŞ PAKETİ 2: ANALİTİK MODEL II'NİN OLUŞTURULMASI

Proje kapsamındaki ikinci iş paketi Analitik Model II'nin kurulması ve ilgili analizlerin gerçekleştirilmesi faaliyetlerini içermektedir. Bu kapsamda izlenecek yöntem ve detayları aşağıda verilmiştir.

Bu modelde rijit kanat yerine elastik kanat kabulü ile daha gerçekçi bir yaklaşım sunulacaktır. Bu sayede, hem kanadın esnekliğinin yalpalama kararsızlığına olan etkisini incelemek mümkün olacak, hem de pervane ile elastik kanat etkileşiminin sebep olduğu değişimler kapsamlı bir şekilde değerlendirilecektir. Böylece, esnek kanat ve pervanenin birlikte modellenmesi ile her iki sistemin dinamik bağlantısı kurularak daha yüksek doğrulukta yalpalama kararsızlığı tahminleri yapılacaktır. İlk olarak Bennett ve Bland (1964) tarafından önerilen ve Xu (2020) tarafından kullanılan ve geliştirilen bu modelde pervaneye etkiyen aerodinamik kuvvetlerin hesabı için Analitik Model I'de olduğu gibi Ribner ve Houbolt-Reed'in yöntemler kullanılacaktır.

**Yapısal model:** Analitik Model II'de kullanılacak yapısal modelin Analitik Model I ile arasındaki fark temelde sadece kanat yapısının rijit yerine elastik olarak değiştirilmesidir. Ancak önerilen bu değişikliğin uygulanması ifade edildiği kadar kolay olmayıp, ilk modele köklü değişiklikler yapılması gereklidir.

Analitik Model II, Bennett ve Bland (1964) modeline benzer olarak tasarlanmıştır. Ankastre esnek kanat, bir Euler-Bernoulli kiriş modeli ile temsil edilmiştir. Kanada bir pervanenin dâhil edilmesi, pervane kütlesi ve jiroskopik etkiler nedeniyle kanat yapısal modeline ekstra kütle ve atalet terimleri eklenmiştir. Pervanenin kanat üzerindeki aerodinamik etkisi, kanadın serbestlik derecelerine etkiyen kuvvetler ve momentlere eklenerek modellenmiştir. Bu model için pervaneli ankastre kanadın geometrisi ile modelin kinematik büyüklüklerinin şematik gösterimi Şekil 12'de verilmiştir.

Bu modelde pivot noktasından elastik olarak monte edilmiş motorun yunuslama ve sapma elastik dereceleri ile elastik bir kiriş olarak modellenen kanadın eğilme ve burulma serbestlik dereceleri olmak üzere toplam dört serbestlik derecesi vardır. Sistemin kinetik ve potansiyel enerji ifadeleri ile sönüm sebebiyle kaybolan enerji ifadesi yazılır. Şekil 12'de verilen sistemin kinetik, potansiyel ve sönüm ifadeleri:

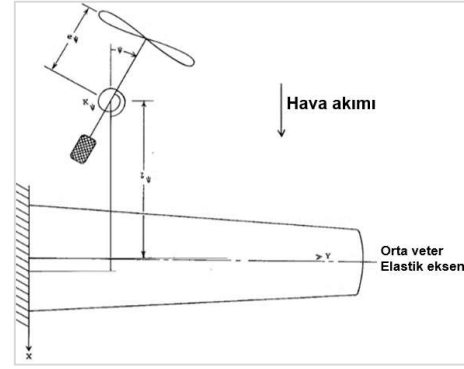
$$T = T_p + T_\Omega$$

$$T_p = \frac{1}{2} \int m_p(x) (\dot{z}_p^2 + \dot{y}_p^2) dx \quad \text{Burada, } T_p \text{ pervane kütlesinin kinetik enerji ifadesi, } T_\Omega \text{ ise pervane dönüşünden kaynaklanan kinetik enerji ifadesidir.} \quad (20)$$

$$\text{ve } T_\Omega = \frac{1}{2} I_\Omega \omega_x^2$$

$$U = \frac{1}{2} S_\theta \theta^2 + \frac{1}{2} S_\psi \psi^2 \quad (21)$$

$$D = \frac{1}{2} \frac{S g_\theta}{\omega} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \frac{S_\psi g_\psi}{\omega} \dot{\psi}^2 \quad (22)$$



Şekil 12. Elastik kanada monte pervane, (Bennett ve Bland 1964)'dan alınmıştır

.Analitik Model I'dekine benzer şekilde yukarıda verilen ifadeler uygun forma getirildikten sonra Denklem (4)'te verilen Lagrange denklemlerinde yerine konarak hareket denklemleri çıkarılacaktır.

**Pervane aerodinamik modeli:** Analitik Model II için I'de olduğu gibi hem Ribner hem de Houbolt-Reed'in yaklaşımı kullanılacaktır. Bu iki yöntemin farkları daha önce de belirtildiği gibi aerodinamik türevlerin hesaplanmasındadır. Bu aerodinamik yaklaşımlar literatürdeki mevcut halleri ile kullanacağı gibi, projenin literatüre katkılarının biri olan itki üreten bir pervane için de geliştirilecektir. Benzer şekilde elde edilen sonuçları iyileştirmek için sıkıştırılabilirlik etkileri ve 3-boyutlu sonlu kanat etkileri için düzeltmeler de yapılacaktır. Her iki yöntem hem mevcut halleri için hem de itki üretimi ve sıkıştırılabilirlik düzeltmeleri yapıldıktan sonra genişletilmiş halleri için karşılaştırmalar ve kapsamlı bir değerlendirme yapılacaktır.

**Çözüm yöntemi:** Hareket denklemlerinin sağ tarafına pervane aerodinamiğinden elde edilen ilgili kuvvet ve momentlerin genelleştirilmiş formdaki ifadeleri yazılarak çözümü yapılacak sistem elde edilmiş olacaktır. 4-serbestlik dereceli sistemin çözümü için denklemlerin matris formunda yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Çözüm için matris formundaki denklemler durum uzayına dönüştürülecektir.

Projede sunulan yeniliklerden biri kullanılacak çözüm yöntemidir. Daha önce literatürde bu alanda uygulaması görülmemiş genişletilmiş Galerkin yöntemi (GGY) kullanılacaktır. Yöntemin detayları proje yürütücüsünün önceki çalışmalarında (Eken 2019) yer almaktadır. Bu yöntemin özellikle pervane ile kanadın birleşme noktasında kolay uygulanabilir olacağı öngörülmektedir.

Bu yöntem kullanılarak Şekil 12'de verilen tek pervaneli konfigürasyon için hareket denklemlerinin yapısal modeli temsil eden sol tarafı ile aerodinamik tarafı temsil eden sağ tarafı birleştirilerek, esnek kanatlı bir pervanenin tam bağlaşıklık formdaki hareket denklemleri aşağıdaki gibi matris formunda elde edilecektir:

$$[A]\ddot{q}_p + [B]\dot{q}_p + [C]q_p + [D]\ddot{q}_k + [E]\dot{q}_k + [F]q_k = 0 \quad (23)$$

Burada  $[A]$  pervane için aerodinamik ve yapısal kütle matrisi,  $[B]$  pervane için aerodinamik ve yapısal sönüm matrisi,  $[C]$  pervane için aerodinamik ve yapısal katılık matrisidir.  $q_p$  pervaneye ait,  $q_k$  ise kanada ait genelleştirilmiş koordinatları göstermektedir.

N-pervaneli konfigürasyon için Xu (2020)'de verilen formülasyon örnek alınacaktır. Bu kısımda denklem çıkarımları, matrislerin elde edilmesi dahil formülasyonun sürecinin tamamında Mathematica Programı kullanılacaktır. Bu süreç, enerji ve sönüm ifadelerinden başlanarak, Lagrange denklemlerinden hareket denklemlerinin elde edilmesi, ilgili boyutsuzlaştırmaların yapılması, basit harmonik hareket kabulünün uygulanması ve nihai olarak hareket denklemlerinin matris formundan sonra da durum uzayına indirgenmesini kapsamaktadır. Mathematica programının sembolik mimarisi sayesinde, denklemler sembolik işlemler koleksiyonu kullanılarak manipüle edilebilmekte ve yine sembolik bir ifade olarak temsil edilebilmektedir. Bu sayede çözüm için gerekli denklemlerin elde edilmesi işlemi halledilecektir.

**Parametrik Çalışmalar:** Analitik Model II kapsamında öncelikle 2- ve 3-pervaneli konfigürasyonlar için çalışmalar yapılacaktır. Sonrasında verilen bir kanat konfigürasyonu üzerine yerleşebilecek sayıdaki pervane sayısı için analizler yapılacaktır. Bu model kapsamında yürütülecek parametrik çalışmalar şunlardır:

- Tek pervaneli model için kanat üzerinde farklı yerleşim konfigürasyonları, farklı ağırlıkta pervane konfigürasyonları
- N-pervaneli model için kanat üzerinde farklı yerleşim konfigürasyonları, farklı ağırlıkta pervane konfigürasyonları
- N-pervaneli model için ağırlık ve yerleşim kombinasyonları

Bu iş paketinin en önemli çıktılarından biri, Ribner ve Houbolt-Reed aerodinamik yöntemlerinin itki üreten pervane etkisi ile sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkilerinin dahil edecek şekilde güncellenmesiyle yalpalama çırpınma analizlerinin gerçekleştirilmesidir. Analitik Model II'de elastik kanat modeli üzerinde itki üreten pervanenin yalpalama çırpınma formülasyonu ve analiz simülasyon sonuçlarına literatürde rastlanmamıştır. Dolayısıyla, bu kapsamda gerçekleştirilecek analizler iş paketinin en önemli çıktılarından olacaktır. Örnek olarak Analitik Model II'nin yapısal tarafında ve özellikle  $N \geq 3$  olmak üzere, N-pervaneli konfigürasyon için yukarıda listelenen parametrik çalışmalara ait sonuç veya

değerlendirmeye literatürde rastlanmamıştır. Ayrıca başka bir önemli çıktı ise bu modelden elde edilen formülasyon özgün bir model olan Analitik Model IV'te elastik kanat yaklaşımı için temel alınacaktır. Bunun yanında, bu modelden elde edilen sonuçlar düşük serbestlik dereceli MSC/NASTRAN modeli (Sayısal Model I) ile karşılaştırılacaktır ve uyumları değerlendirilecektir. Bu iş paketinden sorumlu ekip yürütücü Doç. Dr. Seher Eken ve 1 bursiyeri (1 yüksek lisans) kapsamaktadır. İş paketinin altı aylık bir süre içinde tamamlanacağı öngörülmüştür.

### İŞ PAKETİ 3: ANALİTİK MODEL III'ÜN OLUŞTURULMASI

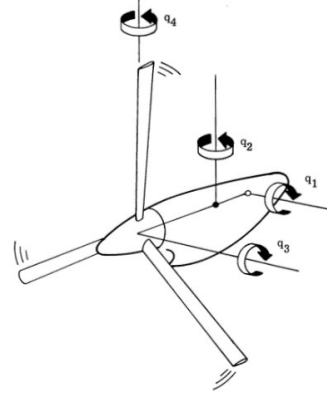
Analitik Model I ve II sırasıyla rijit ve elastik kanada esnek olarak monte edilmiş rijit bir pervanenin yalpalama kararsızlık sınırlarını hesaplamak için kurulmuş modellerdir. Proje kurgusunda, bu iki modelin kullanım amacı temel olarak turbo-pervaneli, piston-pervaneli ve yeni nesil elektrik-pervaneli hava araçlarının ön tasarım aşamalarındaki yalpalama kararlılık sınırlarını belirlemek üzerinedir. Bu modellerde, geleneksel pervaneli hava araçları için makul bir varsayım olan rijit pervane ele alınmaktadır. Öte yandan, proje kapsamını dikey iniş/kalkış yapabilen VTOL tasarımları gibi geleneksel olmayan hava araçlarını da kapsayacak şekilde genişletmek için üçüncü iş paketinde Analitik Model III önerilmektedir. Bu modelin kurulması ile izlenecek yöntem önceki modellere benzer adımlar ile aşağıda açıklanmıştır.

Bir helikopter pervanesi palaları genellikle uzun ve esnek yapıda olurken, pervaneli hava araçları ise çoğunlukla kısa ve esnek olmayan (rijit) yapıda palalara sahiptir. VTOL tarzı geleneksel olmayan tasarımlar ise bu iki hava aracının da pala yapısından ortak özellikler taşımaktadır. Analitik Model III sayesinde, projenin kapsadığı hava aracı tipleri, geleneksel pervaneli hava araçlarına ek olarak, VTOL tipinde hava araçlarını da kapsayan bir kurguya genişleyecek ve elastik pervane konfigürasyonlarda yalpalama kararsızlığının hesaplanması için kullanılabilir.

Proje kapsamında rijit pervane sisteminden elastik pervane sistemine geçiş ile birlikte yalpalama kararsızlığına elastik pervane yapılarının etkileri incelenebilecektir. Çırpın kanatlara sahip pervaneye ilgili daha önceki deneysel çalışmalar (Reed ve Bennet 1963, Reed 1967), rijit kanatlara kıyasla kanat esnekliğinin kararlılığı bozucu bir etkiye sahip olduğu şeklinde raporlanmıştır. Ayrıca, rijit pervane sistemleri için her zaman ve doğal olarak geri yalpalama modunda ortaya çıkan kararsızlık durumu; rijit olmayan çırpın pervane tasarımları için ileri yalpalama modunda görülmektedir. İleri kararsız çırpınma modunun rijit pervane kabulünün yapıldığı Analitik Model I veya II ile tespit edilmesi mümkün değildir.

**Yapısal Model:** Proje kapsamında geliştirilecek üçüncü analitik model Kvartesik'in 1973 yılındaki çalışmasında geliştirilen yaklaşımı esas almaktadır. Model, kanat yapısına bağlı bir motor bölümü ile pervaneyi içeren pervane palalarının düzlem-içi ve düzlem-dışı kanat çırpması ile motor bölümü yunuslaması ve sapması olmak üzere dört serbestlik derecesini içermektedir (Şekil 13).

Palalar, göbeğe göre iki menteşe konumundan biri etrafında kanat çırpmasına (flap) izin verilecek şekilde göbeğe pimler aracılığıyla tutturulmuştur. Menteşeler (hinges), pervane diskinin düzlemine dik yönde kanat çırpacak şekilde yönlendirilmektedir. Bu sayede pervane palaların yunuslama (düzlem-dışı) ve sapma (düzlem-içi) yönlerinde hareket edecek şekilde elastik pervane hareketini temsil edilmektedir.



Şekil 13. Elastik pervane-motor sistemi (Kvartesik 1973)'den alınmıştır.

**Pervane Aerodinamik Modeli:** Analitik Model III'de pervane yüklemesinin hesaplanması için Kunz (2005)'in çalışmasında yer alan sanki-daimi aerodinamik yaklaşım kullanılacaktır. Bu yaklaşım da esas olarak Johnson (1975)'te sunulan yaklaşım ile benzerdir. Pervane palaların ince şeritlere bölünerek, pala açıklığı boyunca integre edilerek sanki-daimi bir aerodinamik teori ile hesaplamalar yapılacaktır.

Önceki Analitik Modellerde itki üreten pervane için itki katsayısı dikkate alınarak bir hesaplama yapılacakken burada sunulan aerodinamik yöntem bu etkiyi hali hazırda dâhil etmektedir. Ayrıca, diğer modellere benzer şekilde, aerodinamik yöntemle elde edilen sonuçları iyileştirmek için sıkıştırılabilirlik etkiler ve 3-boyutlu sonlu kanat etkileri için düzeltmeler yapılacaktır.

**Çözüm Yöntemi:** Elastik pervanenin modellendiği Analitik Model III'deki çözüm yöntemi temel olarak Lagrange denklemlerinin kullanılarak hareket denklemlerinin elde edilmesini içermektedir. Elde edilen hareket denklemleri 4-serbestlik dereceli olacaktır. Elastik pervaneyi modelleyen Şekil 13'te verilen sistemin hareket denklemleri aşağıda verilen matris formunda ifade edilmektedir:

$$[M]\ddot{q} + [C]\dot{q} + [K]q = [C_a]\dot{q} + [K_a]q = 0 \quad (24)$$

Burada  $[M]$  yapısal sistem için kütle matrisi,  $[C]$  yapısal sistem için sönüm matrisidir, not olarak sistemde yapısal sönüm bulunmamaktadır, ancak bu terim jiroskopik etkileri içeren pervane dönüş hızı  $\Omega$ 'ye bağlı bir terim olacaktır. Sırasıyla  $[C_a]$  ve  $[K_a]$  aerodinamik katılık ve sönüm matrisleridir. Sistemin serbestlik dereceleri  $q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T$  matrisi ile gösterilmektedir. Burada,  $q_1$  pylon yunuslama açısı,  $q_2$  pylon sapma açısı,  $q_3$  pervane diskinin dikey eğilmesi,  $q_4$  pervane diskin yatay eğilmesidir (Şekil 13).

Bu sistemin çözülmesi için Denklem (24)'te verilen hareket denklemlerinin matris formunda ifadesi ve bu matris sisteminin durum uzayına dönüştürülmesi gerekmektedir. Analitik Model I'de detayları verilen benzer bir çözüm metodolojisi uygulanacaktır.



**Parametrik Çalışmalar:** VTOL hava aracı sınıfına giren tiltrotorlarda pervane yalpalama çarpınması tipik pervaneli hava araçlarından çok daha karmaşık bir fenomendir. Bu konu üzerine kapsamlı literatür mevcut olup, başlı başına ayrı bir projenin konusu olmayı hak etmektedir. Ancak, pervane yalpalaması özellikle uçak modundaki tiltrotorların seyir hızını sınırlamakta olduğundan, projede bu model kapsamında tiltrotorlar için literatürde yer alan Kunz (2005)'in modeli kullanılacaktır. Yürütülecek parametrik çalışmalar şunlardır:

- İlerleme oranı, pala ve pylon için farklı geometrik ve atalet büyüklükleri değiştirilerek pervane yalpalama çarpınmasına olan etkisi incelenecektir.
- İtki üreten pervane etkileri incelenecektir.
- Sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkilerinin dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılması

Bu iş paketinde yürütülecek faaliyetlerin en önemli çıktısı proje kapsamında VTOL tarzı geleneksel olmayan pervaneli hava araçlarının pervane yalpalama analizlerini gerçekleştirecek şekilde genişletecek olmasıdır. Diğer önemli bir çıktı ise bu modelden elde edilecek kazanımlar direkt olarak Analitik Model IV'de elastik pervane yaklaşımında uygulanmak üzere kullanılacaktır. Bu iş paketinden sorumlu ekip yürütücü Doç. Dr. Seher Eken, araştırmacı Dr. Öğr. Üyesi Ali Eken (Gebze Teknik Üni.-Uçak Müh. Böl.) ve 1 bursiyeri (1 doktora) kapsamaktadır. İş paketinin altı aylık bir süre içinde tamamlanacağı öngörülmüştür.

#### İŞ PAKETİ 4: ANALİTİK MODEL IV'ÜN OLUŞTURULMASI

Dördüncü iş paketi kapsamında literatürde olmayan, yeni bir model olan Analitik Model IV geliştirilecektir. Önceki modellerden elde edilen kazanımlara dayanan hem elastik kanat, hem de elastik pervaneyi dikkate alan bir yaklaşım içerecektir. Temel olarak, Analitik Model II'de geliştirilecek elastik kanat yaklaşımı ile Analitik Model III'te ele alınan elastik pervane yaklaşımı birleştirilmesine dayanmaktadır.

**Yapısal Model:** Elastik pervane ve elastik kanat sisteminin hareketini yöneten denklemlerin çıkarılması önceki modellere benzer şekilde olacaktır. Öncelikle kinetik ve potansiyel enerji ifadelerinin türetilmesi gereklidir. Kinetik enerji, esnek bir şekilde monte edilen ve dönmeyen pervaneli motor sistemi ile dönen pervanenin enerjisi olmak üzere iki kısma ayrılacaktır. Potansiyel enerji ise pervanenin esnek motor bağlantılarını hesaba katarak yazılacaktır. Pervane yapısal modeli için aşağıda verilen matris formundaki sistem ile esnek kanat için verilen sistem birleştirilecektir. Not olarak, esnek kanat için sistem aşağıda verilen formda olacaktır.

$$A\ddot{q}_p + B\ddot{q}_{kp} + C\dot{q}_p + D\dot{q}_{kp} + E q_p = Q_a \quad (25)$$

Burada A pervane kütle matrisi, B kanat-pervane kütle matrisi, C pervane sönüm matrisi, D pervane-kanat sönüm matrisi, E pervane katılık matrisi,  $Q_a$  ise pervane aerodinamik kuvvetlerini temsil etmektedir.

Elastik pervaneyi temsil etmek için Analitik Model III'te olduğu ve Şekil 13'te gösterildiği gibi pervaneye ait dört serbestlik derecesi bulunmaktadır. Bunlar,  $q_p = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T$  matrisi ile gösterilmektedir.  $q_1$  pylon yunuslama açısı,  $q_2$  pylon sapma açısı,  $q_3$  pervane diskinin dikey eğilmesi,  $q_4$  pervane diskin yatay eğilmesidir.  $q_{kp}$  ise kanat ile pervanenin birleştiği serbestlik derecelerine ait genelleştirilmiş koordinattır.

**Pervane Aerodinamik modeli:** Pervane aerodinamiği için Johnson (1975)'te sunulan yaklaşım kullanılacaktır. Bu yaklaşımda sanki-daimi bir aerodinamik teori kullanılarak pervane aerodinamik türevleri hesaplanmaktadır. Analitik Model I ve II'de olduğu gibi bu aerodinamik yöntem ile itki üreten pervane için ve sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkilerini dahil eden düzeltmelerle desteklenen bir formülasyon geliştirilecektir.

**Çözüm Yöntemi:** Pervane ve kanat yapısal sistemi ile pervane aerodinamik kuvvetleri matris formunda birleştirilecek ve birleştirilen sistem durum uzayına dönüştürülerek, basit hamonik hareket kabulü yapılacaktır. Sistem bilinmeyen çarpınma frekansı ve hızını çözecek şekilde düzenlenecektir. Bu kısımda yapılacaklar tipik bir çarpınma problemiindeki çözüm yöntemine benzer olacaktır.

Not olarak, projede önerilen modellerin geliştirilmesi için öncelikle denklemlerin çıkarılması ve çıkarılan denklemlerin çözüme uygun bir forma getirilmesi gerekmektedir. Bu aşamalarda gösterilen formülasyon temsildir. Elastik pervane-elastik kanat sisteminin hareketini yöneten denklemlerin matris formunda ifadesi aşağıda temsili olarak verilen denklem şeklindedir:

$$(A - A_a)\ddot{q}_p + (B - B_a)\ddot{q}_{kp} + (C - C_a)\dot{q}_p + (D - D_a)\dot{q}_{kp} + (E - E_a)q_p = 0 \quad (26)$$

Burada Denklem (25)'in sağ tarafında yer alan aerodinamik kuvvet ve momentleri temsil eden terimler matris formuna dönüştürülerek yukarıdaki denklemin sol tarafında ilgili kütle, sönüm ve katılık matrisinden çıkarılmıştır. Bu terimler,  $A_a, B_a, C_a, D_a, E_a$ 'dir. Son olarak,  $q_p$  pervaneye ait,  $q_{kp}$  ise kanat ile pervanenin birleştiği serbestlik derecelerine ait genelleştirilmiş koordinatları temsil etmektedir.

Öncelikle, Analitik Model II'dekine benzer, kanada tek bir elastik pervane monte edilmiş sistemin hareket denklemleri ve çözümü yapılacak matris formunda denklem sistemi elde edilecektir. İkinci olarak, iki elastik pervaneli sistemin denklem çıkarımları ve matris formunda denklem sistemi elde edilecektir. Bu modelde elastik pervane etkilerini modellemek için sisteme eklenecek ekstra serbestlik dereceleri sebebiyle ikiden daha fazla elastik pervane ile formülasyon veya analiz planlanmamıştır.

**Parametrik Çalışmalar:** Bu modelin oluşturulmasının ardından aşağıda listenen parametrik çalışmalar yapılacaktır:

- Ribner ve Houbolt-Reed yöntemlerinin karşılaştırılması
- Çarpınma karakteristiklerine kanat elastik etkileri

- Çarpınma karakteristiklerine pervane elastik etkileri
- İtici üreten pervane etkileri, sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkileri
- Tek-elastik-pervaneli elastik kanat üzerinde farklı ağırlık ve yerleşim kombinasyonları
- İki-elastik pervaneli elastik kanat için ağırlık ve yerleşim kombinasyonları

Bu iş paketinde yürütülecek faaliyetlerin tamamı literatürde yer almayan fomülasyon ve analizleri içermektedir. Yukarıda açıklandığı gibi, bu modelin oluşturulması daha önce literatürde yer alan elastik kanat ve elastik pervane yaklaşımların birleştirilmesine dayanmaktadır. Bu modelden elde edilecek veriler ve çıktılar önceki Model I, II ve III ile kıyaslanacak ve elastik kanat, elastik pervane etkilerinin değerlendirilmesi yapılacaktır. Bunun yanında Sayısal Model I'de önerilen MSC/NASTRAN programında üretilen düşük serbestlik dereceli model ile kıyaslanabilecektir.

İş paketinden sorumlu ekip yürütücü Doç. Dr. Seher Eken ve 1 bursiyeri (1 yüksek lisans) kapsamaktadır. İş paketinin sekiz aylık bir süre içinde tamamlanacağı öngörülmüştür.

#### İŞ PAKETİ 5: SAYISAL MODEL İN OLUŞTURULMASI

Pervane yalpalama çarpınmasının sayısal yöntemlerle analizinde kullanılan iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki frekans alanında klasik yaklaşım, diğeri de zaman alanında yaklaşımdır. Proje kapsamında geliştirilecek iki sayısal modelde bu iki yaklaşım esas alınarak çalışmalar yapılmıştır.

Frekans alanında gerçekleştirilen yalpalama kararsızlık analizleri için yaygın olarak kullanılan ticari yazılımlar mevcuttur. Bu yazılımlardan bir tanesi MSC/NASTRAN'ın (NASTRAN 2022a) pervane yalpalama kararsızlık analizleri için özel olarak Rodden ve Rose (1989) tarafından geliştirilen SOL 75 isimli sunulan çözücüdür. Bu yazılım, İstanbul Teknik Üniversitesi yazılım altyapısında sunulmaktadır. Bunun yanında, aeroelastik analizde özelleşmiş bir araç olarak ZAERO yazılımının ZWHIRL modülü ile benzer analizler gerçekleştirilebilmektedir (ZAERO 2017). Ancak, ZAERO yazılımı yıllık lisans ücreti ile kiralanan ve İTÜ bünyesinde mevcut olmayan bir yazılımdır. Bu sebeple, projede bu iş paketi kapsamındaki sayısal modelin oluşturulmasında üniversite altyapısında mevcut MSC/NASTRAN yazılımı kullanılacaktır.

Dünya çapında, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan sonlu elemanlar tabanlı bir hesaplama sistemi olan MSC/NASTRAN, havacılık endüstrisinde hava araçlarının klasik çarpınma analizleri konusunda defacto olarak tercih edilen Doublet Lattice yöntemini esas alan çeşitli aeroelastik analiz türleri için standart hesaplama araçları sunmaktadır. Klasik aeroelastik analizlere ek olarak, SOL 75 (/SOL 145) isimli bir çözücü ile çarpınma analizine pervane/nasıl aerodinamik ve jiroskopik kuvvetleri dahil ederek pervane yalpalama kararsızlığı çözümleri elde etmek üzerine bir ön işlemci geliştirilmiştir (Rodden ve Rose 1989). Özet bir akış şemasının Şekil 14'te verildiği bu ön-işlemci kullanılarak pervane etki matrisleri hesaplanmaktadır.



Şekil 14. Nastran yazılımında kullanılacak metodolojinin akış şeması

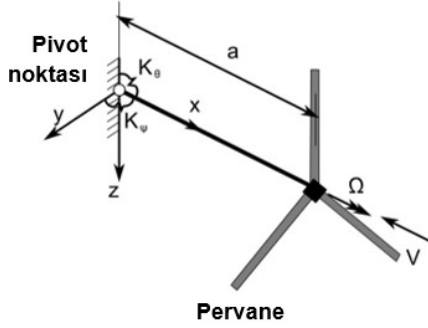
Ön-işlemci standart pervane matrislerini elde etmek için gereklidir ve **prop.alt** adı verilen bir DMAP (Direct Matrix Abstraction Program) prosedürüne sahip MSC/NASTRAN program sisteminde dayanmaktadır (NASTRAN 2022b). MSC/NASTRAN programında, pervane aerodinamik matrislerinin oluşturulması için **prop\_data** isimli bir girdi dosyası ile pervane özellikleri uygun sıra ve kuralla girilmektedir.

Daha sonra bu girdi dosyasında bulunan verileri kullanan **propf (profm)** isimli FORTRAN dilinde yazılmış harici bir ön işlemci çalıştırılarak, pervane aerodinamik terimlerinin hesaplanması ve **aerodmig.dat** isimli dosyaya yazılarak dışa aktarılması sağlanmaktadır. Proje kapsamında pervane matrislerinin hesaplanması bu yöntemle gerçekleştirilecektir.

MSC/NASTRAN yazılımının kullandığı pervane aerodinamiği ve jiroskopik kuvvetlerin hesaplanması önceki bölümlerde bahsedilen ve Aerodinamik Şerit Teorisini kullanan Houbolt-Reed'in teorisine dayanmaktadır. Pervane rijit olarak kabul edilmektedir. Geriye kalan kanat ve varsa diğer hava aracı bileşenleri için aerodinamik kuvvet ve momentlerin hesabı için Doublet-Lattice yöntemini kullanılır (Rodden 1979). Pervane yalpalama kararsızlığı çözücüsü SOL 75, MSC/NASTRAN'ın klasik çarpınma çözücüsü SOL 145 ile hemen hemen aynıdır, ancak pervane ağırlık merkezinde bir düğüm noktası ile pervane koordinat sistemi gibi pervane ile ilgili belli tanımlamalar gereklidir. Ayrıca, farklı serbest akım hızlarında modelin farklı katılık ve sönümlenme matrisleri olacağı için pervane aerodinamik matrisleri de her bir hıza karşılık ayrı ayrı hesaplanacak şekilde ayarlanmıştır. Bu nedenle, her bir hız bir alt çözümde (subcase) bir kararlılık analizi gerçekleştirir. Çıktı **\*f06** dosyasının yapısı da, sıradan çarpınma hesaplamalarına kıyasla farklıdır. Bu dosyanın işlenmesi için proje kapsamında özel bir araç geliştirilerek yalpalama kararsızlığı sonuç dosyalarının okunması pratik hale getirilecektir. Geliştirilecek dosya okuyucu için MATLAB programı kullanılacaktır ve bu aracın kullanımı özellikle parametrik çalışmalar sırasında büyük kolaylık sağlayacaktır.

MSC/NASTRAN yazılımı ile kurulacak sistemin doğrulanması için kullanılacak test konfigürasyonlarından birinci konfigürasyon, pervane yalpalama kararsızlığı için klasik bir modeldir ve Şekil 15'te verilmiştir. Bu model, temel sistem parametrelerinin kararlılık üzerindeki etkisini incelemek için oldukça kullanışlı olmakla birlikte gerçek bir hava aracı yapısında ortaya çıkan etkileri göstermek için yeterli değildir. Rijit pervane ve kanadı içermektedir ve yunuslama ve

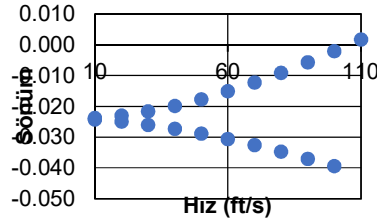
sapma serbestlik derecelerine sahip motor pivot noktasına elastik olarak bağlanmıştır. MSC/NASTRAN modelinde motor ve pervane kütlesi CONM2 ile verilecek, motor elastik bağlantısı için CELAS2 kartı kullanılacaktır.



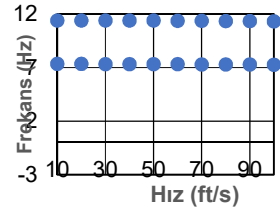
Şekil 15. 2-boyutlu test konfigürasyonu, (Rodden ve Rose 1989)'dan uyarlanmıştır.

2-boyutlu model için Rodden ve Rose (1989) tarafından D-1807 pervanesi örnek bir çalışma sunulmuştur. Proje kapsamında NASTRAN programı kullanılarak geliştirilecek yöntem için bu örnek vaka çalışması ele alınarak analiz edilmiştir. Problem, 4 palalı NASA TN D-1807 pervane sisteminin referans veter boyu  $c_r=4.375$  in, polar atalet momenti  $I_x=0.10269$  lb.in  $s^2$ ,  $R=10.1256$  in olarak alınmıştır. İdealize edilmiş rijit pervane yapısını modellemek için pervane göbeğini temsilen oluşturulan düğüm noktası, pivot noktası için oluşturulan bir düğüm noktası ile rijit bir çubuk yardımıyla birbirine bağlanmıştır. Ayrıca yukarıda ifade edildiği gibi pervane matrisi oluşturma aşamasında kullanılmak üzere pervane eksenine için yerel bir koordinat sistemi tanımlanması gereklidir. Aerodinamik model ise (dummy) bir aerodinamik yüzey modellemek için yalnızca bir CAERO1 kartından, ayrıca SPLINE2 kartı ile yapısal ve aerodinamik model arasında inetrpolasyon yapılarak pervane kararsızlık sınırları tespit edilmiştir.

Problem NASTRAN programında çözülerek Şekil 16'da verilen sönüm-hız-frekans grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerden de görüleceği üzere, geriye doğru yalpalama modunda 95 ft/s civarında sönümün sıfır olması durumunda yalpalama kararsızlığı durumu elde edilmiştir. Bu hıza karşılık gelen yalpalama kararsızlık frekansı 7 Hz civarında elde edilmiştir. Ayrıca aynı problem ZAERO programı ZWHIRL modülü ile analiz edilmiştir (ZAERO 2017). MSC/NASTRAN sonuçları ile kıyaslandığında uyumlu olduğu görülmüştür.



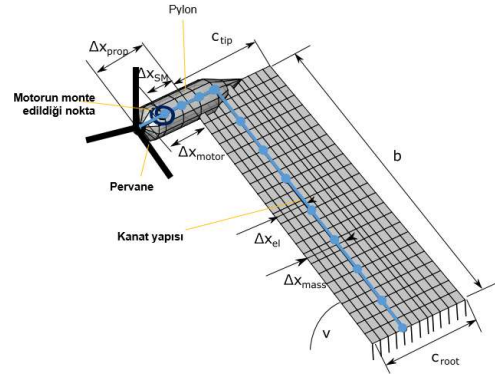
(a) Hız-Sönüm grafiği



(b) Hız-Frekans grafiği

Şekil 16. D1807 test problemi için Nastran kararlılık analizi sonucu (Küçükali vd. 2023)

Temel sistem parametrelerinin incelemesi için kullanılacak doğrulama modelinin yanında, gerçek hava aracı benzetimi daha iyi yapabilmek için 3-boyutlu ve daha karmaşık bir modele ihtiyaç vardır. 3-boyutlu örnek olarak Koch (2022)'de sunulan ve Şekil 17'de verilen konfigürasyon kullanılacaktır. Bu konfigürasyon, hibrit-elektrik motorlu planör FVA 30'un V-kuyruk yapısının türetilmiş olup; kanat yapısı kiriş elemanlar yardımıyla elastik olarak modellenirken, kirişin ucunda üç palalı bir pervane bulunmaktadır. Şekil 17'de gri paneller ile gösterilen kanat aerodinamik yüzeyi CAREO2, ucundaki pylon *interference body* olarak BODY7 kartı ile modellenenecektir. Pylon bağlantısı için RBE2 ve CELAS2 benzeri kartlar kullanılacaktır.



Şekil 17. MSC NASTRAN 3-boyutlu konfigürasyon Koch 2022)'den uyarlanmıştır.

### Parametrik çalışmalar

Çoklu pervaneli (n-pervaneli) elastik kanat konfigürasyonu için analitik çözüme ek olarak, MSC/NASTRAN yazılımında oluşturulacak sayısal model için analizler yapılacaktır. Bu sayede, NASTRAN sonuçları ile Analitik Model II'nin sonuçları karşılaştırılacaktır.

NASTRAN programı kapsamında 2-boyutlu ve 3-boyutlu olmak üzere iki tane konfigürasyon analiz edilecektir. Bu konfigürasyondan 2-boyutlu olanı için temel sistem parametrelerinin yalpalama kararlılık sınırlarına etkisi incelenecektir. Aşağıda verilen parametreler ve değişkenlere göre pervane-motor sistemin kararlılık sınırları çizdirilecektir.

- Motor elastik bağlantılarının değişimi, yunuslama ve sapma yayı katılık değerleri, pivot noktasının değişimi, pervane çapı, pervane göbeğinin mesafesi, pusher/tractor konfigürasyonları

3-boyutlu konfigürasyon için yapılacak parametrik çalışmaların kapsamı aşağıda verilmiştir.

- Pervanesiz konfigürasyon
- Tek pervaneli konfigürasyon, pervane pylon bağlantısı ile monte edilmiş
  - RBE ve CELAS kartları kullanılarak elastik ve rijit bağlantı incelemesi
- İki pervaneli konfigürasyon
  - Bir pervanenin konumu sabit tutularak, diğer pervanenin kanat açıklığı boyunca yerinin değiştirilerek yalpalama kararsızlığı üzerinde etkisinin incelenmesi
  - Bir pervanenin boyutu ve ağırlığı sabit tutularak, diğer pervanenin boyut ve ağırlığının değiştirilerek yalpalama kararsızlığı üzerinde etkisinin incelenmesi
- Çoklu-pervaneli konfigürasyon
  - Pervanelerin kanat açıklığı boyunca konumlarının değiştirilerek yalpalama kararsızlığı üzerinde etkisinin incelenmesi
  - Pervanelerin kanat açıklığı boyunca boyut ve ağırlıklarının değiştirilerek yalpalama kararsızlığı üzerinde etkisinin incelenmesi

Bu iş paketinden elde edilen çıktılardan ilki sayısal sonuçların Analitik Model II ve IV'den elde edilen sonuçlar ile kıyaslanması olacaktır. Analitik modellerde sınırlı sayıda serbestlik derecesi ve pervanenin motora bağlandığı noktada basitleştirici varsayımlar yapılırken Sayısal Model I'de benzer varsayımlar daha gerçekçi bir şekilde kurulabilmektedir. Bunun yanında kanadın, MSC/NASTRAN programında Doublet-Lattice yöntemi ile bir taşıma yüzeyi olarak modellenmesi sayesinde daha gerçekçi bir aerodinamik yaklaşım elde edilecektir. Diğer bir önemli çıktı ise bu modelden elde edilecek kritik pervane-kanat kombinasyonlarının Sayısal Model II'de akışkan-yapı etkileşimi simülasyonları gerçekleştirilecektir.

İş paketinden sorumlu ekip yürütücü Doç. Dr. Seher Eken ve 1 yüksek lisans bursiyeri kapsamaktadır. İş paketi on dört aylık bir süre içinde tamamlanacağı öngörülmüştür.

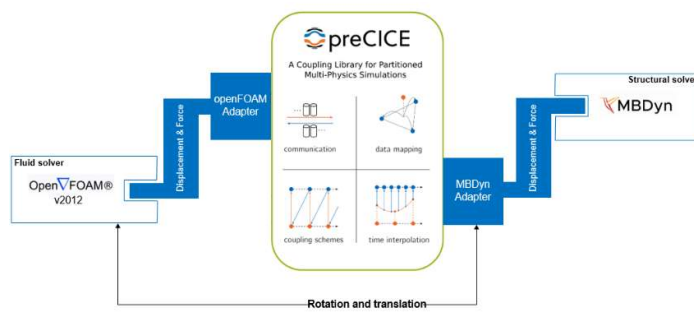
#### **İŞ PAKETİ 6: SAYISAL MODEL II'NİN OLUŞTURULMASI**

Pervane yalpalama çırpınmasının sayısal yöntemlerle analizinde kullanılacak ikinci yaklaşımda zaman alanında çözümler gerçekleştirilen bir yaklaşımı kullanılır. Simülasyona dayalı bu tür mühendislik çalışmaları, teorik ve deneysel çalışmaların yanında, birçok karmaşık çoklu-fizik probleminin çözülmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve özellikle son yıllarda gelişen bilgisayar teknolojilerine bağlı olarak vazgeçilmez bir araç haline dönüşmüştür. Projenin en öncelikli yaygın etkisi yenilikçi elektrikli pervaneli hava araçlarının tasarım aşamasında gerekli yalpalama analizini gerçekleştirmek için etkili araç bir geliştirmek olup, bu amaçla, hava aracı tasarımcısının yüksek-doğruluklu çözüme ihtiyaç duyduğu aşamalarda kullanmak üzere ikinci sayısal model önerilmektedir. Bu model Hesaplamalı Yapı Dinamiği (HYD) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemlerinin bağlaşımları kuran bir akışkan-yapı etkileşim simülasyonuna dayanmaktadır. Bu yöntem ile pervane ve taşıma yüzeyleri elastik olarak modellenerek aralarındaki etkileşim yüksek doğruluklu olarak modellenenecektir. Hesaplama, ön-işlemci ve son-işlemci aşamalarını kapsayacak şekilde tüm süreçlerde tamamen açık-kaynaklı yazılımlar kullanılacaktır. Kullanılacak yöntemin detayları ilgili bölümde verilecektir.

Yeni nesil hava araçlarında son derece yaygın olarak elektrik motorları kullanılmaktadır. Hafif ve kompakt yapıda olan bu motorların çeşitli yerleşimlerde kullanımı mümkün olabilmektedir. Ancak elektrik motorlarına özgü belli özellikler jiroskopik yalpalama modlarını tahrik ederek pervane yalpalama kararsızlığı oluşturmaktadır. Örnek olarak kompakt yapıda olan elektrik motorlarının pervane göbeği ile pivot noktası arasındaki mesafenin kısa olması sebebiyle yalpalama kararsızlığına daha düşük hızlarda gözlenmektedir.

Analitik modeller, yalpalama çırpınması gibi karmaşık bir olgunun anlaşılmasında önemli katkı sağlamakta ve hava aracının kavramsal ve ön tasarım seyrini değiştirebilmektedir. Bununla birlikte, hava aracının nihai tasarımı geliştikçe, yalpalama çırpınma marjının uçuş zarfı içindeki herhangi bir uçuş koşulu için yeterliliğini sağlamak amacıyla daha rafine tekniklerin kullanılması gereklidir. Gerçekçi çözümler elde etmek amacıyla, proje kapsamında sayısal modeller önerilmektedir. Bu modellerin ilki hem hızlı sonuç veren hem de gerçek hava aracının benzetimini daha iyi yapan MSC/NASTRAN sonlu elemanlar yazılımının kullanımı içermektedir. Ancak bu modelde kullanılan aerodinamik yaklaşım yetersiz kalmaktadır. Hava aracı tasarımcısının yüksek doğruluklu analizlere gerek duyduğu detay tasarım aşamasında kullanılmak üzere Hesaplamalı Yapı Dinamiği (HYD) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemlerinin bağlaşımları kuran bir akışkan-yapı etkileşim simülasyon yöntemi önerilmektedir. Hesaplama, ön-işlemci ve son-işlemci aşamalarını kapsayacak şekilde tüm süreçlerde tamamen açık-kaynaklı yazılımlar kullanılacaktır. Kullanılacak yöntemin detayları ilgili bölümde verilecektir.

Burada, PreCICE açık kaynaklı yazılımı kullanılarak OpenFOAM (OpenFOAM 2021) açık kaynak kodlu yazılımın MBDyn (MBDyn 2017) ile bağlaşımları kurulacaktır. PreCICE, akışkan-yapı etkileşimi ve konjuge ısı transferi simülasyonları gibi ayrık çoklu fizik simülasyonları için bir bağlantı kütüphanesidir (Bungartz vd. 2016). Karmaşık çoklu fizik senaryoları için uygun bir çözüm süresi sağlamak için gereken yüksek esnekliğe izin veren preCICE, simülasyonda yer alan tüm fiziğin bir alt bölümünü simüle edebilen mevcut çözümleri birleştirir. Düşük seviye iş istasyonlarından işlem kümelerine kadar geniş bir sistem yelpazesinde verimli bir şekilde çalışmaktadır.



Şekil 18. Ayırık çoklu fizik simülasyonları için bağlaşımlar kütüphanesi, preCICE programı, (Bungartz vd. 2016)'dan uyarlanmıştır.

Bu programın, Şekil 18'den de görüleceği (i) transient denklem bağlaşımı, (ii) iletişim ve (iii) veri haritalama (data mapping) olmak üzere 3 temel fonksiyonu vardır ve her bir fonksiyon için birçok farklı yöntemler sunar. Sistem için seçilecek yöntem .xml uzantılı bir konfigürasyon dosyasına yazılmaktadır. Proje kapsamında PreCICE bağlaşımlar kütüphanesi ile hazır adaptörleri mevcut olan OpenFOAM ve MBDyn programları bağlaşımı kurulacaktır. MBDyn programı, kinematik kısıtlamalara, dış kuvvetlere ve kontrol alt sistemlerine rijit veya esnek cisimlerin doğrusal ve doğrusal olmayan dinamiklerini simüle etmek için kullanılmaktadır. Döner-kanatlı hava araçları için geliştirilmiş bir analiz aracı olmakla birlikte sabit kanatlı hava araçları için simülasyonlar gerçekleştirilebilir.

Projede HYD-HAD yöntemlerinin bağlaşımını kuran akışkan-yapı etkileşim sayısal modeli Schließus ve Gragnon (2022)'de gösterilene benzer şekilde kurulacaktır. Burada en kritik işlem pervane dönüşünün hareketi ile birlikte akışkan-yapı bağlaşımının kurulmasıdır. PreCICE OpenFOAM adaptörü, hareket verilerini birleştirmek için OpenFOAM'ın pointDisplacement işlevini kullanmaktadır. OpenFOAM'da dönen pervaneyi simüle ettikten sonra, dönme hareketini doğrudan PreCICE MBDyn adaptöründen OpenFOAM'a bağlamak mümkün olmamaktadır, bunun için OpenFOAM' bladeForce isimli ayrı bir sınıf eklenmesi gerekmektedir. Bu eklenti için PreCICE programının hazır MBDyn adaptörü yerine Stuttgart Üniversitesi'nde geliştirilen özelleştirilmiş MBDyn adaptörü kullanılması gereklidir (preCICE 2022).

Bu kısımda yapılacak çalışmalar için izlenecek yöntemin ilk aşaması sorunsuz çalışan bir akışkan-yapı etkileşimi altyapısı kurulması olacaktır. Öncelikle gerekli programların kurulumları yapılacaktır. Bu programlar şunlardır: PreCICE bağlaşımlar kütüphanesi, OpenFOAM-preCICE adaptörü, OpenFOAM yazılımı, MBDyn-Python özelleştirilmiş adaptörü ve MBDyn yazılımı. Programlar örnek bir çalışma çözülerek test edilecek ve sorunsuz çalıştıkları gösterilecektir. Kurulum aşamasının tamamı, karşılaşılabilecek olası problemlerin çözümleri not edilerek bir kılavuz haline getirilerek, ileride aynı işlemler tekrarlanması halinde fayda sağlayacaktır. Bu aşamadan sonra Sayısal Model I'de verilen 2-boyutlu ve 3-boyutlu konfigürasyon kullanılarak akışkan-yapı etkileşim simülasyonları gerçekleştirilecektir. Pervane göbeği yer değiştirmelerinin zaman bağlı değişim grafiklerinden azalan-sabit-artan genlik trendi yakalanarak kararsızlık durumu sabit genlikli koşullar için elde edilmiş olacaktır. Yapılacak işlemler akışkan ve yapı modeli olarak ayrı ayrı ele alınacaktır. Not olarak, proje kapsamında incelenen yalpalama çirpınması doğrusal kararsızlıklar ile ilgili olup, doğrusal olmayan etkilerin sebep olduğu kararsızlıklar proje kapsamında değildir. Bu durum, yüksek açıklık oranına sahip kanatlar için bir etki yaratabilmektedir, ancak pervanelerin kanat üzerindeki konumlarına bağlı olarak etkisi az olabilmektedir. Buna rağmen, özellikle 3-boyutlu konfigürasyon için gerçekleştirilecek analizlerde doğrusal olmayan geometrik yaklaşım kullanılarak büyük deplasmanların etkisi incelenebilecektir.

Akışkan modeli kurulum aşamasında ise OpenFOAM programının kullanacağı bir çözüm ağı oluşturulması için açık-kaynaklı GMSH programı kullanılacaktır. Çözümler için PimpleDyMFoam çözücüsü hazırlanacaktır. Akış çözümleri için k- $\omega$  SST türbülans modeli için RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) denklemlerinin çözümü yapılacaktır. Bu sayısal model yüksek hesaplama gücü gerektireceği için önceki modellerde yapıldığı gibi bir parametrik çalışma öngörülmemiştir. MSC/NASTRAN'da kurulan 2-boyutlu konfigürasyondaki kritik olduğu belirlenen durumlar için akışkan-yapı etkileşim simülasyonları gerçekleştirilecektir.

Akışkan-yapı etkileşim simülasyonlarında akışkan ve yapı çözüm ağlarının ıslak yüzeyde düğümden düğüme çakışmadığı örtüşmeyen çözüm ağları için preCICE üç farklı yöntem ile veri interpolasyonu yöntemi sunmaktadır. Bu yöntemler: En yakın komşu (Nearest Neighbour) haritalaması, en yakın projeksiyon (Nearest Projection) haritalaması, radyal baz fonksiyon (Radial Basis Function) interpolasyonu. Projede ıslak yüzeydeki akışkan çözüm ağının daha ince, yapı çözüm ağı ise daha kaba olması beklenmektedir. Veri interpolasyon yöntemi olarak radyal baz fonksiyon (Radial Basis Function) interpolasyonu kullanılacaktır (preCICE 2022).

Bu iş paketi kapsamında, pervane yalpalama çirpınması özelinde kurulacak akışkan-yapı etkileşim sistemi ile bu sistemin simülasyonundan elde edilecek sonuçlar literatür için öncü çıktılar olacaktır. Aynı zamanda projede kurulacak altyapının hesaplama, ön-işlemci ve son-işlemci aşamalarının tamamında açık-kaynaklı yazılımlar kullanılacak olması vurgulanması gereken bir başka noktadır. Son olarak, sorumlu ekip yürütücü Doç. Dr. Seher Eken, araştırmacı Dr. Öğr. Üyesi Ali Eken (Gebze Teknik Üni.-Uçak Müh. Böl.) ve 2 bursiyeri (1 yüksek lisans, 1 doktora) kapsamaktadır. İş paketinin on sekiz aylık bir süre içinde tamamlanacağı öngörülmüştür.



### 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		
1	Analitik Model I'in oluşturulması	%10	Doç. Dr. Seher EKEN YL Bursiyeri 1 YL Bursiyeri 2	1	2	3	4																												
2	Analitik Model II'nin oluşturulması	%15	Doç. Dr. Seher EKEN YL Bursiyeri 1			1	2	3	4	5	6																								
3	Analitik Model III'ün oluşturulması	%15	Doç. Dr. Seher EKEN Dr. Öğr. Ü. Ali EKEN Dr. Bursiyeri							1	2	3	4	5	6																				
4	Analitik Model VI'ün oluşturulması	%20	Doç. Dr. Seher EKEN YL Bursiyeri 2									1	2	3	4	5	6	7	8																
5	Sayısal Model I'in oluşturulması	%20	Doç. Dr. Seher EKEN YL Bursiyeri 2															1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14				
6	Sayısal Model II'nin oluşturulması	%20	Doç. Dr. Seher EKEN Dr. Öğr. Ü. Ali EKEN YL Bursiyeri 1 Dr. Bursiyeri															1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

(\*) Çizelgedeki satırlar gerektiği kadar genişletilebilir ve çoğaltılabilir.

(\*\*) 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.

### 3.1.2. İş Paketleri

Proje, izlenebilir ve ölçülebilir hedefleri olan İP'lerden oluşur. İP oluşturulurken birbirileri ile ilişkili görevlerin bir araya getirilmesi beklenir. İP'nin başarılı bir şekilde tamamlanma durumunun izlenebilmesi için her bir İP'nin hedefi, başarı ölçütü ve ara çıktısı/çıktıları somut bir şekilde belirtilir.

Aşağıdaki İP Tablosu, her bir İP için ayrı ayrı hazırlanır. İP sayısına göre tablo çoğaltılabilir.

İŞ PAKETİ TABLOSU	
<b>İP No: 1</b>	<b>İP Adı:</b> Analitik Model I'nin oluşturulması
<b>İP Hedefi:</b> Analitik Model I'de örnek bir pervane-motor için çözüm elde edilerek, literatür ile doğrulanması. Ribner ve Houbolt-Reed aerodinamik yöntemlerinin kurulması. Bu model kullanılarak yürütülecek parametrik çalışmaların tamamlanması	
<b>İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:</b> <b>1.1. Ribner ve Houbolt-Reed aerodinamik yöntemlerinin formülasyonunun çıkarılması</b> <b>1.2. İtki üreten pervane ve sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat düzeltmeleri ile aerodinamik yöntemlerin güncellenmesi</b> <b>1.3. Parametrik çalışmalar</b>	<b>Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*)</b> <b>1.1-1.3 Doç. Dr. Seher EKEN, YL Bursiyeri 1</b> <b>YL Bursiyeri 2</b>
<b>İP'nin Başarı Ölçütü:</b> Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir. Pervane yalpalama kararsızlık hızı için en fazla % 3 seviyesinde hataya kadar literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmesi İtki üreten pervane için düşük hız-yüksek itki koşulunda itki üreten ve üretmeyen pervane için en az % 10'dan farklı yalpalama hızı sonuçlarının elde edilmesi, ayrıca sonlu-kanat ve sıkıştırılabilirlik etkilerinin düzeltilmesi ile deneysel sonuçlarla daha uyumlu hale gelmiş analitik sonuçların elde edilmesi	
<b>Ara Çıktılar:</b> 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 çıktılara ilişkin bilgi verilir. <b>1.1. Çözümeye hazır formülasyonunun elde edilmesi için Mathematica programlama dili ile yazılmış kod</b> <b>1.2. Aerodinamik yöntemlerin mevcut versiyonlarının literatür ile doğrulanması; itki üreten pervane ve sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat düzeltmeleri ile sonuçların elde edilmesi</b> <b>1.3. Parametrik çalışmalar kapsamında her bir parametreye karşılık pervane yalpalama kararlılık sınırlarını gösteren grafikler</b>	
<b>İP No: 2</b>	<b>İP Adı:</b> Analitik Model II'nin oluşturulması
<b>İP Hedefi:</b> Analitik Model II'da örnek bir esnek kanat-rijit pervane-motor konfigürasyonu için çözüm elde edilmesi ve literatür ile doğrulanması. Analitik Model I'den elde edilen Ribner ve Houbolt-Reed yöntemlerinin uygulanması. Bu model kullanılarak yürütülecek parametrik çalışmaların tamamlanması	
<b>İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:</b> <b>2.1. Tek-pervaneli konfigürasyonun formülasyonu için Mathematica programında kodlar hazırlanması</b> <b>2.2. Tek-pervaneli konfigürasyon sonuçlarının literatür ile doğrulanması</b> <b>2.3. Tek-pervaneli konfigürasyonun formülasyonunun çoklu-pervaneler için genişletilmesi, Mathematica programında kodlar hazırlanması</b> <b>2.4. Çoklu-pervaneli konfigürasyon sonuçlarının literatür ile doğrulanması</b> <b>2.5. Tekli ve Çoklu pervaneli konfigürasyon için parametrik çalışmalar</b>	<b>Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*)</b> <b>2.1-2-5 Doç. Dr. Seher EKEN, YL Bursiyeri 1</b>
<b>İP'nin Başarı Ölçütü:</b> Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir. Pervane yalpalama kararsızlık hızı için en fazla % 3 hataya kadar literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmesi. Çoklu-pervane tasarımları için Mathematica programında hazırlanacak (Kullanıcı, pervane sayısı olan n-değişkenini ve belli kısıtları belirledikten sonra program çalıştırılarak çözüm için gerekli matrislerin kurulması)	
<b>Ara Çıktılar:</b> 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 çıktılara ilişkin bilgi verilir. <b>2.1 Tek-pervaneli konfigürasyon için çözüme hazır formülasyonunun elde edilmesi için Mathematica programlama dili ile yazılmış kod</b> <b>2.2. Tek-pervaneli konfigürasyon için literatür doğrulamasını gösteren grafik ve tablo</b> <b>2.3. Çoklu-pervaneli konfigürasyon için çözüme hazır formülasyonunun elde edilmesi için Mathematica programlama dili ile yazılmış kod</b>	

<p><b>2.4. Çoklu-pervaneli konfigürasyon için literatür doğrulamasını gösteren grafik ve tablo</b>  <b>2.5. Tekli ve Çoklu-pervaneli konfigürasyon için parametrik çalışmalardan elde edilecek pervane yalpalama kararlılık sınırlarını gösteren grafikler.</b></p>	
<b>İP No: 3</b>	<b>İP Adı:</b> Analitik Model III'ün oluşturulması
<p><b>İP Hedefi:</b> Analitik Model III'de örnek bir tiltrotor konfigürasyonu için çözüm elde edilmesi ve literatür ile doğrulanması. Bu model kullanılarak yürütülecek parametrik çalışmaların tamamlanması</p>	
<p><b>İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:</b>  <b>3.1. Formülasyon için Mathematica programında kod hazırlanması</b>  <b>3.2. Sonuçların literatür ile doğrulanması</b>  <b>3.3. Parametrik çalışmalar</b></p>	<p><b>Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*)</b>  <b>3.1-3.3</b> Doç. Dr. Seher EKEN, Dr. Öğr. Ü. Ali EKEN, Dr. Bursiyeri</p>
<p><b>İP'nin Başarı Ölçütü:</b> Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir.  Pervane yalpalama kararsızlık hızı için en fazla % 3 hataya kadar literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmesi.</p>	
<p><b>Ara Çıktılar:</b> 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.</p> <p><b>3.1. Çözümeye hazır formülasyonun elde edilmesi için Mathematica programlama dili ile yazılmış kod</b>  <b>3.2. Literatür doğrulamasını gösteren grafik ve tablo</b>  <b>3.3. Parametrik çalışmalar kapsamında her bir parametreye karşılık Pervane yalpalama kararlılık sınırlarını gösteren grafikler</b></p>	
<b>İP No: 4</b>	<b>İP Adı:</b> Analitik Model IV'ün oluşturulması
<p><b>İP Hedefi:</b> Analitik Model IV'ün elastik kanat üzerinde elastik monte edilmiş elastik pervane için oluşturulması. Bu model kullanılarak yürütülecek parametrik çalışmaların tamamlanması</p>	
<p><b>İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:</b>  <b>4.1. Çarpınma karakteristiklerine elastik kanat ve elastik pervane etkilerinin incelenmesi</b>  <b>4.2. İtki üreten pervane etkileri, sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkilerinin incelenmesi</b>  <b>4.3. Tek-elastik-pervaneli elastik kanat üzerinde farklı ağırlık ve yerleşim kombinasyon konfigürasyonları</b>  <b>4.4. İki-elastik pervaneli elastik kanat için ağırlık ve yerleşim kombinasyon konfigürasyonları</b></p>	<p><b>Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*)</b>  <b>4.1-4.4</b> Doç. Dr. Seher EKEN, YL Bursiyeri 2</p>
<p><b>İP'nin Başarı Ölçütü:</b> Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir.</p> <p>Elastik pervane ve elastik kanat modellemesinin pervane yalpalama hızı tahmininde %10 civarında fark elde edilmesi</p>	
<p><b>Ara Çıktılar:</b> 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.</p> <p><b>4.1 Çarpınma karakteristiklerine elastik kanat ve elastik pervane etkileri için elde edilmiş grafik ve kıyaslama tabloları</b>  <b>4.2. İtki üreten pervane etkileri, sıkıştırılabilirlik ve sonlu-kanat etkileri için elde edilmiş grafik ve kıyaslama tabloları</b>  <b>4.3 Tek- elastik pervaneli konfigürasyon için çözüme hazır formülasyonun elde edilmesi için Mathematica programlama dili ile yazılmış kod ve tek- elastik pervaneli konfigürasyon için literatür doğrulamasını gösteren grafik ve tablo</b>  <b>4.4. İki- elastik pervaneli konfigürasyon için çözüme hazır formülasyonun elde edilmesi için Mathematica programlama dili ile yazılmış kod ve iki- elastik pervaneli konfigürasyon için literatür doğrulamasını gösteren grafik ve tablo</b></p>	
<b>İP No: 5</b>	<b>İP Adı:</b> Sayısal Model I'in oluşturulması
<p><b>İP Hedefi:</b> Sayısal Model I'de 2-boyutlu ve 3-boyutlu konfigürasyonlar için NASTRAN programında çözüm elde edilmesi ve literatür ile doğrulanması. Bu model kullanılarak yürütülecek parametrik çalışmaların tamamlanması</p>	
<p><b>İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:</b>  <b>5.1. 2-boyutlu konfigürasyon için .bdf dosyalarının hazırlanması</b>  <b>5.2. 2-boyutlu konfigürasyon için analizler gerçekleştirilmesi</b>  <b>5.3. 3-boyutlu konfigürasyon için .bdf dosyalarının hazırlanması</b></p>	<p><b>Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*)</b>  <b>5.1-5.4</b> Doç. Dr. Seher EKEN, YL Bursiyeri 2</p>

<b>5.4. 3-boyutlu konfigürasyon için analizler gerçekleştirilmesi</b> <b>5.5. 2-boyutlu ve 3-boyutlu konfigürasyonlar için parametrik çalışmalar</b>	
<p><b>İP'nin Başarı Ölçütü:</b> Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir.</p> <p>Pervane yalpalama kararsızlık hızı için en fazla % 3 hataya kadar literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmesi. NASTRAN programında pervane aerodinamikleri hesabında kullanılan teorisi için en az bir farklı yaklaşımın adapte edilebilmesi. Örnek olarak DMAP programlaması kullanılarak downwash etkilerinin dahil edilmesi.</p> <p><b>Ara Çıktılar:</b> 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 çıktılara ilişkin bilgi verilir.</p> <p><b>5.1.1</b> 2-boyutlu konfigürasyon için .bdf dosyalarının elde edilmesi (PATRAN kullanımı sınırlı olmakla birlikte, modellerin görsellerinin elde edilmesi için başvurulacaktır)</p> <p><b>5.2.2</b> 2-boyutlu konfigürasyon için pervane yalpalama grafikleri (PATRAN'dan alınma çırpınma modu görseli)</p> <p><b>5.3.3</b> 3-boyutlu konfigürasyon için .bdf dosyalarının elde edilmesi (PATRAN kullanımı sınırlı olmakla birlikte, modellerin görsellerinin elde edilmesi için başvurulacaktır)</p> <p><b>5.4.4</b> 3-boyutlu konfigürasyon için pervane yalpalama grafikleri (PATRAN'dan alınma çırpınma modu görseli)</p> <p><b>5.5.5</b> 2-boyutlu ve 3-boyutlu konfigürasyonlar için parametrik çalışmalardan elde edilmiş grafik ve kıyaslama tabloları</p>	
<b>İP No: 6</b>	<b>İP Adı:</b> Sayısal Model II'nin oluşturulması
<b>İP Hedefi:</b> Sayısal Model II'de akışkan-yapı etkileşimi yöntemleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmesi	
<p><b>İP Kapsamında Yapılacak İşler/Görevler:</b></p> <p><b>6.1.</b> PreCICE bağlaşım kütüphanesi ile birlikte çalışacak OpenFOAM ve MBDyn programları ve özelleştirilmiş adaptörlerinin kurulması</p> <p><b>6.2.</b> 5.1 iş paketinde kurulan sistemin örnek bir simülasyon problemi için çalıştırılması</p> <p><b>6.3.</b> Sayısal Model I'de verilen 2-boyutlu pervane konfigürasyonu akışkan-yapı etkileşim simülasyonlarının gerçekleştirilmesi</p> <p><b>6.4.</b> Sayısal Model I'de verilen 3-boyutlu pervane konfigürasyonu akışkan-yapı etkileşim simülasyonlarının gerçekleştirilmesi</p>	<p><b>Kim(ler) Tarafından Gerçekleştirileceği(*)</b></p> <p><b>6.1-6.4</b> Doç. Dr. Seher EKEN, Dr. Öğr. Ü. Ali EKEN YL Bursiyeri 1, Dr. Bursiyeri</p>
<p><b>İP'nin Başarı Ölçütü:</b> Başarı ölçütü olarak her bir iş paketinin hangi kriterleri sağladığında başarılı sayılacağı ölçülebilir ve izlenebilir şekilde nitel ve/veya nicel olarak belirtilir.</p> <p>PreCICE+OpenFOAM+MBDyn programlarının sorunsuz çalışmaları (örnek bir problem çalıştırılarak denemeler yapılması)</p> <p>2-boyutlu pervane konfigürasyonunda en az 5 düzgün tepelik görece kadar pervane ucu zamana bağlı titreşim grafiğinin elde edilmesi</p> <p>2-boyutlu ve 3-boyutlu pervane konfigürasyonunda en fazla % 7 hataya kadar literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmesi.</p>	
<p><b>Ara Çıktılar:</b> 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 çıktılara ilişkin bilgi verilir.</p> <p><b>6.1.</b> PreCICE+OpenFOAM+MBDyn akışkan-yapı etkileşim simülasyon yazılım altyapısının kurulması</p> <p><b>6.2.</b> Örnek problem için elde edilmiş grafik ve tablolar</p> <p><b>6.3.</b> 2-boyutlu pervane konfigürasyonu için elde edilmiş basınç konturlar, pala ucu deplasmanı zamana bağlı grafikleri</p> <p><b>6.4.</b> 3-boyutlu pervane-kanat konfigürasyonu için elde edilmiş basınç konturlar, pala ucu deplasmanı zamana bağlı grafikleri</p>	

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

### 3.2. Risk Yönetimi

Projenin başarısını olumsuz yönde etkileyebilecek riskler ve bu risklerle karşılaşıldığında projenin başarıyla yürütülmesini sağlamak için alınacak tedbirler (B Planı) ilgili iş paketleri belirtilerek ana hatlarıyla aşağıdaki Risk Yönetimi Tablosu'nda ifade edilir. Projenin araştırma sorusu ve/veya hipoteziyle ilgili yaşanabilecek riskler dikkate alınır. B planının uygulanması projenin temel hedeflerinden ve özgün değerinden sapmaya yol açmamalıdır. B planına geçilmesi durumunda yöntem değişikliğine gidiliyor ise bu durum ayrıntılandırılmalıdır. Risk öngörülme yöntemleri bu bölümde yer almaz.

**RİSK YÖNETİMİ TABLOSU (\*)**

İP No	Risk(ler)in Tanımı	Alınacak Tedbir (ler) (B Planı)
1	Sonlu-kanat etkileri için taşıma eğrisi eğimi ifadesinin öneride sunulan halinin yeterli düzeltme sağlamaması	Bisplinghoff (1983) (BAH) kitabında ampirik yöntemlerle elde edilmiş birçok farklı düzeltme mevcuttur, bunlardan farklı denemeler ile yeterli düzeltmenin yapılması
2	Formülasyon için Mathematica programının EulerEquations komutunun hareket denklemlerini sınır şartlarını vermeden elde etmesi	Programa sınır şartlarını öğretilmesi için ek bir sınıf kod yazılacaktır.
3	Tiltrotor modeli için örnek bir sayısal çalışma bulunmasında sorunlar yaşanması ya da bulunan sayısal çalışmada eksik veri olması	Elde edilemeyen parametreler için uygun bir aralık belirlenerek bu aralıktaki değerler için analizler yapılacaktır.
4	(Not: İş paketi 2'de olduğu gibi denklemlerin çözüm için uygun forma getirilmesi Mathematica programıyla yapılacaktır.) Yalpalama çırpınma çözümleri için de kullanılması planlanan Mathematica programının fazla serbestlik derecesi sebebiyle verimsiz çalışması	Mathematica girdi/çıkırtı dosyasını Matlab programına dönüştüren ara bir program kullanılarak matris sisteminin Matlab programına aktarılması ve çözümlerin Matlab programında yapılması. Dönüştürücü olarak <i>ToMatlab.nb</i> isimli ara işlemci kullanılabilir.
5	(i) NASTRAN programında pervane aerodinamik matrislerinin hesaplanması için kullanılacak ön-işlemci 1989 yılında geliştirilmiş prop.f kodunda artık kullanılmayan ve (obsolete) olmuş ifadelerin varlığı ve bu sebeple çalışmaması (ii) NASTRAN f06 dosyasını okuyup V-g grafiklerini çizdirecek dosya okuyucu geliştirmek konusunda MATLAB programından verim alınamaması (iii) Elastik kanat modeli kurulurken pylon bağlantısı için kullanılacak kartın SOL 145 altında desteklenmemesi (iv) Kanat motor bağlantısı için elastik yay sabitinin belli olmadığı durumlar	(i) Programın bu ifadelerden arındırılarak temizlenmesi, eski FORTRAN satırlarına ihtiyaç yoksa silinmesi (ii) Proje yürütücüsünde mevcut olan benzer nitelikte programın uyarlanması. Program Excel VBA makro kullanılarak hazırlanmıştır. (iii) Desteklenen farklı bir bağlantı elemanı seçimi yapılacaktır. Bağlantı için kullanılan eleman için sistemin dinamik davranışının (frekans ve mod şekillerinin) nasıl etkilendiği incelenecektir. (iv) İterasyon yardımıyla istenen dinamik davranışı verecek geriye dönük bir yay sabiti değer aralığı belirlenecektir.
6	(i) <i>PreCICE</i> bağlaşım kütüphanesi ile birlikte çalışacak <i>OpenFOAM</i> ve <i>MBDyn</i> programlarının kurulumunda ortaya çıkacak problemler (ii) <i>PreCICE+OpenFOAM+MBDyn</i> yazılım altyapısının özelleştirilmiş adaptörlerinin çalıştırılmaması (iii) Akışkan ve yapı çözüm ağlarının ıslak yüzeyde düğümden düğüme çakışmadığı durumda kullanılması planlanan radyal temelli fonksiyon (Radial Basis Function) interpolasyonun hesaplama maliyetinin yüksek olması	(i) Kurulum aşamasında karşılaşılan problemler parça parça çözüldükçe, her bir çözüm ayrıntılı olarak not edilerek bir kılavuz elde edilecektir. (ii) <i>PreCICE</i> 'i geliştiren ekip ile bağlantıya geçilerek ilgili konuda yardım ve bilgi talep edilecektir. Program geliştiricilerinin, kullanıcıların yardım taleplerine cevap verdikleri <a href="https://precice.discourse.group">https://precice.discourse.group</a> web sitesi oldukça efektif ve aktif çalışmaktadır. (iii) Daha düşük maliyetli veri interpolasyon yöntemleri, örnek olarak en-yakın komşu gibi yöntemlerin denenmesi

(\*) Tablodaki satırlar gerektiği kadar genişletilebilir ve çoğaltılabilir.

### 3.3. 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 (\*)**

Kuruluştaki Bulunan Altyapı/Ekipman Türü, Modeli (Laboratuvar, Araç, Makine-Teçhizat, vb.)	Projede Kullanım Amacı
MSC NASTRAN yazılımı	Sayısal Model'in geliştirilmesi için kullanılacaktır.
Mathematica Yazılımı (Lisanslı eski sürüm)	Analitik modeller kapsamında denklem çıkarımları bu program yardımıyla yapılacaktır.
Matlab 2023a Yazılımı (Lisanslı sürüm)	Matris sitemlerin çözümü için kullanılacaktır.

(\*) Tablodaki satırlar gerektiği kadar genişletilebilir ve çoğaltılabilir.



#### 4. YAYGIN ETKİ

Proje başarıyla gerçekleştirildiği takdirde projeden elde edilmesi öngörülen çıktılar, bu çıktıların paylaşımı ve yayılımına yönelik faaliyet(ler)/ürün(ler)/hizmet(ler) ile projeden oluşması öngörülen etkiler kısa ve net cümlelerle ilgili bölümde belirtilmelidir.

##### 4.1. Projeden Elde Edilmesi Öngörülen Çıktılara İlişkin Bilgiler

Bu bölümde, projeden elde edilmesi öngörülen çıktılara yer verilmelidir. Söz konusu çıktılar, amaçlarına göre belirlenen kategorilere ayrılarak belirtilmeli, nicel gösterge ve hedeflere dayandırılmalı ve varsa bu çıktıları kullanacak kurum/kuruluş(lar)a ilişkin bilgi verilmelidir. Her bir çıktının elde edilmesinin öngörüldüğü zaman aralığı belirtilmelidir.

Çıktı Türü	Öngörülen Çıktı (lar)	Çıktının Elde Edilmesi için Öngörülen Zaman Aralığı (*)
<b>Bilimsel/Akademik Çıktılar</b> (Bildiri, Makale, Kitap Bölümü, Kitap vb.):	Projenin sonunda elde edilecek sonuçlar pervane yalpalama kararlılık analizleri konusunda yüksek etkili bilimsel dergilerde makale olarak yayımlanabilecektir. Bunun yanında öncü bulgular ulusal/uluslararası kongrelerde sözlü sunum ve/veya poster olarak da yayınlanabilecektir.	<b>18-24 ay</b>
<b>Ekonomik/Ticari/Sosyal Çıktılar</b> (Ürün, Prototip, Patent, Faydalı Model, Üretim İzni, Tescil, Görsel/İşitsel Arşiv, Envanter/Veri Tabanı/Belgeleme Üretimi, Spin-off/Start- up Şirket vb.):	Proje önerisi turporpop, pistonprop, elektrik-pervaneli ve geleneksel olmayan VTOL tipini kapsayan geniş bir yelpazede hava araçları için pervane yalpalama kararlılık analizlerini gerçekleştiren bir araç grubu sunmaktadır. Bu kapsama giren sertifikasyona tabi bir hava aracı için, proje kapsamında önerilen çözüm araçları kullanılarak pervane yalpalama kararsızlıkları tahmini yapılarak, tasarım aşamasında uçuş zarfından eliminasyonu gerçekleştirilecektir.	<b>24-30 ay</b>
<b>Araştırmacı Yetiştirilmesi ve Yeni Proje(ler) Oluşturulmasına Yönelik Çıktılar</b> (Yüksek Lisans/Doktora/Tıpta Uzmanlık/Sanatta Yeterlik Tezleri ve Ulusal/Uluslararası Yeni Proje vb.):	Önerilen proje, 1 doktora öğrencisi ile 2 yüksek lisans öğrencisinin tez çalışmalarını kapsayacak, dolayısıyla bilim insanı yetiştirmeye katkıda bulunacaktır. Proje verileri ile ilerleyen zamanlarda başka ulusal ve uluslararası projeler oluşturulması da düşünülmektedir. Pervane yalpalama kararlılık analizlerinde tiltrotor modelinin dâhil edilmesi ile ileride burada yapılanlar ışığında yeni ve tiltrotor konseptlere özel farklı proje çalışmaları oluşturulabilecektir.	<b>Proje sonrası</b>

(\*) Proje başlangıcından itibaren 6 aylık süreler halinde belirtilmelidir (Örn. 0-6 ay/6-12 ay/12-18 ay, Proje sonrası vb.).

##### 4.2. Proje Çıktılarının Paylaşımı ve Yayılımı

Proje faaliyetleri boyunca elde edilecek çıktıların ve ulaşılacak sonuçların ilgili paydaşlar ve olası kullanıcılara ulaştırılması ve yayılmasına yönelik yapılacak olan toplantı, çalıştay, eğitim, web sitesi, medya, fuar, proje pazarı ve benzeri etkinlikler aşağıdaki tabloda verilmektedir.

**PROJE ÇIKTILARININ PAYLAŞIMI VE YAYILIMI TABLOSU (\*)**

Etkinlik Türü (Toplantı, Çalıştay, Eğitim, Web Sayfası, Görsel/Yazılı/Sosyal Medya, Fuar, Proje Pazarı vb.)	Paydaş / Olası Kullanıcılar	Etkinliğin Zamanı ve Süresi
Konu ile ilgili bildiri ve poster sunumları	Proje yürütücüsü, araştırmacı bursiyerler	Proje sürecinde toplamda 3 adet toplantı katılımı
Araştırma verilerinin değerlendirildiği toplantı düzenlenmesi	Proje yürütücüsü, araştırmacı bursiyerler	Proje süresince her 6 ayda proje ekibi ile veri paylaşımı

(\*) Tablodaki satırlar gerektiği kadar genişletilebilir ve çoğaltılabilir.

##### 4.3. Projeden Oluşması Öngörülen Etkilere İlişkin Bilgiler

Proje başarıyla gerçekleştirildiği takdirde projeden oluşması öngörülen

- Toplumsal/kültürel etki,

- Ekonomik etki,
- Ulusal Güvenlik etkisi

Proje Başvuru Sisteminde (PBS) seçilen 11. Kalkınma Planı hedefleri ve politikaları çerçevesinde hedef kitle/alan belirtilerek açıklanmalıdır. Beklenen etkiler doğrulanabilir ve ölçülebilir olmalıdır. Etkilerin oluşma zamanına ilişkin öngörüler belirtilmelidir. Önerilen projeden oluşması öngörülen etkiler ile bu etkilerin 11. Kalkınma Planı hedef ve politikalarına sağlayacağı katkılar bu bölümde yapılacak açıklamalar çerçevesinde değerlendirilecektir. Şayet projeden oluşması öngörülen herhangi bir etki ve bu etkilerin 11. Kalkınma Planı hedef ve politikaları ile ilişkisi mevcut değilse bu durum açıkça belirtilmelidir.

Etki Türü	Öngörülen Etki Türü ve Kalkınma Planıyla İlişkisi	Etkinin Oluşması Öngörülen Zaman (*)
<b>Toplumsal/Kültürel Etki:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Yaşam Kalitesine Katkı,</li> <li>Sürdürülebilir Çevre ve Enerjiye Katkı,</li> <li>Refah veya Eğitim Seviyesinin İyileştirilmesine Katkı,</li> <li>Ülke ya da Dünya Düzeyinde Önemli Bir Sosyal Soruna Getirilecek Çözümler vb.</li> <li>Proje Sonuçlarını Uygulayan Kurum/Kuruluş</li> </ul>	Kentsel Hava Hareketliliği (Urban-Air-Mobility) kavramı ile metropol bölgelerde; insanlı veya insansız, elektrik motorlarıyla çalışan pervaneli hava araçları ile güvenli ve verimli hava trafik operasyonlarının yürütülmesi planlanmaktadır. Projemizde, yeni nesil yayılı elektrik motorlu tahrik sistemlerine (Distributed electric propulsion systems) sahip hava araçlarının yalpalama kararsızlıkları üzerine bir çalışma yapılacak olup, elde edilecek çıktılar daha performanslı hava araçlarının tasarımına doğrudan katkı sunacaktır. Ayrıca, kent ulaşımında sürdürülebilir çevre koşullarıyla uyumlu araçların daha verimli hale getirilmesi için katkı sağlayacaktır.	Proje sonrası
<b>Ekonomik Etki:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Potansiyel Sektörel Uygulama Alanları,</li> <li>Küresel Pazar Öngörülleri,</li> <li>İstihdam Katkısı,</li> <li>Rekabetçilik (İhracata Etkisi, İthal İkamesi, Yabancı Sermaye Yatırımının Tetiklenmesi vb.)</li> </ul>	Kentsel Hava Hareketliliği sistemin kurulması halinde 2035 yılında Dünya çapında 30 binden fazla hava aracının görev yapacağı ve 20-40 milyar Dolarlık büyük bir pazara sahip olacağı öngörülmektedir [1]. Projemizde pervane yalpalama kararsızlıklarının tahmini için geliştirilecek araçlar sayesinde bu pazarda yer alacak hava araçlarının daha performanslı ve verimli hale gelmesi sağlanacaktır.	Proje sonrası
<b>Ulusal Güvenlik Etkisi:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Siber güvenlik,</li> <li>Enerji güvenliği,</li> <li>Sınır güvenliği,</li> <li>Gıda güvenliği,</li> <li>Ekonomik güvenlik vb.</li> </ul>	Haritalama, gözetleme ve keşif tarzı görevlere sahip pervaneli hava aracı tasarımlarında yalpalama kararsızlıkları tespiti için kullanılacaktır.	Proje sonrası

(\*) Proje başlangıcından itibaren 6 aylık süreler halinde belirtilmelidir (Örn. 0-6 ay/6-12 ay/12-18 ay, Proje sonrası vb.)

#### BELİRTMEK İSTEDİĞİNİZ DİĞER KONULAR

Sadece proje önerisinin değerlendirilmesine katkı sağlayabilecek bilgi veya veri (grafik, tablo, vb.) eklenebilir.

#### BAŞVURU FORMU EKLERİ

**EK-1: KAYNAKLAR**

**EK-2: BÜTÇE VE GEREKÇESİ**

**EK-3: PROJE EKİBİNİN DİĞER PROJELERİ VE GÜNCEL YAYINLARI** (Proje Başvuru Sistemi (PBS)'ne girilen bilgiler doğrultusunda Sistem tarafından otomatik olarak oluşturulmaktadır.)