

10. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI
18-20 Eylül 2024, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara

UHUK-2024-140

İTKİ YÖNLENDİRME LÜLELERİNİN UÇAK PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

S. Dursun¹, S. Baltacı², S. H. Demir³
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Trabzon, Türkiye

K. Yiğit⁴
Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.
Ankara, Türkiye

Ö. N. Cora⁵
Karadeniz Teknik Üniversitesi,
KTÜ-TUSAŞ İHA Teknolojileri ve Termal Yönetim Sistemleri (İHATERM) Laboratuvarı
Trabzon, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, uçak geliştirme projelerinde uçuş performansının önceden kestirilmesinde kullanılan ölçekli test uçaklarına uygulanabilecek boyutta itki yönlendirme lüle mekanizması tasarımı, analizleri ve mekanizmanın prototip üretimini kapsamaktadır. İtki yönlendirme lüle (Thrust vectoring nozzle) mekanizması, motorun yanma gazlarını istenilen açılarda ve basınçta dışarı yönlendiren, böylece uçağın hareketinin kontrolünü sağlar. Bu çalışmada ilk olarak, mevcut itki yönlendirme lüle teknolojileri ve kullanılan yöntemler incelenmiştir. Ardından mekanik itki yönlendirme kontrolü kullanılarak bir lüle mekanizması tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında, malzeme seçimi, geometrik parametreler ve mekanik bileşenlerin entegrasyonu gibi faktörler dikkate alınmıştır. Tasarımın ardından, ANSYS Fluent programı ile yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen yükler, ANSYS Structural programı ile mukavemet açısından değerlendirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlarla gerekli tasarım optimizasyonları gerçekleştirilmiş ve son ürün prototipi ortaya konmuştur. Ayrıca, uygulanan sayısal yöntemler teorik olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

¹ Lisans Öğrencisi, Makine Mühendisliği, KTÜ, E-posta: 400529@ogr.ktu.edu.tr

² Lisans Öğrencisi, Makine Mühendisliği, KTÜ, E-posta: 394505@ogr.ktu.edu.tr

³ Lisans Öğrencisi, Makine Mühendisliği, KTÜ, E-posta: 394551@ogr.ktu.edu.tr

⁴ Mühendis, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., E-posta: kadirygt99@gmail.com

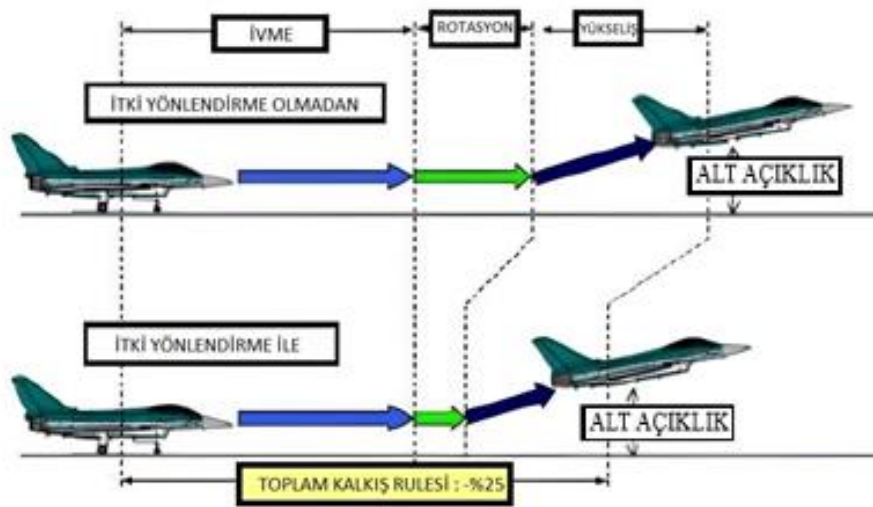
⁵ Prof. Dr., Makine Mühendisliği, KTÜ, E-posta: oncora@ktu.edu.tr

GİRİŞ

İtki yönlendirme mekanizmaları, hava araçlarının hareketini kontrol etmek için motordan çıkan itkiyi yönlendirerek hava aracının yönünü veya açısal hızını kontrol eden mekanizmalardır. Bu mekanizma, hava aracının yüksekliğini, hızını ve manevra kabiliyetini artırarak, düşman ateşi veya diğer tehditlerden kaçınmasına yardımcı olur [1]. Askerî uçakların dikine (VTOL) ve kısa mesafelerde kalkışını da (STOL) sağlayan itki yönlendirme lüleleri, savaş uçaklarının manevra kabiliyetinde özel öneme sahiptir.

İtki yönlendirme lülesinin çalışma prensibine göre farklı tipleri mevcuttur. Bunlar; 1) yanmış gazların mekanik kılavuzlarla saptırılması, 2) lülenin dönüşü ve 3) lülenin iç basınç dağılımının değiştirilmesi olarak sıralanabilir. Bu prensiplerden ilki jet kanatçığı veya jet yönlendiricinin kullanılmasıyla, ikincisi lüleyi hareket ettirerek gazın yönlendirilmesiyle, üçüncüsü ise ikincil akışkan enjeksiyonu (SFI) ile sağlanır [2].

İtki yönlendirme lülesi ile hava aracına farklı özellikler kazandırılabilir. Bu özelliklerden ilki, hava aracının manevra kabiliyetinin artırılmasıdır [1]. Bu sayede, hava aracı daha hızlı dönebilir, daha hızlı yükselip alçalabilir ve daha keskin manevra yapabilir. İkinci özellik, hava aracının düşük hızlarda uçuşuna yardımcı olarak uçağı daha az hava direnciyle uçurabilir ve daha az motor gücü kullanarak havada kalabilir. Üçüncü fayda ise, hava aracının yüksek açısal hızlarda hareketine yardımcı olarak manevra kabiliyetini ve hızını arttırmasıdır. Son olarak, itki vektör kontrolü mekanizmasının radarla tespit edilebilirliğini azaltarak düşman radarları tarafından tespit edilmesi daha zor hale getirilebilir. Ayrıca itki vektör kontrolü kullanılarak uçağın kalkış ve iniş için havalanma ve alçalış süreci hızlandırılabilir [3]. Şekil 1, itki vektör kontrol kullanımının avantajını göstermektedir.

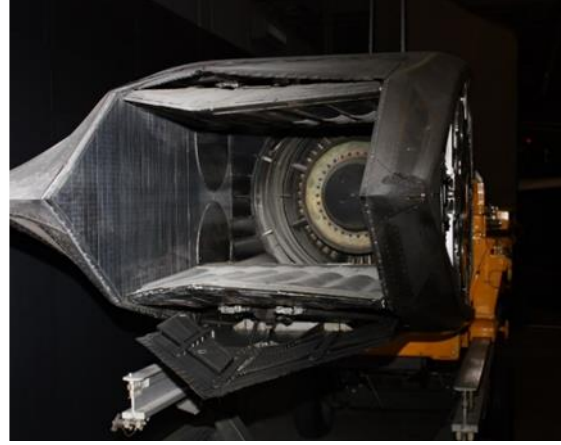


Şekil 1: İtki vektörü lülesi ile azaltılmış kalkış rulesi [3]

İtke yönlendirme lüpleri 2 boyutlu ve 3 boyutlu olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılır. 2 boyutlu itke yönlendirme lüpleri, yönlendirmeyi genellikle yatay düzlemde sınırlı bir şekilde sağlar, bu da sınırlı bir manevra kabiliyetine yol açar. 3 boyutlu itke yönlendirme lüpleri ise daha geniş bir hareket yelpazesi sunarak uçağın daha çevik ve manevra kabiliyetine sahip olmasını sağlar. Ancak, 3 boyutlu sistemler genellikle daha karmaşık ve maliyetlidir. Şekil 2 ve Şekil 3'te farklı lüle kontrol tasarımlarına örnekler verilmiştir. İtke yönlendirme sistemlerinin uçaklar, roket ve füzelerde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bunun temel nedenleri arasında yüksek manevra kabiliyeti ve düşük radar görünürlüğü sağlama özellikleri yer almaktadır [6].



Şekil 2: Dairesel Kesitli İtke Yönlendirme Lülesi
General Electric F101 [4]



Şekil 3: Dikdörtgen Kesitli İtke Yönlendirme Lülesi
Pratt & Whitney F119 [5]

Literatür araştırmaları sonucunda itke yönlendirme mekanizmalarının, hava emişli motorlar üzerinde kullanıldığında bir dizi avantaj sunduğu görülmüştür. Bu avantajlar, özellikle savaş uçakları için, manevra kabiliyetinin artırılması ve savunma kapasitesinin geliştirilmesini içerir. İtke vektör kontrolü, düşük hava hızları ve yüksek saldırı açıları gibi, geleneksel uçuş rejimlerinin ötesinde manevra kabiliyeti ve kontrol sağlar [3].

İtme vektörü teknolojisi, motor tarafından üretilen toplam itme kuvvetinin bir bölümünü aksel hattan sapma yoluyla yönlendirerek yukarıda bahsi geçen avantajları sağlar. Bu yönlendirme, çeşitli uçuş rejimlerinde geliştirilmiş kontrol ve manevra kabiliyetine olanak tanır. Bu teknoloji özellikle savaş uçakları için önemlidir. Bu sayede uçaklar zorlu koşullarda daha etkin şekilde işlev görmekte ve genel performansları önemli ölçüde artırılmaktadır [4].

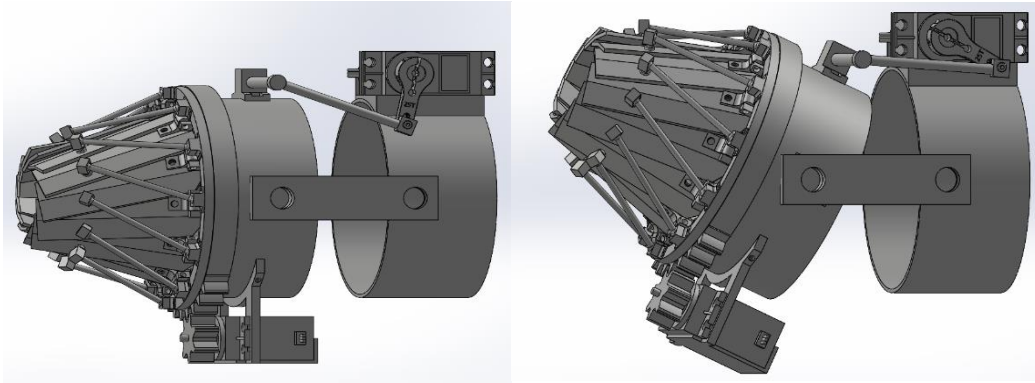
Ölçeklendirilmiş uçuş testleri, itke yönlendirme lüle mekanizmasının aerodinamik performansını, kontrol sistemlerini ve motor işlevlerini değerlendirmek için önemlidir. Bu testler, itke yönlendirme lüle mekanizmasının etkin bir şekilde çalışıp çalışmadığını, ayrıca uçağın tasarlanan manevraları başarıyla gerçekleştirip gerçekleştirmediğini doğrulamak amacıyla yapılır. İtke

yönlendirme lüle mekanizmasının, uçuş esnasında uçağın kararlılığını olumsuz yönde etkilemediğini ve güvenli bir şekilde işlev gördüğünü kanıtlamak bu testlerin bir diğer önemli amacıdır. Bu testler, sistemlerin uygulama aşamasına geçilmeden önceki tasarım ve performans açısından kritik bir değerlendirme aşamasıdır [5].

YÖNTEM

Mekanizmanın Tasarımı

Bu çalışma kapsamındaki itki yönlendirme lüle mekanizması tasarımı Solidworks yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarım için belirlenmiş olan sınır koşullarından bazıları, kullanılan motor özellikleri, mekanizma ağırlığı, lüle hareket aralığı ve tasarımın çalışma hacmidir. Tasarım tercihi yapılırken, lüle mekanizmasının entegre edileceği ölçeklendirilmiş uçuş test uçağının gereksinimleri ve lüle mekanizmalarının birbirlerine göre üstünlükleri göz önüne alınmıştır. Göz önüne alınan bu kriterler sonucunda, alternatiflerin seçimi konusunda avantaj-dezavantaj karşılaştırması yapılarak (trade-off) dairesel kesitli nozzle mekanizması tercih edilmiştir.



Şekil 4: a. Lüle mekanizmasının yönlendirilmemiş durumu b. Lüle mekanizmasının +25° yönlendirilmiş durumu

İtki yönlendirme lüle mekanizması, bir servo motor ile yukarı ve aşağı yönde 25 derece hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, başka bir servo motor kullanılarak lüle mekanizmasının çıkış kesit alanı çapı 53 mm'den 34 mm'ye daraltılabilmektedir.



Şekil 5: a. FDM yöntemi ile üretilen prototip itki yönlendirme lüle mekanizmasının yönlendirilmemiş durumdaki gösterimi b. FDM yöntemi ile üretilen prototip itki yönlendirme lüle mekanizmasının yönlendirilmiş durumdaki gösterimi

Akış Analizleri

Mekanizmanın akış analizi Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Analiz ile itkinin yönlenme performansının değerlendirilmesi, akış türünün incelenmesi ve mekanizmaya etkiyecek basınç değerlerine göre tasarımın optimize edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, tasarımın iç akışını inceleyerek motor itkisinin çeşitli sapma açılarında istenilen yönlendirmeyi sağlayıp sağlamadığını değerlendirilmiştir.

İki boyutlu akış analizinin gerçekleştirilmesi için ANSYS Fluent 2020 R2 yazılımında tasarlanan iç akış modelinin geometrisi yüklendi, egzoz gazlarının davranışını fark edebilecek hassaslıkta ve kalitede mesh tayin edildi.

Analizde çözücü tipi basınca dayalı ve hız formülasyonu mutlak olarak seçilmiştir. Çalışma akışkanı, gaz viskozitesi Sutherland kanununa göre hesaplanan ideal bir gaz seçilmiştir. Daha sonra gerekli sınır koşulları belirlendi, bu koşullar Tablo 1’de verildi.

Tablo1. Uygulanan sınır koşulları

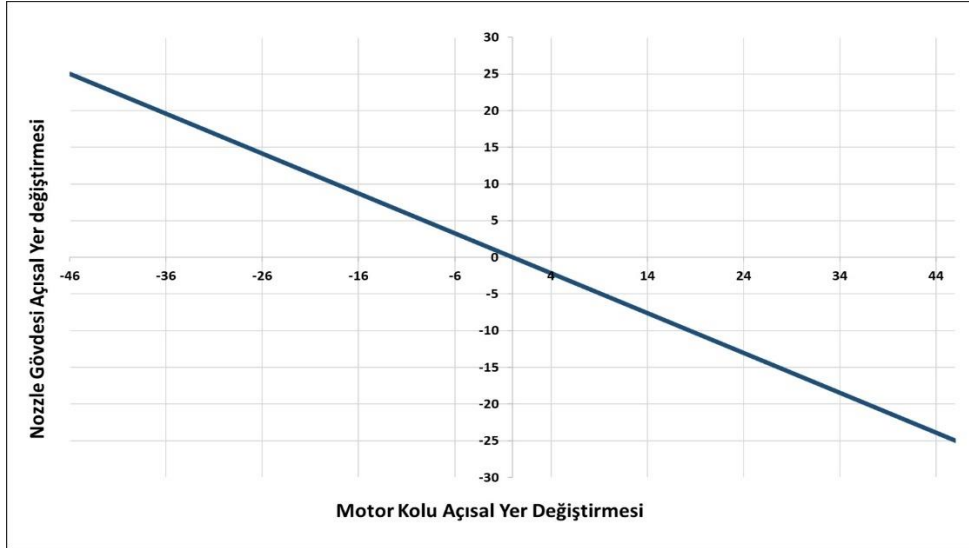
Sınır Koşulları			
Giriş kütle akısı	176,79 kg/sm ²	Çıkış gösterge basıncı	232000 Pa
Giriş sıcaklığı	1023 K	Çıkış sıcaklığı	300 K
Başlangıç süpersonik gösterge basıncı	232000 Pa		

Türbülans modeli olarak ayırma akışını, iç akışı ve jet akışını tahmin etmede son derece etkili olan $k - \omega$ modeli seçilmiştir. Özellikle SST (Shear Stress Transport) $k - \omega$ modeli, duvardan uzaktaki bazı durumlar için $k - \omega$ modelinin tahmin doğruluğunu önemli ölçüde güçlendirir. İç akışı, ayırma akışını, ters basınç gradyanını ve jet akışını kapsayan mevcut sorunlar göz önüne alındığında, SST $k - \omega$ modelinin olduğu literatürde ifade edilmiştir[7]. Çözüm yöntemi olarak bütünleşik(Coupled) analiz yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem daha hızlı yakınsama ve stabilite gerektiren yüksek hızlı ve türbülanslı akış problemleri için uygundur. İstikrarlı bir çözüm elde etme amacıyla yakınsama değerleri $1e-06$ alınmış ve 4000 iterasyona kadar izin verilmiştir. Analiz sonucunda, farklı sapma açıları durumunda Mach sayısı, hız ve toplam basınç kontürleri elde edilmiştir.

Kinematik Analizler

Mekanizma parçalarının hareketlerini ve bu hareketlerin sistemin genel davranışına etkilerini incelemek amacıyla SOLIDWORKS Motion programı ile kinematik analizler yapılmıştır. Mekanizmaların hareket analizinde dinamik, kinematik ve kinetik olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Kinematik, mekanik sistemlerin, noktaların ve cisimlerin hareketlerini, bu hareketleri oluşturan kuvvetleri dikkate almaksızın inceler. Bu bağlamda, kinematik analiz, sistemlerin hız, ivme ve yer değiştirme gibi hareket özelliklerine odaklanır. Kinetik ise, dış etkilerin neden olduğu hareketi inceleyerek bu hareketi sağlamak için gerekli kuvvet ve moment değerlerini analiz eder [8].

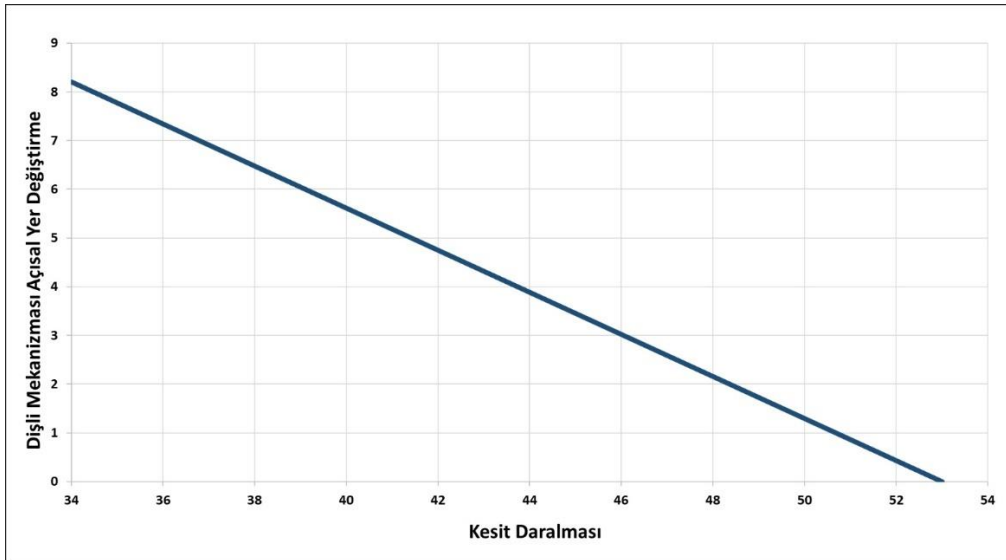
Servo motorlar, genellikle hassas konumlandırma ve hareket kontrolü gerektiren uygulamalarda kullanılır. Bu çalışmada, bir servo motor kolu ve ona bağlı bir lüenin kinematik analizi gerçekleştirilmiştir. Servo motor kolunun belirli bir açıyla döndüğünde lüenin nasıl bir yönlendirme yaptığı incelenmiştir.. Yapılan analiz sonucunda, servo motor kolunun $46,02^\circ$ dönmesiyle lüenin 25° döndüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 6`da detaylandırıldı.



Şekil 6. Servo Motor Kolu Açısal Yer Değiştirme-Nozle Açısal Yer Değiştirme

Bir diğer analizde ise bir dişli mekanizmasının dönüş hareketi ve bu hareketin kesit üzerindeki etkisi incelenmiştir. Servo motoruna bağlı dişlinin belirli bir açıyla döndüğünde, kesitin çapında meydana gelen değişiklik analiz edildi.

Yapılan analiz sonucunda, dişlinin $8,02^\circ$ döndüğünde kesitin 53 mm çaptan 34 mm çapa daraldığı tespit edildi. Bu sonuçlar, aşağıdaki Şekil 7'de detaylandırıldı.



Şekil 7. Dişli Mekanizması Açısal Yer Değiştirme-Nozle Kesit Daralması

Yapısal Analizler

Mekanizmanın dayanıklılığını ve güvenlik seviyesini değerlendirmek için ANSYS Structural programı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Yapısal analiz, yapıların maruz kaldığı yükler altındaki davranışını ve deformasyonlarını hesaplamak için kullanılır. Bu, yapıların güvenli bir şekilde tasarlanması ve inşa edilmesini sağlar.

Termal Analizler

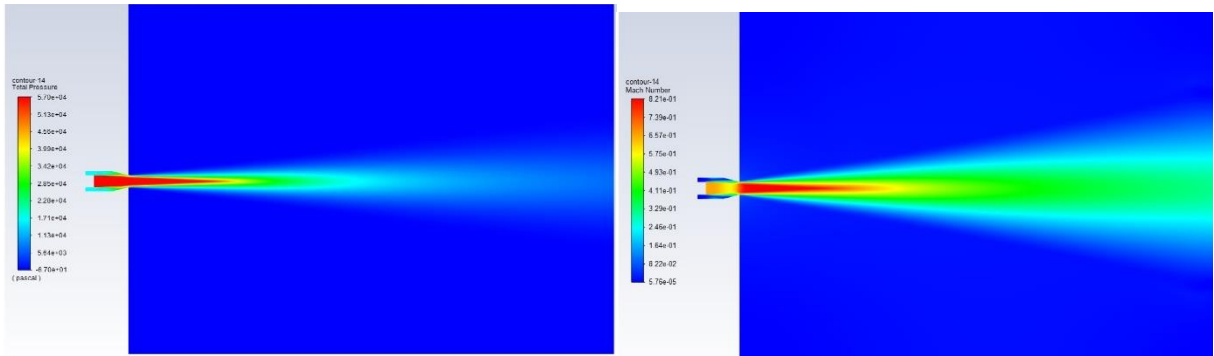
Termal analiz, mekanizma üzerindeki ısı gerilmeleri ve deformasyonları incelemek için gerçekleştirilmiştir.

SONUÇLAR

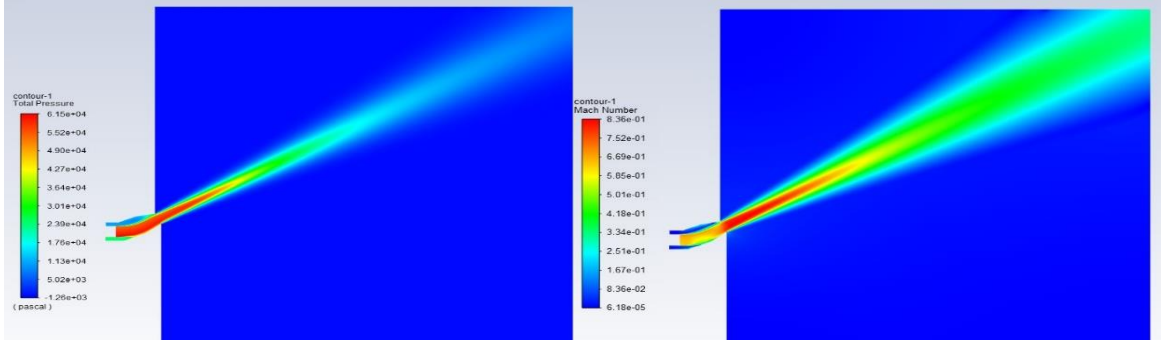
Akış Analizi Sonuçları

Mekanizmanın CFD analizlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 8-9'da verilmiştir. Toplam basınç dağılımı incelendiğinde mekanizmanın çıkış kesit alanının daralması ile birlikte toplam basınç miktarının arttığı gözlemlenmiştir. Böylece motorun daha verimli çalışmasını sağlayacak, uçağın performansına olumlu bir etki gözlemlenmiştir.

Mach sayısı kontürleri incelendiğinde akışkan hızının artmasına bağlı olarak Mach sayısının artış gösterdiği görülmüştür. Böylece TVN mekanizması uçağın daha yüksek hızlara ulaşmasını sağlayarak uçak performansına olumlu etki ettiği belirtilebilir.



Şekil 8: a.Yönlendirilmemiş Durumda Toplam Basınç Dağılımı b. Yönlendirilmemiş Durumda Mach Sayısı Kontürü

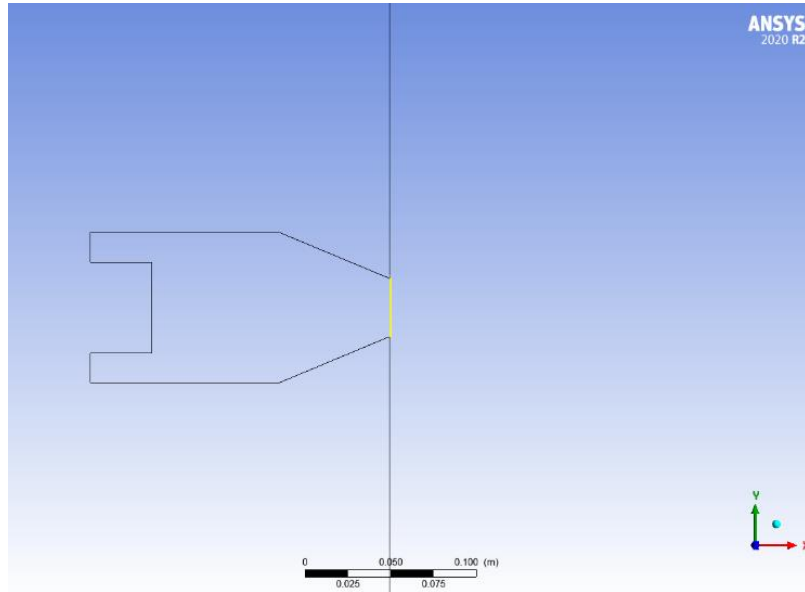


Şekil 9: a. Yönlendirilmiş Durumda Toplam Basınç Kontürü b. Yönlendirilmiş Durumda Mach Sayısı Kontürü

Mekanizmanın kritik sapma açıları için ($\pm 25^\circ$) yapılan CFD analizleri sonucunda ise itkinin istenilen düzeyde yönlendirilebildiği gözlemlenmiştir. -25° ve $+25^\circ$ için yapılan CFD analiz sonuçlarının simetrik olması sebebi ile bu çalışmada sadece $+25^\circ$ için olan CFD sonuçları paylaşılmıştır.

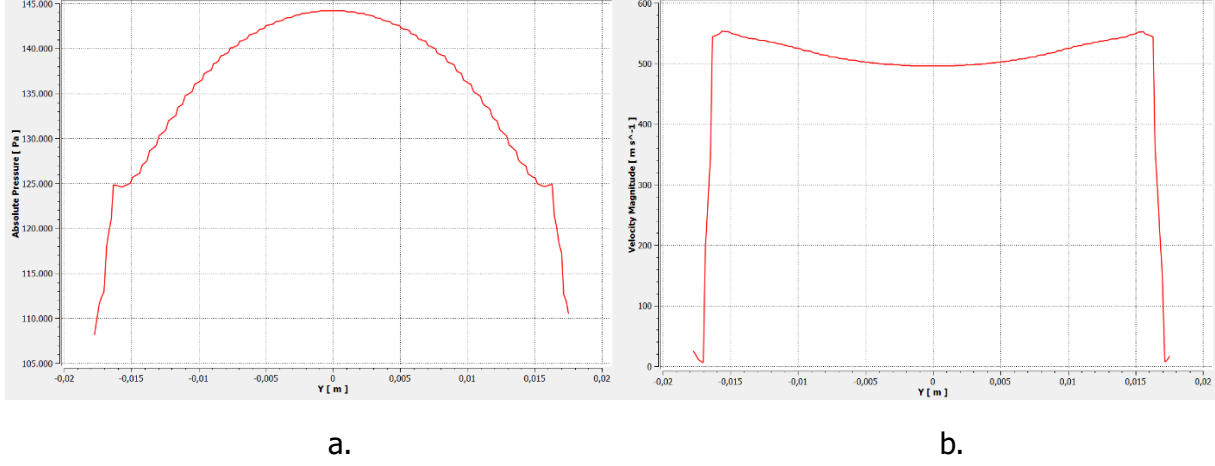
Maksimum İtki Hesabı

ANSYS Fluent programından elde edilen mutlak basınç, x yönünde hız ve yoğunluk değişimleri ile farklı çıkış kesit alanları için itki kuvvetinin değişiminin incelenmesi mümkündür. Yapılan analizlerde lüle mekanizmasının minimum çıkış kesit alanı için maksimum itki durumu incelenmiştir. Tasarımın yönlendirilmemiş ve maksimum itki durumu için çıkış kesit alanı 0.0009079 m^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 10: Lüle çıkışındaki ölçüm referans çizgisi

Şekil 10'da sarı renk ile gösterilen çizgi çıkış kesiti olup, üç farklı parametre için değerlerin alındığı kesittir. Bu kesit, programda 200 parçaya bölünerek, 200 farklı mutlak basınç, yoğunluk ve hız değeri alınmıştır. Şekil 11'de dağılımı verilen değerler Microsoft Excel programına tablo olarak aktarılmış ve ortalamaları alınarak kütsel debi ve itki kuvveti hesaplanmıştır.



Şekil 11: a. Lüle çıkışındaki mutlak basınç dağılımı b. Lüle çıkışındaki hız dağılımı

İtki Hesabı:

$$F = \dot{m} * V_{ort} + P_{ort} * A$$

\dot{m} : motor verisinden alınan girişteki kütle debisi

V_{ort} : lülenin çıkış alanındaki ortalama hız değeri

P_{ort} : lülenin çıkış alanındaki ortalama mutlak basınç değeri

A : lülenin çıkış kesit alanı

$$F = 0,39 * 489 + 135000 * 0,002206 = 488,52 N$$

Yapılan akış analizleri kritik çıkış kesit alanı için yapılmış olup, çıkış kesit çapının en küçük değeri 34 mm'dir. Bu kritik çap değeri ile yapılan CFD analizleri sonucunda Mach sayısının yaklaşık olarak 1,2 değerini aldığı ve akışın süpersonik bölgeye geçtiği anlaşılmıştır. Akışın süpersonik bölgeye geçmesi lüle içinde basınçta ani artışlara ve şok dalgası oluşmasına neden olabileceği için jet motorunun maksimum itkide kullanılması durumunda çıkış kesit çapının maksimum kaç olabileceği aşağıda verilen hesaplamalar ile belirlenmiştir.

Yoğunluk kontrolü;

$$P = \rho * R * T$$

$$101325 = \rho * 287 * 1023$$

$$\rho = 0,345 \text{ kg/s}$$

Giriş hızının hesaplanması;

$$\dot{m} = \rho * V * A$$

$$0,39 = 0,345 * V * 0,002206$$

$$V = 512,4 \text{ m/s}$$

Mach sayısına göre çıkış kesit alanı hesabı;

$$a^* = \sqrt{\gamma * R * T} = \sqrt{1,4 * 287 * 1023} = 641,125 \text{ m/s}$$

$$M = \frac{V}{a^*} = \frac{512,4}{641,125} = 0,79$$

İzantropik akış özellikleri tablosundan;

$$M \rightarrow \frac{A}{A^*}$$

$$1,0425 = \frac{0,002206}{A^*}$$

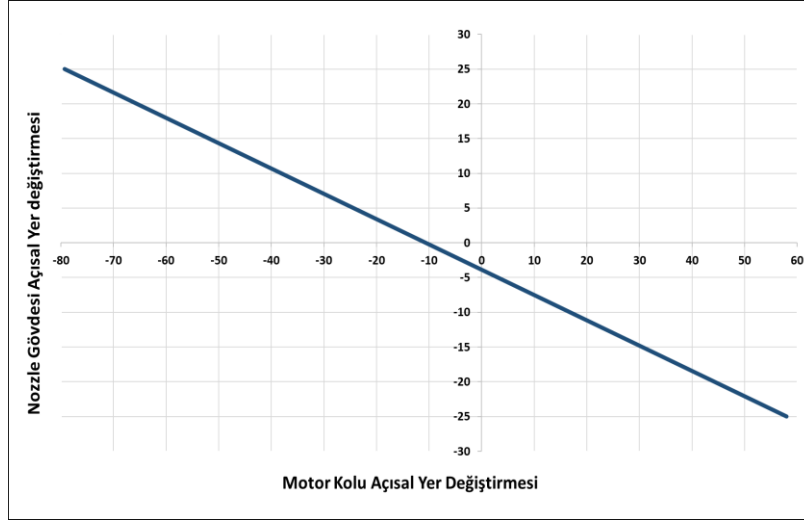
$$A^* = 2,116 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D^* = 0,0519 \text{ m} = 51,9 \text{ mm}$$

Hesaplamalar sonucunda jet motorunun maksimum itkide kullanılması durumunda lülenin çıkış kesit çapı en küçük 51,9 mm değerini alabileceği belirlenmiştir.

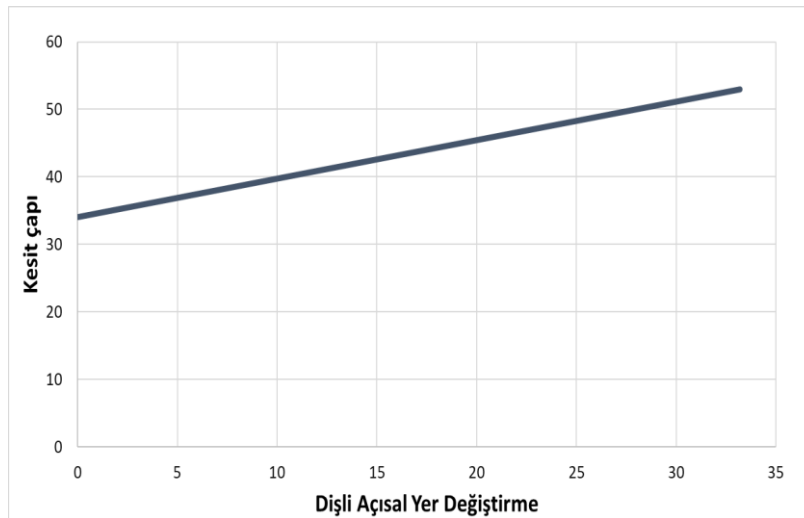
Kinematik Analiz Sonuçları

İlk olarak bir servo motor kolu ve ona bağlı lüle mekanizmasının kinematik analizi gerçekleştirildi. Yapılan analiz sonucunda, servo motor kolu $79,31^\circ$ yer değiştirdiğinde lüle mekanizmasının yukarı yönde 25° yer değiştirdiği, $57,96^\circ$ yer değiştirdiğinde ise lüle mekanizmasının aşağı yönde 25° yer değiştirdiği görülmüştür.



Şekil 12: Servo motor kolu -Lüle açısız yer değıştirme değışimi

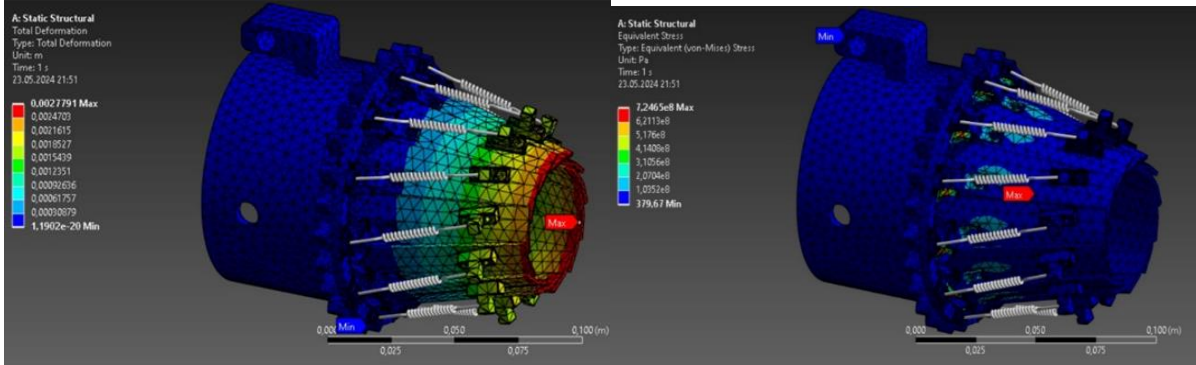
Ayrıca lüle mekanizmasının çıkış kesit alanının 53 mm çaptan 34 mm çapa daraltmak için kullanılan servo motorun dişli mekanizmasının kinematik analizi yapılmıştır. Kinematik analizin sonucunda dişli mekanizmasının derece başına ne kadar daraldığı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre istenilen daralma hareketinin gerçekleştiği görüldü.



Şekil 13: Dişli Mekanizması Açısız Yer Değıştirme - Lüle Kesit Daralması

Yapısal Analiz Sonuçları

Şekil 14'de verilmiştir.



a.

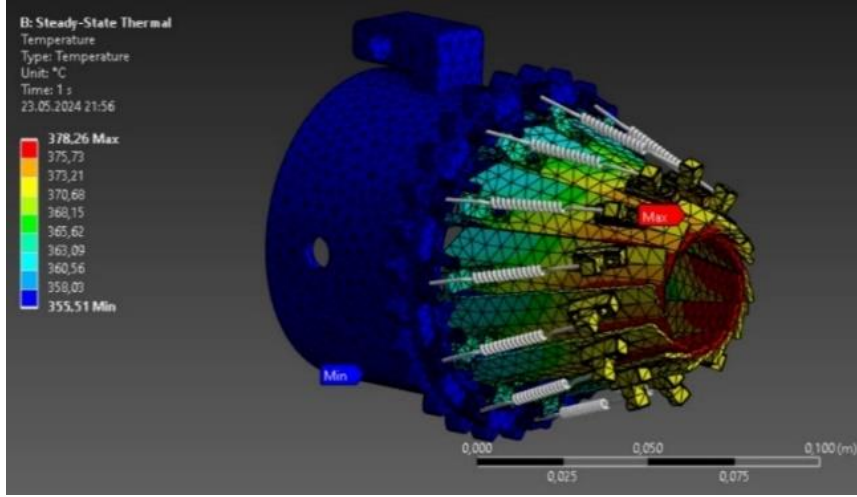
b.

Şekil 14: a. Lülenin +25° yönlendirildiği durum b. Lülenin -25° yönlendirildiği durum

Yapılan analizler sonrasında toplam deformasyon 2.78 mm olarak elde edilmiştir. Elde edilen maksimum toplam deformasyon değeri sistemde gözlemlenen deformasyonlar ihmal edilebilir seviyededir ve güvenli aralıklar içinde kalmaktadır. Analizler, mekanizmanın yük altında bile yapısal bütünlüğünü koruduğunu ve kritik bileşenlerde herhangi bir aşırı gerilme veya deformasyon olmadığını göstermektedir. Bu durum, itki yönlendirme lüle mekanizmasının uzun ömürlü ve güvenilir bir performans sergileyeceğini işaret etmektedir. Ayrıca, malzeme seçimlerinin ve tasarımın, yüksek gerilme altında bile deformasyonları minimize edecek şekilde optimize edildiği görülmektedir.

Isıl Analiz Sonuçları

Analizlerde, iç kısımdaki sıcaklığın 700 °C, dış kısımdaki sıcaklığın ise 20 °C olduğu varsayılmıştır. Buna ek olarak, silindirik geometrisinde doğal taşınım yoluyla gerçekleşen hava akışı dikkate alınmıştır. Lüle mekanizmasının düz yönlendirilmiş durumu için maksimum sıcaklık dağılımı Şekil 15'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 15: Lüle yönlendirilmemiş durumda iken sıcaklık dağılımı

Isıl analiz sonuçlarına göre, en yüksek sıcaklık artışı kanatçık uçlarında gözlemlenmiştir. Bu bölgelerdeki ısınma, malzeme yorgunluğu ve potansiyel deformasyon riskini artırabilir. Literatürde, bu tür yüksek sıcaklık bölgelerinde yüzey işlemlerinin uygulanmasının, ısıl dayanımı artırabileceği ve malzeme ömrünü uzatabileceği belirtilmektedir. Özellikle, ısıl bariyer kaplamaları (thermal barrier coating) ve ileri seramik kaplamalar, kanatçık uçlarının ısıl dayanımını artırmak için etkili yöntemler olarak kullanılmaktadır.

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, 2 boyutlu itki yönlendirme mekanizmasının ANSYS Fluent yazılımı ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler ile $+25^{\circ}$, 0° , -25° sapma açılarında mekanizmanın performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler ile Mach sayısı, hız, statik basınç, toplam basınç ve toplam sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar mekanizmanın her bir bileşenine etkiyen yükü, itkinin yönlenme performansını ve akışın türünün incelenmesine olanak tanımaktadır.

Dünyada itki yönlendirme lüle mekanizmalarının farklı modelleri üzerine çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada kullanılan tasarım, Lockheed Martin'in F-22 Raptor ve F-35 Lightning II, Sukhoi'nin Su-30MKI, Su-35 ve Su-57 ile Eurofighter GmbH'nin Eurofighter Typhoon [9] gibi önde gelen modellerinden esinlenerek gerçekleştirilmiştir. Böylece, dünya çapında kullanılan

ileri düzey itki yönlendirme teknolojileri incelenmiş ve ülkemizdeki savunma sanayi ve havacılık teknolojilerinin gelişimine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

ANSYS Fluent kullanılarak gerçekleştirilen itki yönlendirme lüle mekanizmasına yönelik CFD analizleri, hesaplama kabiliyetlerinin kısıtlı olması nedeniyle 2 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, düşey doğrultu için doğrulayıcı ve güvenilir sonuçlar sağlamış olup, projeye önemli katkılar sunmuştur. Ancak, 3 boyutlu CFD analizlerinin gerçekleştirilmesi, daha doğru ve gerçekçi sonuçlar elde edilmesine olanak tanıyacaktır [10].

Yapılan CFD analizleri sonucunda, kesit alanının daralmasıyla Mach sayısının 1'i aşarak süpersonik akışın gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, mekanizma içinde şok dalgası oluşmaması için jet motorunun gaz ayarlarının dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi ve optimize edilmesi, şok dalgası oluşumunu engelleyerek mekanizmanın verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasının sağlanması gerekmektedir.

Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalar kapsamında, 3 boyutlu CFD analizlerinin yanı sıra, deneysel çalışmaların da yapılması önem arz etmektedir. Deneysel veriler, CFD analizlerinin doğrulanmasına yardımcı olacak ve daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 2023-2024 TUSAŞ LIFT UP Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Projeleri Programı kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

1. Gal-Or, B. Vecteded Propulsion, Supermaneuverability and Robot Aircraft; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1990.
2. B. Söğütçü, "Experimental and numerical investigation of a jet vane of thrust vector control system," Thesis (M.S.) -- Graduate School of Natural and Applied Sciences, Aerospace Engineering, Middle East Technical University, 2019.
3. Ikaza, D. Thrust vectoring nozzle for modern military aircraft. In Proceedings of the 22nd Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, Harrogate, UK, 27 August–1 September 2000.
4. <https://www.artofit.org/image-gallery/111604897006210537/russia-s-lean-mean-su-57-ready-to-take-on-f-35/>
5. <https://www.flickr.com/photos/kordite/4914117324>
6. N. Atik ve S. Gürkan, "İtke Vektörünün Doğrusal Kontrolünde Uçuş Yolu Takip Başarımının İncelenmesi", Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 9, sy. 2, ss. 334–346, 2023.
7. Bridgman, Leonard, ed. (1958). Jane's All the World's Aircraft 1958-59. London: Jane's All the World's Aircraft Publishing Co. Ltd. pp. 258–259.
8. ÖZKAN, Barış. "Mekanizmaların Kinematik Parametrelerinin Belirlenmesinde Farklı Yöntemlerin Uygulanması." Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği, 2023.
9. Afridi, S., Khan, T. A., Shah, S. I. A., Shams, T. A., Mohiuddin, K., & Kukulka, D. J. (2023). *Techniques of fluidic thrust vectoring in jet engine nozzles: A review. Energies, 16*, 5721.

10. Ikaza, D. (2000). Thrust vectoring nozzle for modern military aircraft. In
*Proceedings of the 22nd Congress of International Council of the Aeronautical
Sciences*. Harrogate, UK: International Council of the Aeronautical Sciences.