## EJEKTÖR SİSTEMİNDE KULLANILAN LOPLU LÜLE GEOMETRİSİNİN "k-ω SST" TÜRBÜLANS MODELİ İLE ÇÖZÜMÜNÜN DOĞRULANMASI VE LOP SAYISININ PERFORMANS ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Akay Bayat<sup>1</sup> ve Mustafa Perçin<sup>2</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği, ANKARA

# ÖZET

Ejektör sistemi yüksek hızda jet akışının bulunduğu bölgede ikincil bir akış oluşturarak sıcak bölgenin soğutulmasını sağlayan bir sistemdir. Bu çalışmada helikopter motor bölgesinin soğutulması için kullanılan bir ejektör sisteminde loplu lüle geometrisindeki lop sayısının performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlgili bölgenin soğutulmasında kullanılan sistemde yer alan lülenin lop sayılarının değiştirilmesiyle sistem tarafından çekilen ikincil akış miktarı ve oluşan karşı basınç değerleri karşılaştırılmıştır. Üç boyutlu sayısal akış alanı hesaplamalarında kullanılacak "k- ω SST" türbülans modelinin doğrulanması için ise literatürde bulunan deney sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmış ve türbülans modeli doğrulanmıştır.

## GİRİŞ

Ejektör sisteminde Şekil 1'de gösterildiği gibi türbinden çıkan yüksek hızlı hava kompartman etrafında bulunan havayı soğutma kanalları aracılığı ile vakumlar. Oluşturulan bu ikincil akış motor ekipmanlarının etrafından geçerek motorun soğutulmasını sağlar. Bu sistemde kullanılan merkezi gövde, lüle ve karışım kanalının tasarımı sistemin verimi açısından önemli rol oynar. Karışım kanalının parametrelerinde değişiklik yapmak helikopter bazında pek mümkün olmadığı için sistemin veriminde belirleyici parametreler lüle ve merkezi gövdedir.





<sup>1</sup>Yüksek Lisans Öğrencisi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, E-posta: e174336@metu.edu.tr

<sup>2</sup> Yardımcı Doçent Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, E-posta : mpercin@metu.edu.tr

Merkezi gövde türbine bağlandığı için giriş çapı motorun türbininde bağlanacağı yer ile aynı olmalıdır ve sabittir. Bu sebeple merkezi gövdenin sadece çıkış çapı ve boyu değiştirilebilir.

Lüle ise diğer iki ekipmandan farklı olarak şekil ve parametreler açısından büyük oranda bağımsızdır. Bu parametrelerde değişiklik yapılarak sistem için en uygun model bulunur. Yang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 5 farklı tip lüle şekli karşılaştırılmış, soğutma ve basınç düşüşü açısından en verimli geometrinin loplu geometri olduğu gözlemlenmiştir [Yang, Long ve Yao, 2012].

Optimizasyonu yapılacak ejektör sisteminin verimliliği açısından en önemli kıstas soğutma kanalından çekilen hava miktarıdır. Çünkü elde edilen bu ikincil akış ne kadar çok olursa egzoz çıkışını soğutmak için o derece iyi bir karışım elde edilecektir [Zhiqiang ve diğerleri, 2015]. Soğutma kanalından çekilen ikincil akış miktarı akış motor ekipmanlarının dayanabileceği maksimum sıcaklık değerleri kullanılarak belirlenecektir. Optimizasyonda kullanılacak bir diğer önemli kıstas ise türbin çıkışında oluşan karşı basınçtır. Çünkü oluşan bu karşı basınç güç türbindeki genişleme oranını düşürerek türbinden elde edilen gücün azalmasına sebep olacaktır [Kumar ve diğerleri, 2007]. Bu karşı basınç ne kadar düşük olursa motor verimi o derecede yüksek olacaktır.

Václav Dvořák tarafından gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında, loplu lüle yapısı lüle sayısı, lüle çıkış çapı ve lop yüksekliği açısından incelenmiştir [Dvořák, 2007]. Ancak bu çalışmada lülenin soğutma kanalından çektiği ikincil akış tek kriter olarak seçilmiştir ve türbin kanatlarının sebep olduğu burgaç değeri analizlere katılmamıştır. Bu çalışma sonucunda düşük lop sayısına ve lop yüksekliğine sahip lülenin soğutma hava akımını arttırdığı gözlenmiştir. Lüle çıkış alanını belirleyen eşdeğer çap değeri ise optimizasyon boyunca fazla değişmemiştir.

Yukarıda da bahsi geçen ejektör sisteminin lüle geometrisinde yaklaşık 7 parametre vardır ve bu parametreler birbirleriyle etkileşimli olarak sistem performansını etkilemektedir. Bu sebeple optimum lüle modelini elde edebilmek için bu 7 parametre eş zamanlı bir şekilde değiştirilerek sistem performansı değerlendirilmelidir. Bu amaçla "Python" üzerinde yazılan bir kod ile motor kompartıman geometrisi "CATIA' da modellenip, "Pointwise" ile bu geometri için çözüm ağı oluşturulacaktır. "Ansys Fluent" yardımıyla sistemin akış analizi yapılacak ve elde edilen sonuçlar "Python" programı içerisindeki optimizasyon modülü kullanılarak, en uygun lüle geometrisi bulunana kadar belirtilen basamaklar tekrar edilecektir. Çalışmanın şimdiye kadar tamamlanan kısmında ise performansı belirleyen parametrelerden biri olan lop sayısının sisteme etkisi türbin çıkışında verilen burgaç değeri ile analiz edilip ikincil akış değeri ve karşı basınç açısından incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilecek sonuçlar optimizasyon kodu sonucunda elde edilecek sonuçların doğrulanmasında kullanılacaktır.

# YÖNTEM

Bildirinin bu bölümü iki ana başlıktan oluşmaktadır. Birinci kısımda kullanılan türbülans modelinin deney sonuçları ile doğrulanması yapılmıştır. İkinci bölümde ise yeni oluşturulan geometri ile farklı lop sayılarına sahip ejektör sisteminin akış analizleri yapılıp giriş bölümünde belirtilen kıstaslara göre bu geometrilerin verimliliği karşılaştırılmıştır.

# K- ω SST TÜRBÜLANS MODELİNİN DOĞRULANMASI

Analizlerde kullanılacak "k-ω SST" türbülans modelinin doğrulanması için Hu ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu loplu lüle deneyi analiz edilmiş ve lüle çıkışında belirli noktalar içi elde edilen hız vektörleri ve maksimum girdap değerleri karşılaştırılmıştır [Hu, Saga ve Kobayashi, 2005].

### Geometri

Doğrulaması yapılacak olan deneyde Şekil 2'de yer alan lüle modeli kullanılmıştır. Modelde lop genişliği 6 mm, yüksekliği ise 15 mm'dir. Şekilde görülen iç penetrasyon ve dış penetrasyon açıları sırasıyla 25° ve 14°' dir. Lüle çapı ise 40 mm'dir.



Şekil 2 : Doğrulaması yapılan loplu lüle geometrisi [Hu, Saga ve Kobayashi, 2005]

### Çözüm Ağı ve Analiz

Hesaplamalarda yaklaşık olarak 7 milyon hücre içeren 12 bloktan oluşan bir çözüm ağı kullanılmıştır. Şekil 3'de çözüm ağının oluşturulmasında kullanılan geometri ve lüle yüzeyinde oluşturulan çözüm ağı gösterilmiştir. Kullanılan türbülans modeline uygun olarak, duvar yakınında y+ değerini 1' in altında sağlayacak şekilde ilk duvar boşluğu 0.01 mm olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3 : Lüle geometrisi ve oluşturulan yapısal çözüm ağı

Testi yapılan deneyde kullanılan serbest akım koşulları sayısal hesaplamalarda aynen kullanılmış ve lüle sistemini çevreleyen büyük silindirin yüzeylerine uygulanmıştır. Serbest akış sıcaklığı ve statik basıncı sırasıyla 388 K ve 101325 Pa olarak alınmıştır. Lüle çıkış yüzeyindeki sınır şartı 20 m/s olan serbest akış hızı olarak belirlenmiştir.

Akımı yöneten süreklilik, momentum ve enerji denklemleri vektörel formda aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . \left( \rho \vec{V} \right) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \vec{g} + \nabla \tau - \nabla P - \rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \nabla (\vec{V} \cdot \vec{V}) \right) = 0$$
<sup>(2)</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \rho E \vec{V} + \nabla (-k\nabla T) + \nabla \cdot (p\vec{V}) - \nabla \cdot \tau \vec{V} = 0$$
(3)

Burada  $\rho$ , V, T, p, E, t,  $\tau$ , k sırasıyla yoğunluk, hız vektörü, sıcaklık, basınç, toplam enerji, zaman, gerilme tensörü ve ısıl iletkenliği temsil etmektedir.

Hesaplamalarda sonlu hacimler yöntemiyle çözüm yapabilen "Ansys Fluent" yazılımı kullanılmıştır. Bu denklemlerin çözümü iki denklemli bir türbülans modeli olan "k- ω SST" modeli kullanılarak yapılmıştır.

#### Elde Edilen Sonuçların Deney Sonuçları ile Karşılaştırılması

Sayısal analiz ile elde edilen lüle çıkışından farklı mesafelerdeki (z/D) yüzeylerde elde edilen hız dağılımı ve hız vektörleri, test sonuçları ile karşılaştırılmış ve Şekil 4' te verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere hız vektörleri ve dağılımlar büyük oranda benzerlik göstermektedir.



#### (a) PIV z/D = 0.5

### PIV z/D = 1







Şekil 5'de ise deney ve sayısal çözümdeki, lüle çıkışından farklı mesafelerdeki (z/D) yüzeylerde elde edilmiş maksimum azimut girdap değerlerinin değişimini gösteren grafik yer almaktadır. Lüle çıkışındaki bazı noktalar haricinde, sayısal analiz maksimum azimut girdap değeri açısından kabul edilir sonuçlar vermiştir. Bu girdap değerleri aşağıda görüldüğü gibi hesaplanmaktadır;

$$\omega_x = \frac{D}{U_0} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \tag{6}$$

$$\omega_y = \frac{D}{U_0} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \tag{7}$$

$$\omega_{azimut} = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \tag{8}$$

Bu denklemlerde, D lüle çapını,  $U_0$  lüle içindeki akışın ilk hızını, u, v ve w akışın sırası ile x,y ve z yönündeki hızlarını göstermektedir.





Yukarıdaki şekillerde elde edilen sonuçlar ile kullanılacak olan "k- ω SST" türbülans modeli doğrulanmış olup, ejektör sisteminin analizlerinde kullanmaya uygun görülmüştür.

# FARKLI LOP SAYILARININ EJEKTÖR PERFORMANSINA ETKİLERİ

Bu bölümde, bir önceki bölümde doğrulaması yapılan "k- ω SST" türbülans modeli kullanılarak, sırası ile 6, 8 ve 10 lop sayılarına sahip 3 farklı lülenin ejektör sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## Geometri

Analizlerde kullanılan ejektör sisteminin örnek bir gösterimi sekiz loplu lüle için Şekil 6' da verilmiştir.



Şekil 6 : 8 Loplu lüle ile oluşturulan ejektör sistemi

5 Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı

Loplu lüle geometrisinin modelinde kullanılan parametreler ise şekil 7' de gösterilmiştir.



Şekil 7 : 8 Loplu lüle geometrisi

# Çözüm Ağı ve Analiz

Şekil 8'de ejektör sisteminde oluşturulan çözüm ağı y ekseninde kesit alınarak gösterilmiştir



Şekil 8 : Ejektör sisteminin analizinde kullanılan çözüm ağının y ekseninde kesit alınarak gösterimi 6

Hesaplamalarda yaklaşık olarak 6 milyon hücre içeren 2 bloktan oluşan bir çözüm ağı kullanılmıştır. Lüle etrafında akışın hız değişimi yüksek olduğu için bu bölgelerde daha sıkı bir çözüm ağı kullanılmıştır ve bu kullanım şekil üzerinde gösterilmiştir. Kullanılan türbülans modeline uygun olarak, duvar yakınında y+ değerini 1' in altında sağlayacak şekilde ilk duvar boşluğu 0.01 mm olarak ayarlanmıştır.

Analizde kullanılacak sınır şartlarını belirlemek için GE T700 motorunun verileri kullanılmıştır. Kullanılan sınır şartları aşağıdaki tabloda belirtilmiştir [Gianluigi Alberto Misté ve Ernesto Benini, 2012].

Sınır Şartı İsmi	Toplam Basınç (Pa)	Toplam Sıcaklık (K)	Kütle Akış Hızı (kg/s)
Türbin Çıkışı	-	884	4,6
Soğutma Kanalı	95891	289	-
Egzoz Çıkışı	95891	289	-

Tablo 1: Ejektör sisteminin analizinde kullanılan sınır şartları

Bunlara ek olarak, loplu lüle geometrisinin etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek açısından türbin çıkışındaki akışa 300 rad/s değerinde bir burgaç değeri tanımlanmıştır.

## SONUÇLAR

Bir önceki bölümde anlatıldığı şekilde çözüm ağı oluşturulan farklı lop sayısındaki modeller, belirlenen türbülans modeli ile analiz edilmiştir. Elde edilen türbin çıkış basınç kaybı ve soğutma kanalı kütle akış hızı değerleri Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2: Farklı lop sayılarına sahip ejektör sistemlerinin soğutma kanalı kütle akış hızı, türbin çıkış basınç kayıp değerleri ve ortalama egzoz çıkış sıcaklıkları

Lop Sayısı	Lüle Çıkış Alanı (mm²)	Soğutma Kanalı Kütle Akış Hızı (kg/s)	Türbin Çıkış Basıncı (Pa)	Türbin Çıkış Basınç Kaybı (%)	Ortalama Egzoz Çıkış Sıcaklığı (K)
6	92057	1,682	98364	2,51	504
8	104366	1,552	98816	2,96	622
10	110325	1,457	98637	2,78	611

Yukarıdaki tabloda verilen değerlere göre, soğutma kanalından elde edilen en fazla akış 6 lop sayısına sahip model için elde edilmiştir. Bu değer lop sayısı arttıkça azalmaktadır. Çünkü lop sayısı arttıkça lüle çıkış alanı artıp lüle çıkışında oluşan akışın statik basıncının artmasına sebep olmaktadır. Bu da lülenin emme gücünü azaltmaktadır. Ayrıca lüle sayısı arttıkça lüle çıkış alanı daire şekline yaklaşıp lopların türbin çıkışında oluşan burgaç değerinin düşürebilme etkisini azaltmaktadır. Bu da türbin çıkışındaki girdaplı akışın düzeltilememesine ve soğutma kanalından çekilen akış miktarının azalmasına sebep olmaktadır.

Türbülans modelinin validasyonu sırasında bahsedilen girdap değeri yöntemi ile sistem üzerinde farklı bölgelerden girdap değerleri elde edilip aşağıdaki şekilde karşılaştırmaları gösterilmiştir.



Şekil 9: 3 farklı sistem için elde edilen girdap değerlerinin lüle çıkışından sonraki değişim grafikleri

Beklenildiği üzere düşük lop sayısına sahip sistemler için ortalama girdap değerleri daha düşüktür. Çünkü türbin çıkışında oluşan burgaçlı hava daha düz bir hale getirilebilmiştir ve bu da girdap değerini düşürmüştür. Ayrıca egzoz borusu üzerinde ilerledikçe lüle çıkışındaki akışın etkisinin artmasından dolayı akış daha düzenli hale gelmiştir ve bu da girdap değerinin daha da azalmasını sağlamıştır.

Türbin basınç kayıplarında ise bir önceki durumda olduğu gibi 6 loplu sistemde elde edilen değerler daha başarılıdır. Ancak türbin çıkışında oluşan karşı basınç değeri lop sayısı arttıkça sürekli bir artış veya azalış göstermemektedir.

Sistem için önemli bir çıktı olan egzoz çıkış sıcaklığı en düşük 6 loplu sistem için elde edilmiştir. Bu ortalama sıcaklık değerinin sistem tarafından soğutma kanalından çekilen akış ile doğrudan ilişkisi vardır. Bu akış miktarı ne kadar çok ise egzoz çıkışında o derece soğutulmuş bir akış elde edilir. Ancak bu durum 8 loplu sistem için bir farklılık göstermektedir. İkincil akış miktarı 10 loplu sistemden fazla olmasına karşın ortalama egzoz sıcaklık değeri az bir farkla daha yüksektir. Bunda lüle çıkışı ile ejektör arasında kalan alanın etkisi olduğu düşünülebilir. Bu alan ne kadar dar olur ise sistemin çektiği ikincil akış değeri o derece azalır. Ancak ikincil akışın geçtiği bu alan daraldığı için hızının artmasına ve girdaplı bir akış oluşturarak enerjisinin daha çok azalmasına sebep olacaktır. Bu da akışın sıcaklığının daha çok azalmasına sebep olur.

Lop sayısının akış üzerinde etkilerini daha iyi görebilmek için farklı lop sayılarında analizi yapılan ejektör sisteminin lüle çıkışından itibaren çeşitli noktaları için elde edilen hız profilleri aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 10 : Lüle çıkışının 30 mm ilerisi için hız profilleri, sırası ile 6, 8 ve 10 loplu çözümler için



Şekil 11 :Lüle çıkışının 250 mm ilerisi için hız profilleri, sırası ile 6, 8 ve 10 loplu çözümler için



Şekil 12 : Egzoz çıkışında alınan hız değerleri, sırası ile 6, 8 ve 10 loplu çözümler için

Lüle çıkışının hemen sonrasında alınan hız şekillerine bakıldığı zaman lop sayısı azaldıkça loplu yapının etkisi daha iyi gözlemlenebilmektedir. Şekil 10' a bakıldığı zaman egzoz duvarlarına yakın bölgelerde 6 ve 8 loplu sistemler için, lop çıkışlarına yakın yerlerde hız değerleri merkeze yakın değerlerdedir. 10 loplu sistem için ise karışım çok olamadığı için türbinden çıkan akış yapısı çok değişmemiştir. Merkezi gövde etrafında ise 6 ve 8 loplu sistemler için altıgen ve sekizgene benzer hız dağılımı gerçekleşmiştir. Bu da loplu yapının etkisini daha iyi göstermektedir.

Şekil 11' e bakıldığı zaman ise, akışın boru içerisinde ilerledikçe birincil ve ikincil akışların karışımın arttığı gözlemlenmektedir. Bu karışıma bağlı olarak daha eşit dağılımlı hız profilleri elde edilmektedir.

Son olarak egzoz çıkışlarında alınan hız profillerine bakıldığında (Şekil 12), 6 loplu sistem için orta bölüm hariç nerdeyse eşit dağılımlı bir akış elde edilmiştir. Bu hız profili görüntüsü 6 loplu sistem için çok iyi bir karışım sağlandığını göstermektedir.

## DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada helikopter motor bölümünün soğutulmasını sağlayan ejektör sisteminde kullanılan loplu lüle modelinin lop sayısının sistem performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Analizlerde kullanılan "k- ω SST" türbülans modeli literatürde bulunan deney verileri kullanılarak doğrulanmıştır. Lop sayısının etkisini gözlemlemek için sırası ile 6, 8 ve 10 lop sayısına sahip lülelerin ejektör sistemine etkileri soğutma havasının akış miktarı ve türbin çıkışında oluşan karşı basınç açısından değerlendirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre en yüksek soğutma akış miktarına ve en düşük türbin çıkışı karşı basıncına sahip sistemin 6 loplu lüle modelinin olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın devamı olarak lüle yapısını etkileyen diğer parametrelerin de incelenip verim açısından en iyi modelin elde edilmesi planlanmaktadır. Giriş bölümünde anlatılan optimizasyon sisteminin çalışma prensibi şematik olarak aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 13 : Aerodinamik tasarım sürecinin şematik olarak gösterimi

10 Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı

### Kaynaklar

Gianluigi Alberto Misté ve Ernesto Benini, 2012, 'Performance Of A Turboshaft Engine For Helicopter Applications Operating At Variable Shaft Speed', Proceedings of the ASME 2012, Gas Turbine India Conference

*Hu, Saga ve Kobayashi, 2005. 'Dual-Plane Stereoscopic PIV Measurements in a Lobed Jet Mixing Flow ', In 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (American Institute of Aeronautics and Astronautics)* 

Kazlauskas, 2009. 'Parametric Study of an Ejector-Cooled Turbine Engine Compartment Using CFD '. M.Sc Thesis, In Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut,

Sheng Zhiqiang, Chen Shichun, Wu Zhe & Huang Peilin, 2015, 'High Mixing Effectiveness Lobed Nozzles And Mixing Mechanisms', International Journal of Heat and Mass Transfer 91, 671–683

Václav Dvořák, 2007, 'Study Of Optimization Of Lobed Nozzle For Mixing', Colloquium FLUID DYNAMICS, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague, v.v.i,

*Vijaya Kumar Cheeda, R. Vinod Kumar ve G. Nagarajan, 2007, 'Design and CFD analysis of a regenerator for a turboshaft helicopter engine', Aerospace Science and Technology, Volume 12, Issue 7, 524-534* 

Yang, Long ve Yao, 2012. 'Numerical investigation on the mixing process in a steam ejector with different nozzle structures.' In International Journal of Thermal Sciences, 95-106