

SES ÜSTÜ LÜLELER İÇİN PASİF EJEKTÖR TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZLERİ

Berk YURT¹ ve Sıtkı USLU²

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara

ÖZET

Ejektör/Difüzör yapıları ses üstü hızlarda uçan hava solunmalı itki sistemlerinin yer seviyesi testlerinde uçuş koşulları benzeşimindeki hava akışını test bölgesine ileten alt yapı bileşenidir. Test altyapısı sisteminin arka basınç kontrolünü sağlayarak, test kaleminin konumlandırıldığı test odasında uçuş koşullarına benzer bir akış ortamı oluşturulmaktadır. Ses üstü lüle çıkışında konumlandırılan ejektör/difüzör tipindeki arka basınç kontrol sistemi olarak değerlendirilen pasif ejektör, ikincil bir kaynağa ihtiyaç duymadan test bölgesine uçuş koşullarındaki statik basınç koşullarını sağlamaktadır. Çalışmada pasif ejektörlerin tasarım parametresi olarak değerlendirilen vakum bölümü kesit alanının performans etkileri incelenmektedir. İki boyutlu Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kullanılarak pasif ejektör performansı değerlendirilmektedir. Pasif ejektörün modelleme çalışmalarına dayanak olması amacıyla düzlemsel geometri [Rajesh ve Kumar,2018] çalışmaları ile doğrulama faaliyetleri yürütülmüştür. Doğrulan model kullanılarak pasif ejektördeki ses üstü akış, vakum ve şok yapıları vb. akış problemlerinin yüksek doğrulukta çözümlenmesi hedeflenmiştir.

GİRİŞ

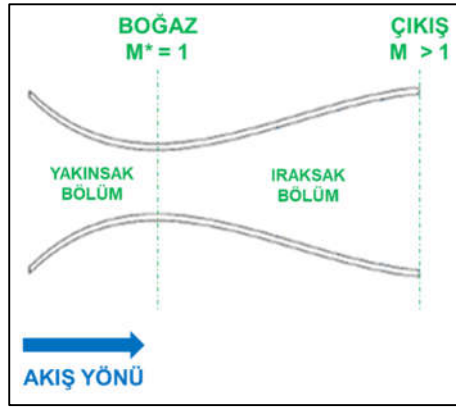
Çalışma rejimleri ses üstü hızlarda ($M>1$) olan ramjet ve scramjet gibi itki sistemlerinin tasarım çalışmalarında uçuş koşullarının (hız, statik basınç ve sıcaklık vb.) benzeştirildiği yer seviyesi testleri gerçekleştirilmektedir. Yarı açık jet test altyapısı bileşeni ısıtıcılar aracılığıyla uçuş koşullarındaki toplam sıcaklık şartlandırması yapılan hava akışı, ses üstü lüle bileşeni kullanılarak hızlandırılır ve test kaleminin hava alıklarına iletilir. Ses üstü lülelerin temel görevi, uçuş koşullarındaki akış hızı ve toplam basınç benzeşimlerini sağlamaktır.

Ses Üstü Lüle Akış Problemi

Ses üstü lüleler yakınsak, iraksak bölümleri ile ortada bulunan boğaz kesitlerinden oluşmaktadır (**Şekil 1**). Test altyapılarının üst bölgesinden lüle girişine aktarılan ses altı hızlara ($M<1$) sahip akış yakınsak bölüm ile sıkıştırılarak hızlandırılır. Lülenin en dar kesiti olan boğaz kesitinde akış boğularak debi sabitlenir. Boğulan akış, sonik hıza ($M=1$) sahiptir. Boğaz kesitinde boğularak sonik hıza ulaşan hava akışı iraksak bölümde kesit alanın çıkışa doğru büyümesi ile orantılı olarak ses üstü hızlara ($M>1$) ulaşır.

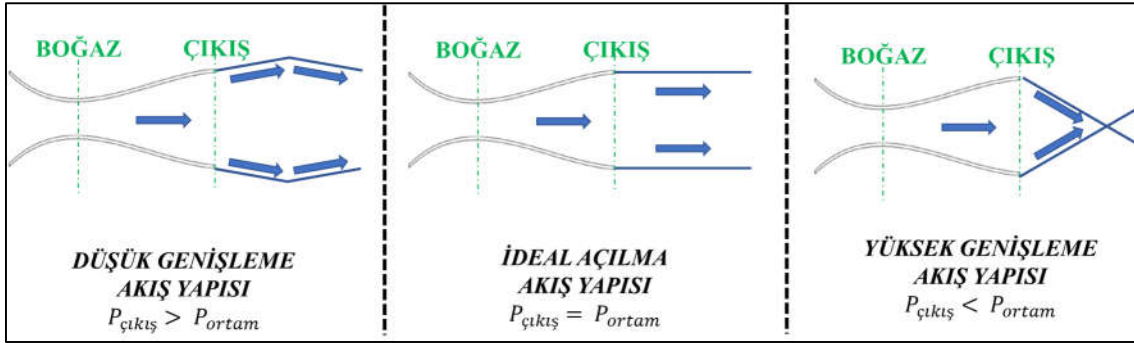
¹ Berk YURT, Yüksek Lisans Öğrencisi, TOBB ETÜ Makine Mühendisliği, E-posta: byurt@tobb.edu.tr

² Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı USLU, TOBB ETÜ Makine Mühendisliği E-posta: suslu@tobb.edu.tr



Şekil 1 Ses Üstü Lülelerin Yapısı

Ses üstü lülelerde çıkış problemleri, ortam basıncı ile çıkış kesitindeki akışın statik basıncı arasındaki ilişkisi bakımından temel olarak üç farklı durumda ele alınmaktadır. Lüle çıkış kesiti statik basıncı, ortam basıncından küçük ise akış görece yüksek bir basınç ile karşılaşır ve kapanma eğilimi gösterir (yüksek genişleme) ve konik şok yapısı meydana gelir. Ortam basıncı ile eşit statik basınca sahip akış, lüle çıkışında ideal açılma eğilimi gösterir. Ortam basıncından yüksek bir statik basınca sahip akış ise lüle çıkışında genişleme yapısında açılır (Şekil 2).



Şekil 2 Lüle Çıkışı Akış Yapıları

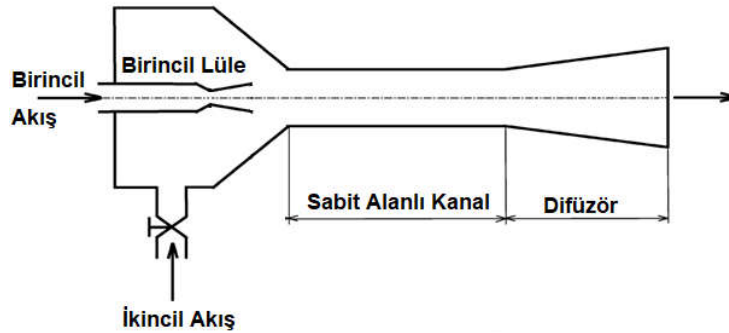
İrtifa Benzeşimi ve Arka Basınç Kontrol Yöntemleri

Yarı açık jet test altyapılarında kullanılan ses üstü lülelerde uçuş irtifası benzeşiminin sağlanması hedeflenmektedir. Statik basınç, 20 km irtifaya kadar yükseklik ile ters orantılıdır. Dolayısıyla yarı açık jet test altyapılarında kullanılan ses üstü lülelerde çıkıştaki akış problemi genel olarak yüksek genişlemeli açılmadır. Yarı açık jet test altyapılarında hava alıklarına iletilen akış, kapanma eğiliminde olması sebebiyle uygun şartlandırma ile aktarılamamaktadır. Bu duruma çözüm olarak arka basınç kontrol sistemleri geliştirilmektedir. Arka basınç kontrol sistemleri temel olarak test kaleminin hava alıklarının ya da tamamının lüle çıkışından iletilen ses üstü akış tarafından sarılması amacıyla test kaleminin bulunduğu ortam basıncının düşürülmesinde kullanılır. Arka basınç kontrol sistemleri, düşük basınçlı vakum tankları, ikincil boğaza sahip difüzörler ve ejektörlü difüzör yapıları olarak çeşitlendirilir.

Düşük basınçlı vakum tankları, iletilen akışa oranla yüksek hacme sahip, genellikle küresel yapıda ve ortam basıncından (yer seviyesi basıncı) düşük basınca sahip bileşenlerdir. Vakum tanklarında, lüle çıkışı statik basıncından düşük tank basıncı arasında negatif basınç oluşturularak test kaleminin bulunduğu test odası basıncı lüle çıkış basıncına kadar düşürülür. Dolayısıyla test kaleminin bulunduğu ortama açılan akış, lüle çıkışında ideal açılmakta ve test kalemi hava alıklarına uçuş koşullarına sahip hava akışını uygun bir şekilde iletebilmektedir [Chanetz, Détery, Gilliéron, Gnemmi, Gowree ve Perrier, 2001].

İkincil boğaza sahip difüzörlerde, ses üstü lüledeki boğazda boğulan akış, test odasının arkasına konumlandırılan ikinci boğazda da boğulmaktadır. Boğulan ikinci boğaz, test odasının ortam koşulları ile iletişimi keserek test kalemine aktarılan akışın uçuş koşullarındaki hedeflenen statik basıncına düşürülmesini sağlamaktadır. Statik basınç kontrolü, lüle girişi toplam basıncının ortam basıncına oranı olarak tanımlanan basınç oranı değiştirilerek gerçekleştirilir [German ve Panesci, 1963].

Ejektörlü difüzör yapılarında, iki farklı kaynaktan çıkan akış test odasında karşılaşmaktadır (**Şekil 3**). Birincil akış, ses üstü lüle kullanılarak uçuş koşullarındaki hızlara ulaştırılmakta ve test kalemine iletilmektedir. İkincil akış olarak adlandırılan ejektör yapısından aktarılan akış ise test odasında durağan olan koşulların momentumunu artırarak ortam statik basıncını düşürmektedir. İki akışın karıştığı bölgede iki farklı hıza sahip akış arasında kesme tabakaları oluşur ve birincil akış kesitinin etki alanını ve hızını etkiler. Bu durumda test kaleminin test odasında konumlandırılması ve uygun koşullara sahip olan birincil akış ile beslenmesi dikkat edilen önemli bir unsur olarak değerlendirilmektedir [Desevaux ve Lanzetta, 2004].

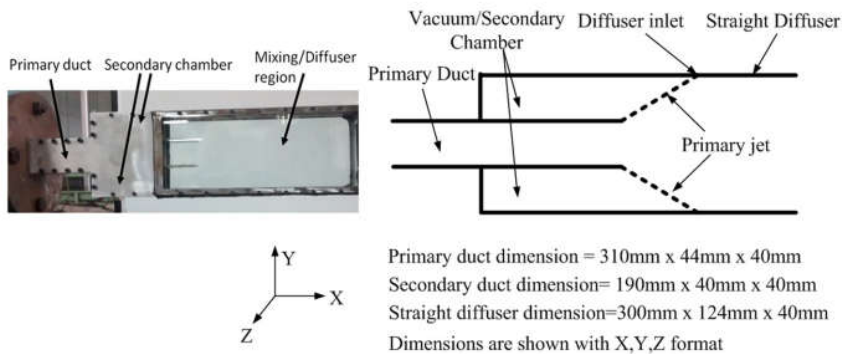


Şekil 3 Ejektörlü Difüzör Yapıları ([Desevaux ve Lanzetta, 2004]'ten değiştirilmiştir.)

Düzlemsel Geometri Yapısı ve Özellikleri

Pasif ejektör tasarım çalışmaları için gerçekleştirilen yöntem doğrulama çalışmaları kapsamında düzlemsel geometrinin [Rajesh ve Kumar,2018] Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak modellenmesi ve deneysel çalışmada sunulan test sonuçları [Rajesh ve Kumar,2018] ile karşılaştırılması yapılmaktadır. HAD modellemesi doğrulaması bu yöntem ile tamamlanmaktadır. Pasif ejektör tasarım çalışmalarının doğrulanan modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. HAD analizleri için ticari bir yazılım olan ANSYS Fluent 2020 kullanılmaktadır.

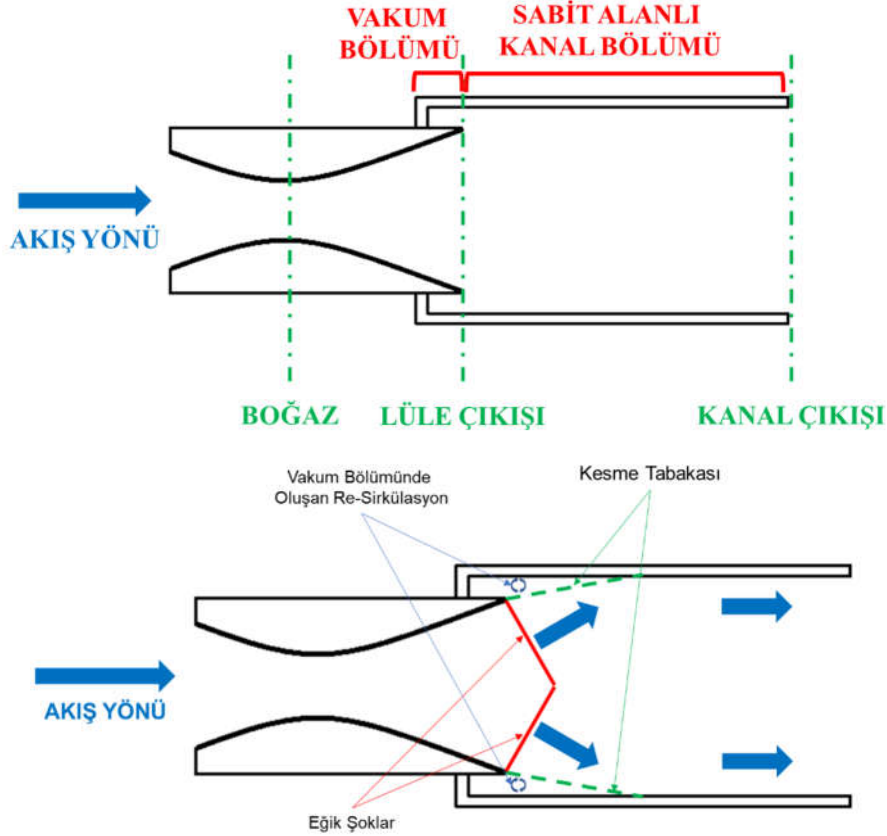
Doğrulama yöntemi için kullanılan geometri Şekil 4'da sunulmaktadır. Çalışmada kullanılan geometri iki adet düzlemsel kanalın birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Birincil kanaldaki akış difüzördeki kesme tabakası ile karşılandığında hızlanır. Hızlanan akış difüzör duvarlarından yansıyarak simetri eksenine yönelmektedir. Alt ve üst duvarlardan seken akış, difüzör içinde karşılaşarak akış doğrultusuna dik bir Mach disk oluşturmaktadır. Mach diskin konumu, birincil kanaldaki akışın toplam basıncı ile değişmektedir.



Şekil 4 Doğrulama Çalışması için Kullanılan Düzlemsel Geometri [Rajesh ve Kumar,2018]

Pasif Ejektör Görevi ve Akış Yapısı

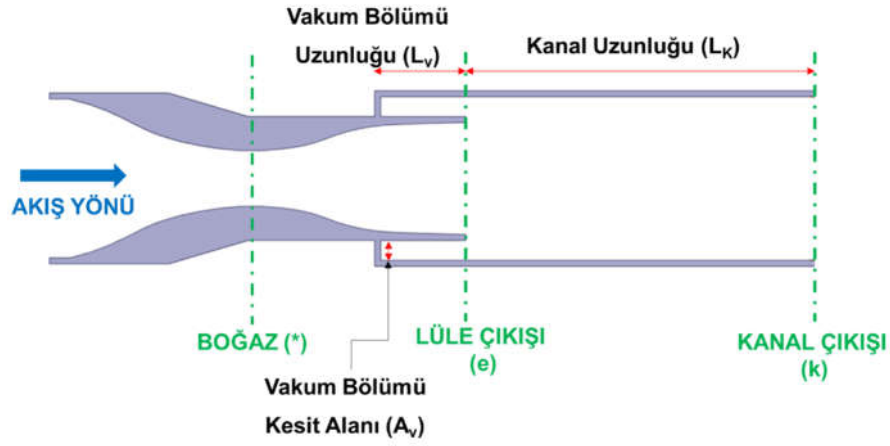
Pasif ejektör, ikincil akış barındırmayan bir ejektör sistemidir (**Şekil 5**). İkincil kaynağın aktarıldığı vakum bölümü hava hacmi, ses üstü lüleden iletilen hava akışı kullanılarak negatif basınç değerlerine kadar düşürülür. Lüleden çıkan yüksek momentuma sahip akış, pozitif ve lüle çıkışına göre yüksek basınca sahip vakum bölümü hacmini momentum farkını kullanarak çekmektedir [Mittal, Rajesh, Lijo, ve Kim,2014]. Vakum bölümündeki basınç, ortam basıncının altına düştüğü durumda birincil akış ile karşılaştığı lüle çıkış kesitinden itibaren bir re-sirkülasyon bölgesi gözlemlenmektedir [Park, Lim ve Yoon,2008]. Girdap bölgesi, birincil akış açısından bir duvar olarak davranmakta ve lüleden çıkan hava akışı ile girdap bölgesi arasında bir kesme tabakasını oluşturmaktadır. Kesme tabakası birincil akışı yönlendirmekte ve test kalemine aktarılan akışın hızını arttırmaktadır (**Şekil 5**). Vakum bölümü ile birincil akış arasında oluşan bu durum, akışı belli bir seviyede dondurmakta ve dolayısıyla test kalemine aktarılan akışın statik basıncını korumasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 5 Pasif Ejektör Yapısı (üstte), Pasif Ejektör Akış Karakteristikleri (altta)

Pasif ejektörün ikincil bir akış kaynağına ihtiyaç duymaksızın test kalemi hava alıklarına hava akışını uygun koşullarda iletebileceği değerlendirilmektedir. Pasif ejektör tasarımı Şekil 6'te verilmektedir. Pasif ejektörün performansına etki eden geometrik parametreler;

- Vakum bölümü kesit alanı
- Vakum bölümü uzunluğu
- Kanal kesit alanı değişimi (sabit alan veya değişken alanlı kanal tasarımları) olarak tespit edilmiştir.

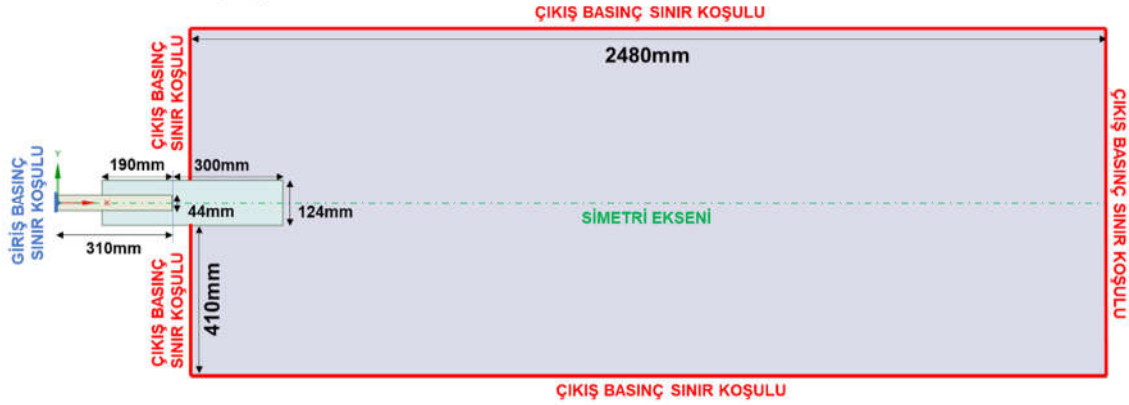


Şekil 6 Pasif Ejektör Yapısı

YÖNTEM

Düzlemsel Geometri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modeli

Düzlemsel geometri boyutları ve sınır koşullarının konumu Şekil 7'de verilmektedir. Çözüm açısından bağımsızlaştırma ve türbülans çalışmalarında sınır koşulları sabit değere sahip giriş ve çıkış basınç koşulları ile tanımlanmaktadır. Sınır koşullarının değerleri Tablo 1'de sunulmaktadır. Geometri, iki boyutlu ve zamana bağlı çözümler ile incelenmektedir.



Şekil 7 Düzlemsel Geometri Boyutları ve Sınır Koşulları Konumları

Tablo 1 Çözüm Açısından Bağımsızlaştırma Çalışmaları Özellikleri

Giriş Sınır Koşulları		Çıkış Sınır Koşulları	
Basınç	Sıcaklık	Basınç	Sıcaklık
5 bar	300K	1.01 bar	300K

Çalışma sonuçları, simetri eksenindeki zaman ortalamalı yakınsayan Mach sayısı dağılımı karşılaştırmalarıyla değerlendirilmektedir. Çözümün yakınsadığı çözüm ağı ayrıklaştırması ile farklı türbülans modelleri incelenmiştir. SST k- ω ve Realizable k- ϵ türbülans modelleri kullanılmıştır. Türbülans modeli çalışmalarında simetri eksenindeki Mach sayısı ve tüm yüzeylerde çözümlenen akış yönündeki hız dağılımı değerlendirilmektedir.

Pasif Ejektör İncelenen Tasarım Parametreleri ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modeli

Pasif ejektör, yarı açık jet test altyapılarında ses üstü lülelerin çıkışına konumlandırılan irtifa benzeşimini sağlamak için kullanılan bileşenlerdir. Genel ejektörlerden farklı olarak ikincil bir akış kaynağına sahip olmamakla birlikte ses üstü lüleden aktarılan yüksek momentuma sahip akışın vakum bölümündeki hava hacmini çekmesi sonucu oluşan vakum koşulunu kullanarak lüle çıkışındaki basıncı hedeflenen irtifa benzeşimine ait mertebelere düşürmektedir. Pasif ejektör tasarım çalışmalarında, çıkışında 2.7 Mach sayısına sahip bir adet ses üstü lüle kullanılmıştır. Lüle tasarımı, "Method of Characteristics" [Anderson,2007] yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Ses üstü lüle için ebat ve teknik özellikler Tablo 2’te verilmiştir.

Tablo 2 Mach Sayısı = 2.7 Lülesinin Boyutları

Giriş Kesiti	184.3mm
Boğaz Kesiti	93mm
Çıkış Kesiti	325.5mm
Çıkış Kesit Alanı / Boğaz Kesit Alanı	3.5

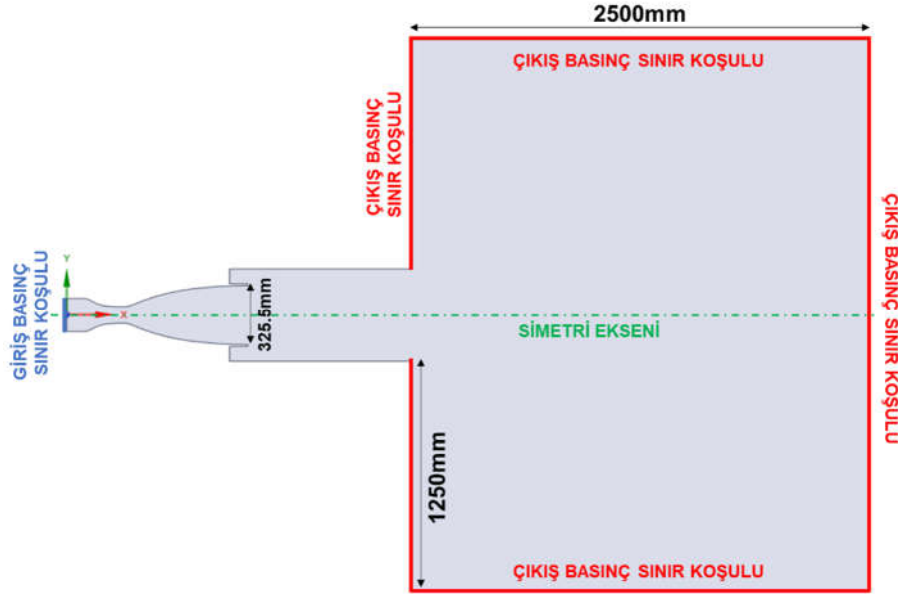
Lüle ve pasif ejektör yapısı ve geometrisi Şekil 6’te sunulmaktadır. Pasif ejektör geometrisinde vakum bölümü kesit alanı tasarım parametresi olarak değerlendirilmiştir. Farklı vakum bölümü kesit alanı yüksekliğinin lüle çıkışından 500mm arkada bulunan kesitteki akış yapısına etkisi incelenmiştir.

Vakum bölümü kesit alanı yüksekliğinin incelenen konfigürasyonları Tablo 3’te sunulmaktadır. Vakum bölümü kesit alanı yüksekliğinin lüle kesit uzunluğuna göre oranı hesaplanmıştır. Bu oran, "alan oranı" olarak tanımlanmıştır. Pasif ejektör tasarımına etki ettiği değerlendirilen vakum alanı uzunluğu ve kanal uzunluğu sabit tutulmuştur. Vakum alanı uzunluğunun lüle çıkışında test kaleminin konumlandırılacağı kesitteki akış yapısına etkileri bu şekilde incelenmiştir.

Tablo 3 İncelenen Pasif Ejektör Geometrilerindeki Tasarım Parametreleri Değerleri

#	Alan Oranı [%]	Vakum Kesiti Yükseklik [mm]	Vakum Alanı Uzunluğu [mm]	Kanal Uzunluğu [mm]
1	5	8.1	100	1000
2	10	16	100	1000
3	25	40	100	1000
4	50	81	100	1000
5	75	122	100	1000
6	100	162	100	1000

Pasif ejektör tasarım çalışmalarında kullanılan model geometrisi ve sınır koşullarının konumu Şekil 8’te verilmektedir. Tasarım çalışmalarında, düzlemsel geometri çalışmaları [Rajesh ve Kumar,2018] ile doğrulaması yapılan HAD modelleme yöntemi kullanılmıştır. Lüle girişinde giriş basıncı, serbest akış çıkış koşullarında ortam basıncı sınır koşulları tanımlanmıştır. Sınır koşulları değerleri Tablo 4’te sunulmaktadır. Çıkış sınır koşulu tanımlanan ortam basıncı Ankara / Elmadağ Roketsan A.Ş. tesislerinin atmosfer koşullarıdır.



Şekil 8 Pasif Ejektör Boyutları ve Sınır Koşulları Konumları

Tablo 4 Pasif Ejektör Sınır Koşulları

Giriş Sınır Koşulları		Çıkış Sınır Koşulları	
Basınç	Sıcaklık	Basınç	Sıcaklık
15 bar	300K	0.88 bar	300K

Pasif ejektör tasarım çalışmalarında kullanılan HAD modelleme yöntemi Tablo 5'da verilmiştir. Modelleme yönteminin doğrulaması düzlemsel geometri çalışmaları [Rajesh ve Kumar,2018] ile karşılaştırılarak incelenmiştir. Parametre değişikliklerinden dolayı modellenen geometrinin değişmesi sebebiyle sabit bir çözüm ağı ayrıklaştırılması kullanılmamıştır. Çözüm ağı ayrıklaştırılmasına ait hücre sayıları 650000 - 750000 aralığındadır.

Tablo 5 Pasif Ejektör İncelemelerinde Kullanılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modelinin Özellikleri

Zamana Bağlı Formülasyon	İkinci Dereceden Kapalı Fonksiyonlar
Zaman Adımı	10^{-6} saniye
Türbülans Modeli	SST k- ω

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

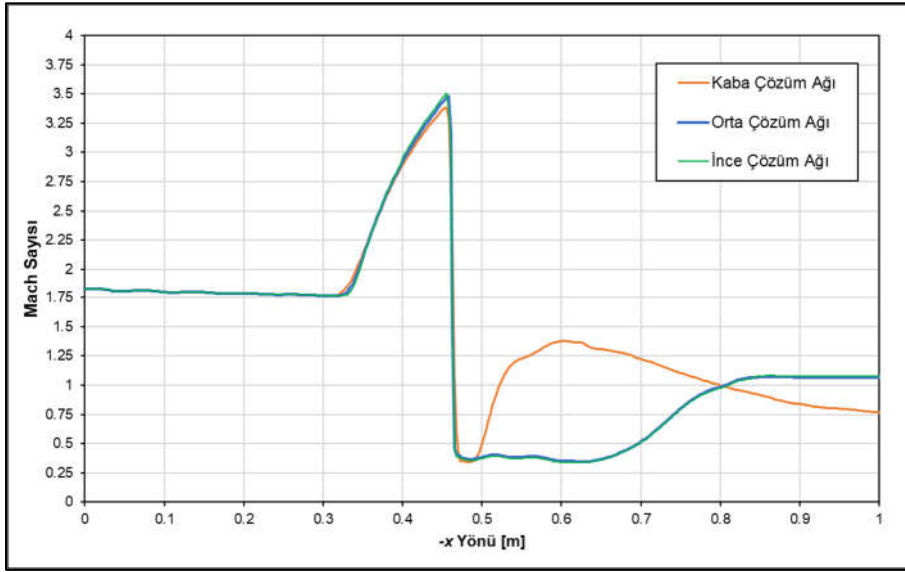
Düzlemsel Geometri ile Yapılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri

Düzlemsel geometri kapsamında gerçekleştirilen zamana bağlı olmayan HAD analizlerinde, çözüm ağının yakınsamadığı değerlendirilmiştir. Zamana bağlı olmayan çözümlerde elde edilen sonuçların fiziksel akış koşullarını çözümlenmede başarısız olması sebebiyle zamana bağlı HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı HAD analizleri akış zamanının 1. saniyesine kadar koşturulmuştur. Akış zamanının 1. saniyesinde zaman ortalamalı akış koşulları incelendiğinde çözüm ağının yakınsadığı tespit edilmiş ve sonuçlar zaman ortalamalı olarak değerlendirilmiştir.

Düzlemsel geometri kapsamında çözüm ağından bağımsızlaştırma çalışmalarında zaman ortalamalı yakınsayan sonuçlar incelenmiştir. İncelenen çözüm ağlarının konfigürasyon özellikleri Tablo 6'de verilmektedir. Simetri eksenindeki zaman ortalamalı Mach Sayısı dağılımı Şekil 9'de sunulmaktadır. Çözümlenen düzlemsel geometri modelinin orta çözüm ağı ayrıklaştırılmasında yakınsadığı tespit edilmiş, türbülans modeli incelemelerine bu konfigürasyon ile devam edilmiştir.

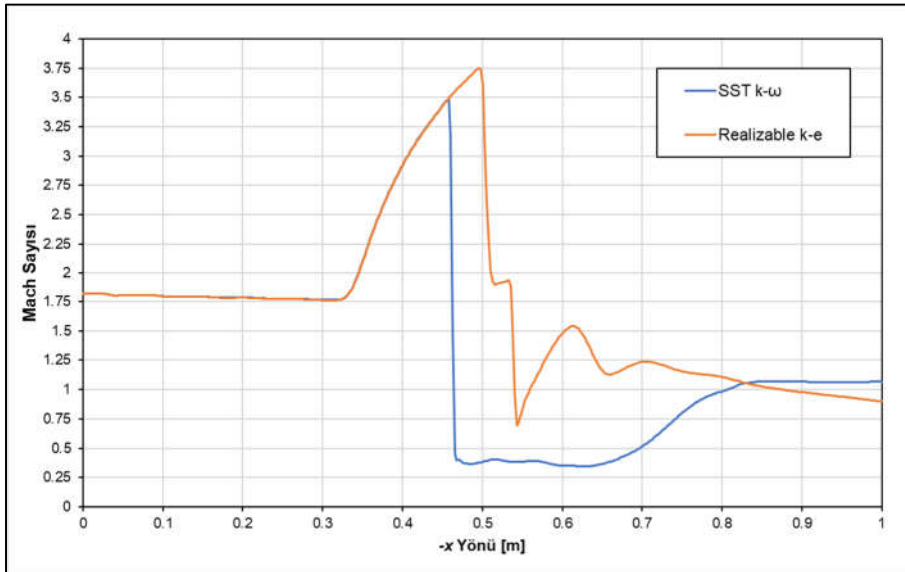
Tablo 6 Çözüm Ağı Çalışması

Konfigürasyon Adı	Kaba Çözüm Ağı	Orta Çözüm Ağı	İnce Çözüm Ağı
Hücre Sayısı	61672	195810	843778
Zamana Bağlı Ayrıştırma	İkinci Dereceden Kapalı Ayrıştırma		
Zaman Adımı	10^{-5} saniye		



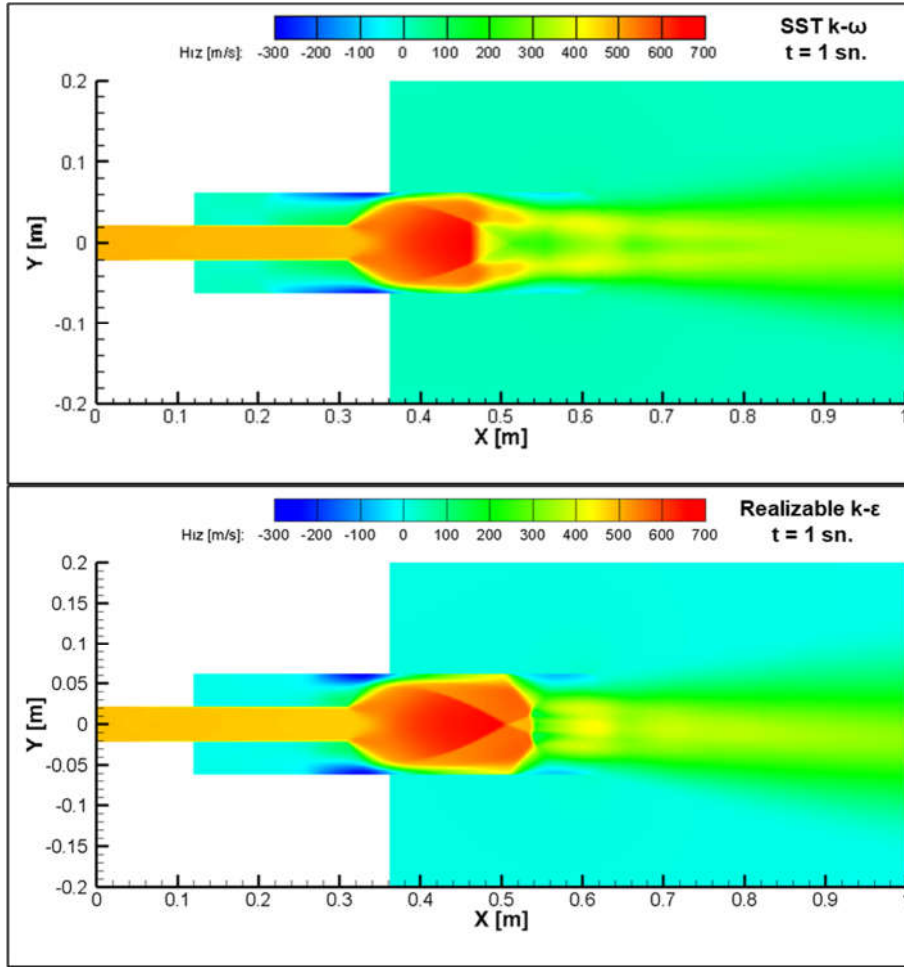
Şekil 9 Çözüm Ağı Çalışması : Akış yönünde Orta Eksen Boyunca Mach Sayısı Dağılımı

Farklı türbülans modellerinin simetri eksenindeki Mach sayısı dağılımları Şekil 10'da sunulmaktadır. Realizable k- ϵ modelinin simetri eksenindeki zaman ortalamalı yakınsayan Mach sayısı dağılımı, SST k- ω modeline göre daha yüksek çalkantılı bir akış yapısı çözümlenmiştir.



Şekil 10 Türbülans Model Etkileri: Akış yönünde Orta Eksen Boyunca Mach Sayısı Dağılımı

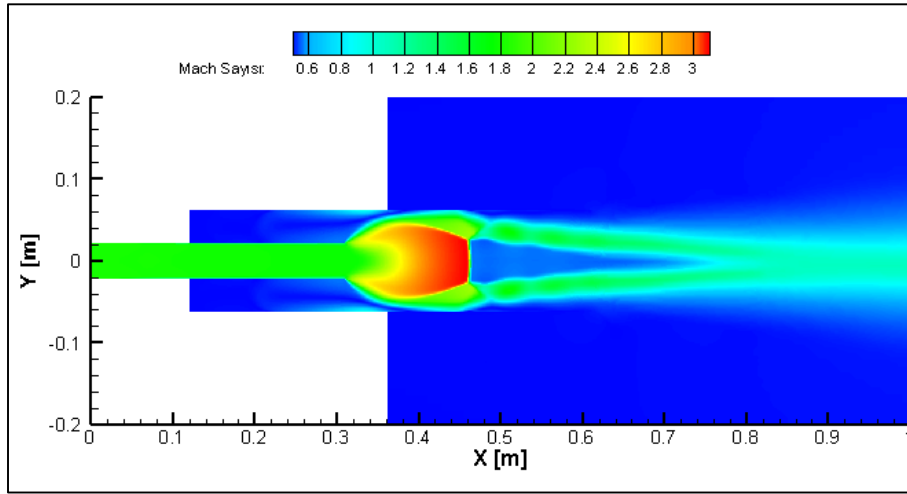
Türbülans modelleri çalışmaları kapsamında zaman ortalamalı yakınsayan akış yönündeki hız dağılımları Şekil 11’de sunulmaktadır. SST k- ω modelinde gerçekleştirilen çözümde, Mach diskini açıkça tespit edilebildiği, ancak Realizable k- ϵ modelinin yansımayı çözümlenmekte başarısız olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 11 Orta Çözüm Ağı üzerinde SST k- ω (üstte) ve Realizable k- ϵ Modellerine ait Zaman Ortalamalı Akış Yönündeki Hız Bileşeni Dağılımı

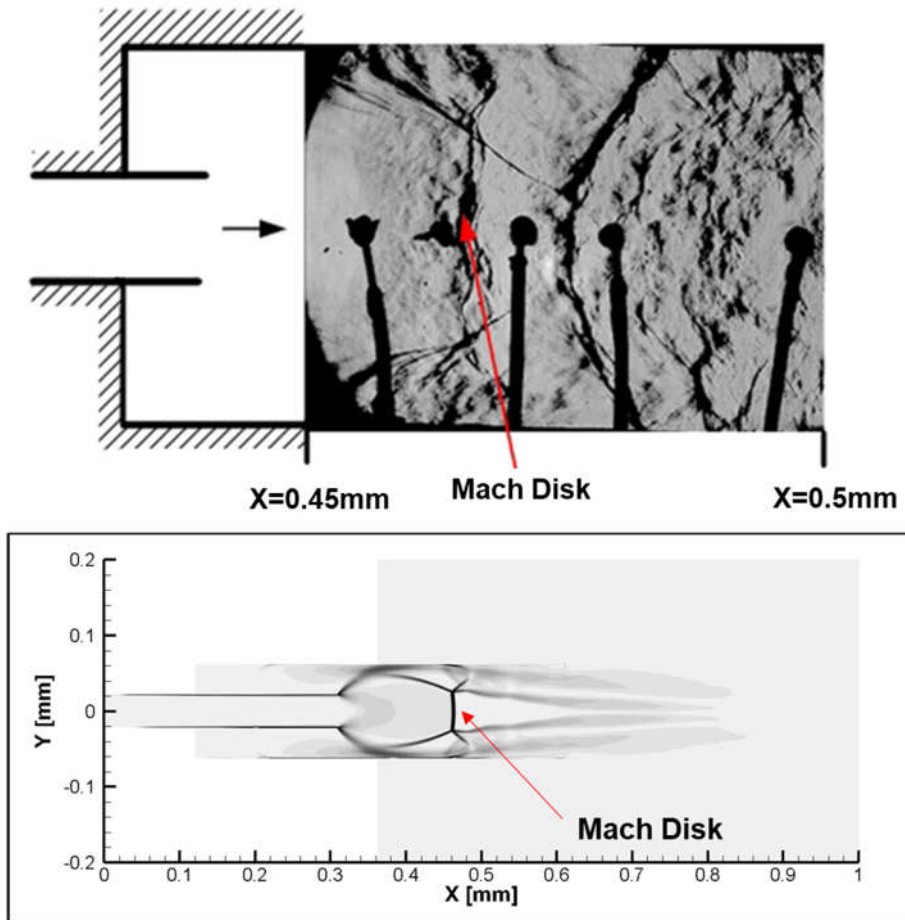
Düzlensel geometri çalışmalarındaki Schlieren görüntüleri [Rajesh ve Kumar,2018] ve basınç verileri incelendiğinde simetri ekseninde SST k- ω modeline daha yakın sonuçların gözlemlendiği değerlendirilmektedir. Bu sebeple çözüm çalışmalarına SST k- ω türbülans modeli ile devam edilmiştir.

Çözüm ağından bağımsızlaştırma ve türbülans modeli çalışmaları sonucunda orta kalite çözüm ağı konfigürasyonu ve SST k- ω türbülans modeli kullanılarak incelenen geometriye ait zaman ortalamalı Mach sayısı dağılımı Şekil 12’de sunulmaktadır. Birincil akıştan çıkan ses üstü akışın, vakum bölgesi ile birincil kanal arasında oluşan kesme tabakası ile hızlanıp ikincil kanal duvarlarına yapışması ve geri sekip bir Mach disk oluşturduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 12: Orta Çözüm Ağı üzerinde SST $k-\omega$ Türbülans Modeli ile Kullanılan Çözümün Zaman Ortalamalı Mach Sayısı Dağılımı

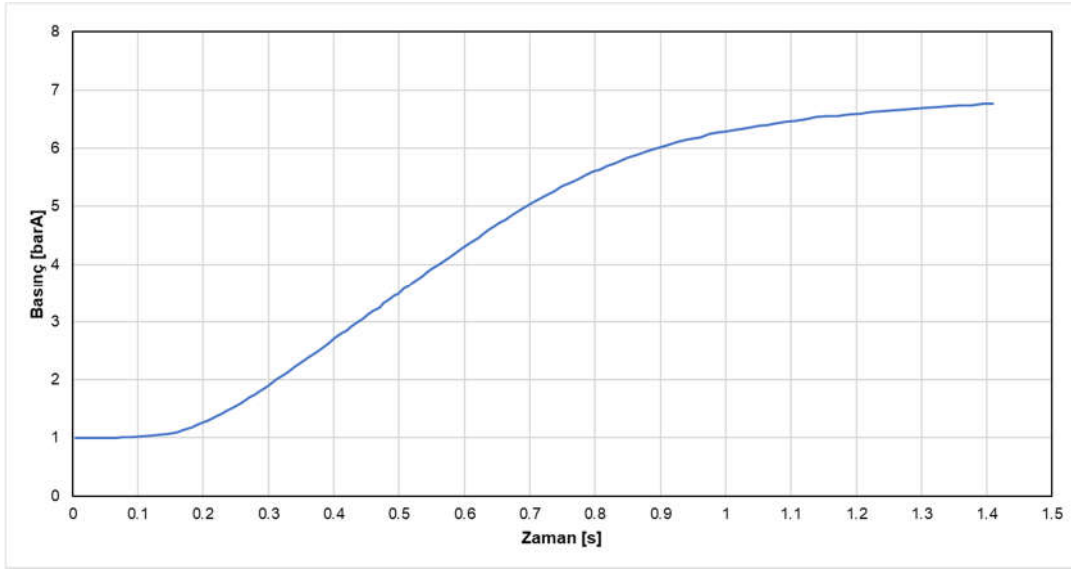
Zaman ortalamalı yakınsayan sonuca ait numerik Schlieren görüntüsü ile Rajesh ve Kumar'ın (2018) düzlemsel geometri çalışmalarında [Rajesh ve Kumar,2018] sunulan, giriş sınır koşulunun yaklaşık 5 bar olduğu teste ait Schlieren görüntüleri Şekil 13'de sunulmaktadır. Karşılaştırmada, analizde hesaplanan Mach disk konumunun test verisi ile örtüştüğü tespit edilmiştir.



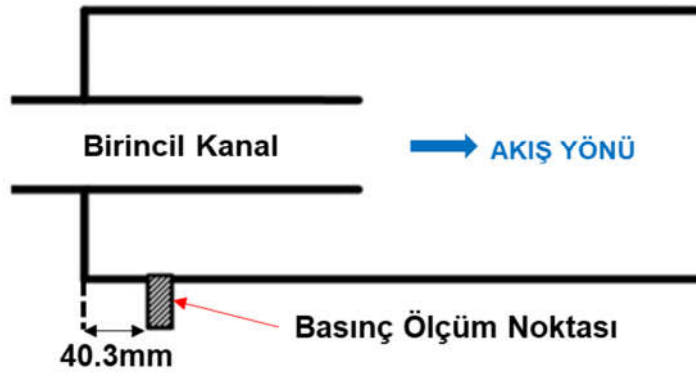
Şekil 13 Birinci Kanal Toplam Basıncı 5 bar iken Schlieren Görüntüsü [Rajesh ve Kumar,2018] (üstte), Mevcut Sayısal Schlieren Görüntüsü (altta)

Rajesh ve Kumar'ın (2008) yapmış olduğu bir diğer çalışma ise birinci kanalın giriş basıncını zamana bağlı olarak arttırarak vakum bölgesindeki basınç verileri incelemektir. Bu çalışma ile zamana bağlı olarak vakum bölgesindeki basınç değişimi gözlemlenmiştir. Çalışmada birinci kanalın girişinden

verilen basınç koşulu verileri Şekil 14'te sunulmaktadır. Vakum bölgesindeki statik basınç bilgisi, konumu Şekil 15'te belirtilen basınç ölçüm noktasından toplanmıştır.

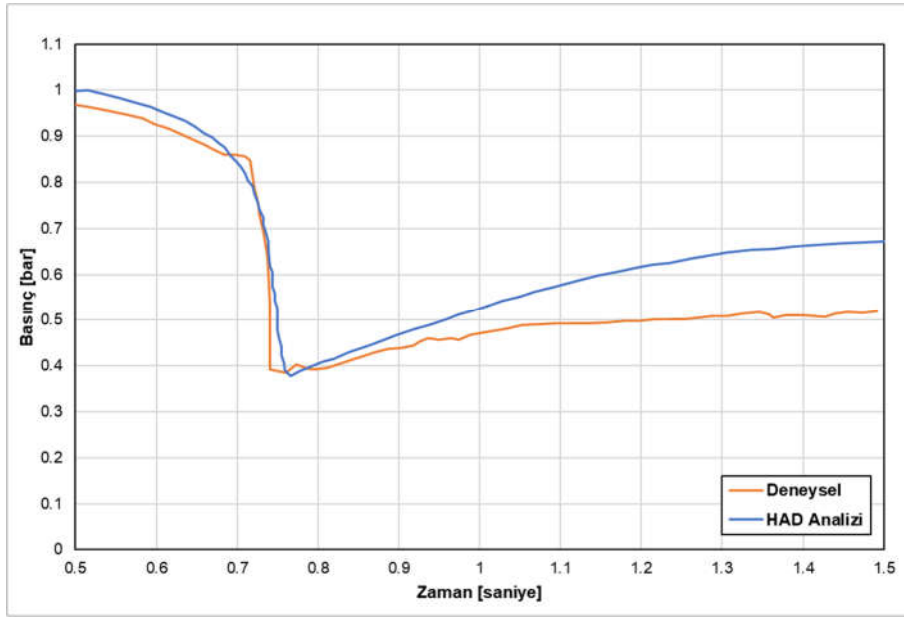


Şekil 14 Birinci Kanal Girişinden Verilen Değişken Basınç Sınır Koşulu



Şekil 15 Düzlemsel Geometride Basınç Ölçüm Noktası Konumu

Şekil 14'te sunulan birinci kanal girişine ait basınç verisi, zamana bağlı olarak gerçekleştirilen HAD analizinde giriş sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. 1 saniye akış zamanında çözülen modele ait vakum bölgesi basınç değişimi, Şekil 15'te verilen basınç ölçüm noktasında konumunda incelenmektedir. Yapılan çalışmaya göre deneysel veriler ile HAD analizi sonuçlarının uyumluluğu değerlendirilmiştir. 0.8 saniyeden sonraki deneysel ve mevcut analiz sonuçları arasında zamanla artan bir fark gözlemlenmiştir. Sonuçlar arasındaki farkın temel sebebinin 3. boyut etkilerinin 2 boyutlu gerçekleştirilen HAD analizlerinde gözlemlenememesi olarak açıklanmaktadır.

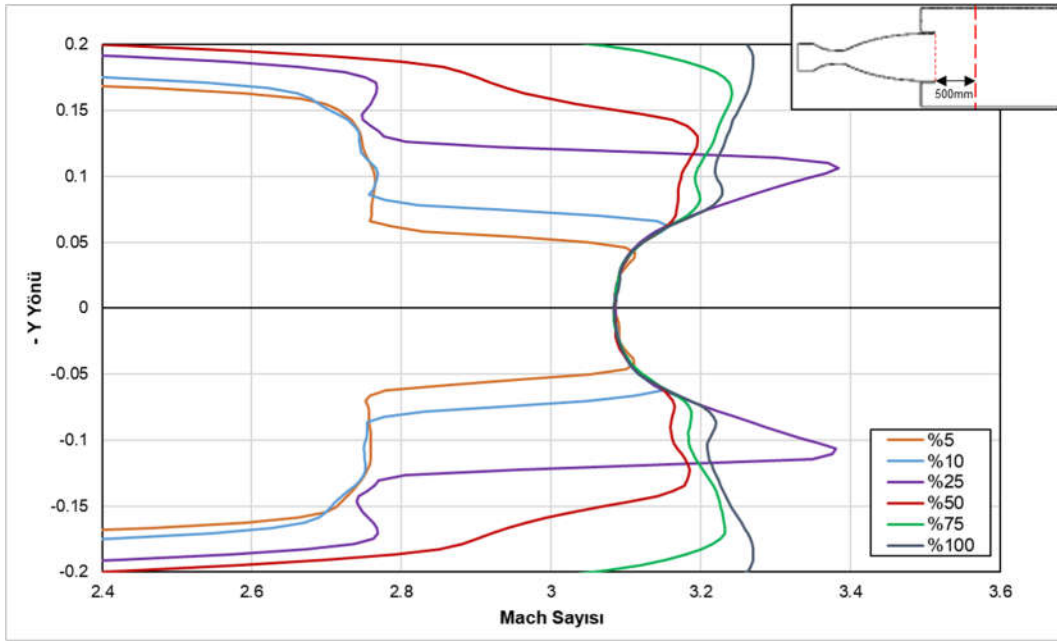


Şekil 16 Mevcut HAD Sonuçları ve Deneysel Ölçümlerin [Rajesh ve Kumar,2018] Basınç Ölçüm Noktasında Zamana Bağlı Değişimi

Düzlemsel geometri ile çözüm ağından bağımsızlaştırma ve türbülans modeli çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda orta çözüm ağı konfigürasyonu ve SST k-w türbülans modeli kullanılarak yapılan geometri modeline ait sonuçlar düzlemsel geometri çalışmalarındaki [Rajesh ve Kumar,2018] birincil kanalda yaklaşık 5 bar toplam basınca sahip test anının Schlieren görüntüsü ile karşılaştırılmıştır. Mach disk konumunun test verisine yakın çözümlendiği değerlendirilmektedir. Doğrulama çalışmalarında yapılan bir diğer karşılaştırma birinci kanaldan verilen değişken basınç ile yapılan deneye ait statik basınç portlarındaki verilerin ve analiz sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Bu karşılaştırmada da deneysel veri ile analiz sonuçlarının uyumlu olduğu değerlendirilmiştir. Dolayısıyla HAD analizleri için yapılan modellemenin ses üstü akış ve vakum problemini çözümlenmekte yüksek doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir. Pasif ejektör tasarım parametrelerinin incelenmesine doğrulama çalışmasından çıkarılan modelleme yöntemini kullanılmıştır.

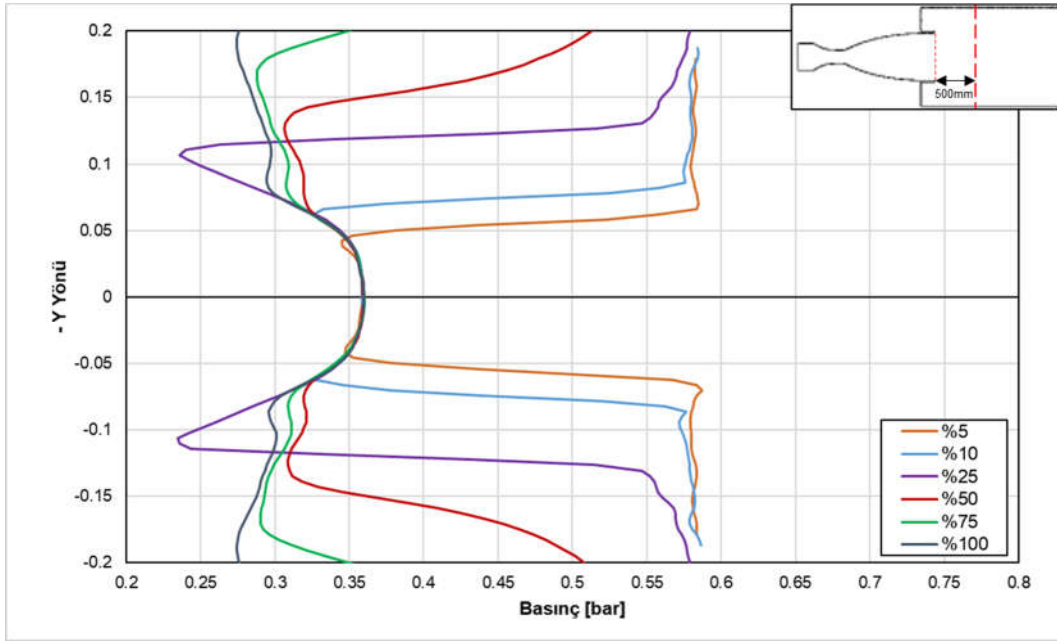
Pasif Ejektör Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri

Alan oranına bağlı olarak incelenen vakum bölümü kesit alanı yüksekliğinin lüle çıkışıdan 500mm arkadaki kesitteki Mach sayısı dağılımına etkisi Şekil 17'de sunulmaktadır. Alan oranı %5'ten %25 e kadar artırıldığında vakum bölümü sebebiyle oluşan kesme tabakası tarafından yönlendirilen genişleme dalgası şiddetinin arttığı gözlenmektedir. Alan oranı %25'e sahip konfigürasyonda genişleme dalgasında oluşan Mach sayısının 3.4 mertebesine kadar ulaştığı belirlenmiştir. %50 alan oranına sahip konfigürasyonda incelenen kesitteki Mach sayısının görece daha kararlı bir şekilde ortalama 3.15 Mach sayısı mertebesinde olduğu değerlendirilmektedir. Alan oranı %50'den büyük konfigürasyonlarda ise kesme tabakasından yönlendirilen akışın merkezde oluşan akış hızlarından daha yüksek bir mertebeye çıktığı ve bu durumun kesitteki Mach sayısı dağılımını kararsız hale getirdiği değerlendirilmiştir.



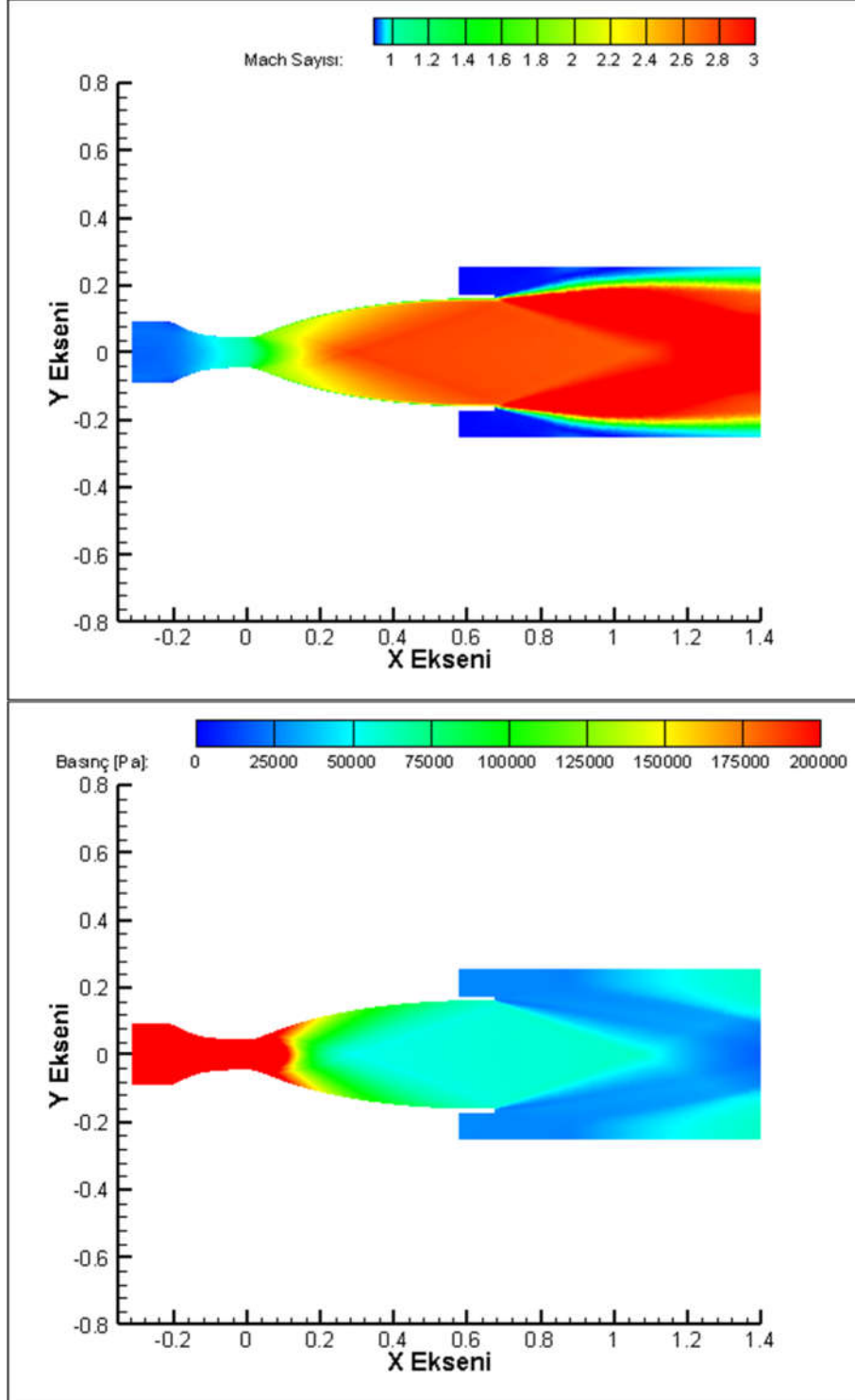
Şekil 17 Çeşitli Alan Oranlarına Sahip Vakum Bölümü Kesit Yüksekliğindeki Konfigürasyonların Lüle Çıkışından 500mm arkadaki Mach Sayısı Dağılımları

Vakum bölümü kesit alanı yüksekliğinin lüle çıkışından 500mm arkada konumlandırılan kesitteki statik basınç dağılımına etkisi Şekil 18'de sunulmaktadır. Alanı oranı %5'ten %25'e kadar incelenen konfigürasyonlarda, kesme tabakasının yönlendirdiği akıştaki hızlanmadan kaynaklanan basınç düşüşü gözlemlenmektedir. %50 alan oranına sahip konfigürasyonda incelenen kesitteki akışın statik basınç dağılımının 0.32 – 0.35 bar aralığında olduğu ve akış yapısının daha kararlı olduğu değerlendirilmiştir. %50'den yüksek alan oranlarında ise kesme tabakasından yönlendirilen akışın hızlandığı ve buna bağlı olarak statik basınç dağılımının kararsız hale geldiği incelenmektedir.



Şekil 18 Çeşitli Alan Oranlarına Sahip Vakum Bölümü Kesit Yüksekliğindeki Konfigürasyonların Lüle Çıkışından 500mm arkadaki Statik Basınç Dağılımları

Lüle çıkışından 500mm arkada bulunan kesit incelendiğinde %50 alan oranına sahip konfigürasyonun Mach sayısı ve basınç dağılımı açısından en karalı yapıda olduğu tespit edilmiştir. %50 alan oranına sahip konfigürasyonun Mach sayısı ve statik basınç dağılımları Şekil 19'de sunulmaktadır.



Şekil 19 %50 Alan Oranına Sahip Pasif Ejektör Konfigürasyonundaki Mach Sayısı Dağılımı (üstte) ve Basınç Dağılımı (altta)

SONUÇ

Çalışmada yarı açık jet test altyapılarındaki ses üstü lüle arkasına konumlandırılan ve irtifa benzeşimi problemi için etkili bir çözüm olarak değerlendirilen pasif ejektör bileşeni ele alınmıştır. Pasif ejektör bileşenindeki akış yapısı ses üstü, vakum ve kesme tabakası gibi problemleri içerdiğinden HAD modellemesinin yüksek doğrulukta yapılması amacıyla yöntem doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla düzlemsel geometriye ait deneysel sonuçlar [Rajesh ve Kumar,2018], mevcut 2 boyutlu HAD analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. HAD analizlerinde çözüm ağı çalışması ve türbülans model etkileri incelenmiştir.

Karşılaştırmada Mach disk konumu ve değişken giriş basıncına sahip durumdaki vakum bölgesindeki basınç ölçümleri kullanılmıştır. Çözüm ağından bağımsızlaştırma çalışmasında orta çözüm ağı üzerinden elde edilen sonuçların çözüm ağından bağımsız olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda orta çözüm ağı ile türbülans model etkileri incelenmiştir. Bunun için, SST k- ω ile Realizable k- ϵ türbülans modelleri kullanılmıştır. Türbülans model çalışmasının sonucunda SST k- ω türbülans model sonuçlarının deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çalışmalara pasif ejektör tasarımına etki eden parametrelerden vakum bölümü kesit alanı yüksekliği ile devam edilmiştir. Vakum bölümü kesit alanı yüksekliğinin lüle çıkış kesitine oranı "alan oranı" olarak tanımlanmış ve alan oranına bağlı farklı pasif ejektör konfigürasyonları incelenmiştir. Lüle çıkışından 500mm arkada bulunan kesitteki zamana bağlı yakınsak sonuçlardan elde edilen akış yapıları Mach sayısı ve statik basınç dağılımları üzerinden karşılaştırılmıştır. En kararlı akış yapısının %50 alan oranına sahip konfigürasyonda görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda, pasif ejektör tasarım çalışmaları için vakum bölümü uzunluğu, difüzör yapısı ve uzunluğu parametrelerinin akış yapısı üzerindeki etkilerinin incelenmesiyle devam edilecektir. Pasif ejektör tasarımı, parametrik çalışmalarla sürdürülecek ve en uygun akış yapısına sahip konfigürasyonda farklı giriş basınçlarındaki irtifa benzeşim performansı incelenecektir.

Kaynaklar

- Anderson, J. D. ,2007. *Fundamentals of aerodynamics*. Mcgraw-hill Publishing Co.
- Arun Kumar, R., & Rajesh, G. ,2018. Physics of vacuum generation in ZERO-SECONDARY flow ejectors. *Physics of Fluids*, 30(6), 066102. <https://doi.org/10.1063/1.5030073>
- Chanetz B., Délery J., Gilliéron P., Gnemmi P., Gowree E.R & Perrier P. (2001). Supersonic And Hypersonic Wind Tunnels. Handbook Of Shock Waves, 651–682.
- Desevaux, P., & Lanzetta, F. ,2004. Computational fluid Dynamic modelling of Pseudoshock inside a Zero-Secondary Flow ejector. *AIAA Journal*, 42(7), 1480–1483. <https://doi.org/10.2514/1.1128>
- German, R. C., Panesci, J. H., & Clark, H. K. ,1963. 03 - An Analysis of Second-Throat DiffuserPerformance for Zero-Secondary-Flow Ejector Systems. <https://doi.org/10.21236/ad0294138>
- Mittal, A., Rajesh, G., Lijo, V., & Kim, H. D. (2014). Starting transients In Vacuum Ejector-Diffuser System. *Journal of Propulsion and Power*, 30(5), 1213–1223. <https://doi.org/10.2514/1.b35088>
- Park, B. H., Lim, J. H., & Yoon, W. (2008). Fluid dynamics in starting and terminating transients of Zero Secondary Flow ejector. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(1), 327–339.