

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİPTEN YANMA ÜNİTELİ TOPÇU MERMİLERİNDEKİ DİP BÖLGESİ  
SÜRÜKLEME KUVVETİ AZALTIMININ HESAPLAMALI YÖNTEMLERLE  
ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali AT**

**Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Uçak ve Uzay Mühendisliği Lisansüstü Programı**

**HAZİRAN 2019**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİPTEN YANMA ÜNİTELİ TOPÇU MERMİLERİNDEKİ DİP BÖLGESİ  
SÜRÜKLEME KUVVETİ AZALTIMININ HESAPLAMALI YÖNTEMLERLE  
ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ali AT  
511131101**

**Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Uçak ve Uzay Mühendisliği Lisansüstü Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bayram ÇELİK**

**HAZİRAN 2019**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511131101 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ali AT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DİPTEN YANMA ÜNİTELİ TOPÇU MERMİLERİNDEKİ DİP BÖLGESİ SÜRÜKLEME KUVVETİ AZALTIMININ HESAPLAMALI YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Bayram ÇELİK**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Mehmet ŞAHİN**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Kürşat Melih GÜLEREN**  
Anadolu Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 2 Mayıs 2019  
**Savunma Tarihi** : 11 Haziran 2019





*Eşime,*



## ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinde, dipten yanma ünitesi topçu mermilerindeki dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltımının hesaplamalı yöntemlerle araştırılması konusu çalışılmıştır.

Bu çalışmadaki destek ve katkılarından dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Bayram ÇELİK'e, bu süreçte beni destekleyen ve sıkıntılarımı paylaşan eşim Özge KAYGISIZCAN AT'a çok teşekkür ederim.

Mayıs 2019

Ali AT  
Uçak Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Araştırması .....	5
1.2 Sürüklenme Kuvveti.....	10
1.3 DYÜ Akış Fiziği .....	10
1.4 Deney Tasarımı Felsefesi .....	11
<b>2. ANALİZLER.....</b>	<b>13</b>
2.1 Korunum Denklemleri.....	13
2.2 Dipten Yanma Modeli.....	14
2.3 Sayısal Yöntemler .....	15
2.3.1 Fiziksel modeller.....	15
2.3.2 Sayısal çözüm .....	20
<b>3. SONUÇ VE YORUMLAR.....</b>	<b>21</b>
3.1 Çözüm Ağı Yakınsatma Çalışması .....	21
3.2 Türbülans Modeli Etkisi Çalışması .....	22
3.3 Doğrulama Çalışmaları.....	23
3.3.1 Sesüstü aksenal yakıcı çalışması.....	23
3.3.2 DYÜ'lü topçu mermisi çalışması.....	28
3.4 DYÜ Karakteristiği .....	33
<b>4. DEĞERLENDİRMELER .....</b>	<b>37</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>39</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>41</b>



## KISALTMALAR

<b>DYÜ</b>	: Dipten Yanma Ünitesi
<b>HAD</b>	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
<b>BDB</b>	: Birinci Devridaim Bölgesi
<b>İDB</b>	: İkinci Devridaim Bölgesi
<b>İng.</b>	: İngilizce
<b>enj.</b>	: enjeksiyon
<b>vb.</b>	: ve benzeri
<b>s.</b>	: sayfa



## SEMBOLLER

<b><math>P_b</math></b>	: Dip bölgesi basıncı
<b><math>P_\infty</math></b>	: Serbest akış basıncı
<b><math>r</math></b>	: Yarıçap
<b><math>R_b</math></b>	: Dip bölgesi yarıçapı
<b><math>F_{Db}</math></b>	: Dip bölgesi sürüklenme kuvveti
<b><math>X</math></b>	: Eksenel koordinat
<b><math>T</math></b>	: Sıcaklık
<b><math>T_\infty</math></b>	: Serbest akış sıcaklığı
<b><math>C_{Db}</math></b>	: Dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı
<b><math>H_0</math></b>	: Sıfır hipotezi
<b><math>H_a</math></b>	: Alternatif hipotez
<b><math>E</math></b>	: Eğrisellik
<b><math>p_{sa}</math></b>	: Dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltım parametresi



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Karbon monoksit oksidasyon mekanizması (Gibeling ve Buggeln 1992). .....	15
Çizelge 2.2 : Ses üstü aksel yakıcı akış sınır koşulları (Jarrett ve diğ. 1988). .....	17
Çizelge 2.3 : DYÜ'lü topçu mermisi akış sınır koşulları (Gibeling ve Buggeln 1992).. .....	19
Çizelge 3.1 : Çözüm ağı eleman sayısı için dip bölgesi sürüklenme kuvveti ve yüzde farkları. ....	22
Çizelge 3.2 : Türbülans modeli etkisi için dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı ve yüzde farkları. ....	22
Çizelge 3.3 : Gibeling ve Buggeln (1992) çalışması dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı ve yüzde azaltım değerleri .....	32
Çizelge 3.4 : Mevcut çalışma dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı ve yüzde azaltım değerleri. ....	32
Çizelge 3.5 : Deney tasarımı için seçilen faktörlerinin düzeyleri. ....	33
Çizelge 3.6 : Deney tasarımı ve sürüklenme kuvveti azaltım parametresi. ....	33
Çizelge 3.7 : Deney tasarımı için eklenen orta nokta düzeyleri. ....	35
Çizelge 3.8 : Orta nokta ve sürüklenme kuvveti azaltım parametresi. ....	35



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Plazma tahrik düzeneği şeması (Corke ve diğ. 2008). .....	1
Şekil 1.2 : Geçirgen ortam uygulanmayan kanat profili akış şeması (Onn ve diğ. 2001). .....	2
Şekil 1.3 : Geçirgen ortam uygulanan kanat profili akış şeması (Onn ve diğ. 2001)..	2
Şekil 1.4 : Deliksiz burun akış şeması (Kahurana ve diğ. 2012). .....	3
Şekil 1.5 : Delikli burun akış şeması (Kahurana ve diğ. 2012). .....	3
Şekil 1.6 : Düz kuyruklu topçu mermisi .....	4
Şekil 1.7 : Konik kuyruklu topçu mermisi .....	4
Şekil 1.8 : DYÜ'lü topçu mermisi. ....	5
Şekil 1.9 : DYÜ bileşenleri. ....	5
Şekil 1.10 : Merkezi enjeksiyon durumunda eş değer akış dip geometrisi şeması (Cavalleri 1988). .....	6
Şekil 1.11 : Kenar enjeksiyonu durumunda eş değer akış dip geometrisi şeması (Cavalleri 1988) . .....	6
Şekil 1.12 : Dip bölgesi basıncına gaz çıkış alanı açıklık oranı etkisi (Kayser 1975). ....	7
Şekil 1.13 : Dip bölgesi basıncına serbest akış Mach Sayısı etkisi (Bowman ve Clayden 1967). .....	7
Şekil 1.14 : Dip bölgesi basıncına enjeksiyon gazı sıcaklığı etkisi (Clayden ve Bowman 1968). .....	8
Şekil 1.15 : Dip bölgesinin şematik gösterimi (Mathur ve Dutton 1995). .....	8
Şekil 1.16 : İki fazlı DYÜ enjeksiyon durumu akış şeması (Bournot ve diğ. 2006)..	9
Şekil 1.17 : Konik kuyruk, dip çukuru ve DYÜ'lü mermi dip bölgesi geometri parametreleri (Suliman ve diğ.2009). .....	9
Şekil 1.18 : Mermi üzerine etkiyen sürükleme kuvveti türleri (Youssef ve diğ. 2015). .....	10
Şekil 1.19 : DYÜ'süz ses üstü akış şeması (Bournot ve diğ. 2006). .....	11
Şekil 1.20 : DYÜ'lü ses üstü akış şeması (Bournot ve diğ. 2006). .....	11
Şekil 2.1 : Deney düzeneği şeması (Jarrett ve diğ. 1988). .....	16
Şekil 2.2 : Hesaplama alanı şeması (Jarrett ve diğ. 1988). .....	16
Şekil 2.3 : Ses üstü aksel yakıcı çözüm ağı. ....	16
Şekil 2.4 : Ses üstü aksel yakıcı sınır koşulları şeması. ....	17
Şekil 2.5 : Mermi şeması (Danberg 1990). .....	17
Şekil 2.6 : DYÜ'lü topçu mermisi tam çözüm ağı. ....	18
Şekil 2.7 : DYÜ'lü topçu mermisi azaltılmış çözüm ağı. ....	18
Şekil 2.8 : DYÜ'lü topçu mermisi azaltılmış çözüm ağı sınır tabakası. ....	19
Şekil 2.9 : DYÜ'lü topçu mermisi sınır koşulları şeması. ....	19
Şekil 3.1 : Boyutsuz dip bölgesi basıncının boyutsuz yarıçapa göre değişimi. ....	21
Şekil 3.2 : Dip bölgesi sürükleme kuvvetinin çözüm ağı eleman sayısı ile değişimi. ....	22
Şekil 3.3 : Aksel istasyonlar (Jarrett ve diğ. 1988). .....	23

Şekil 3.4 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X0 istasyonu sıcaklık profili.....	23
Şekil 3.5 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X1 istasyonu sıcaklık profili.....	24
Şekil 3.6 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X2 istasyonu sıcaklık profili.....	24
Şekil 3.7 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X3 istasyonu sıcaklık profili.....	25
Şekil 3.8 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X4 istasyonu sıcaklık profili.....	25
Şekil 3.9 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X0 istasyonu hız profili. ....	26
Şekil 3.10 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X1 istasyonu hız profili. ....	26
Şekil 3.11 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X2 istasyonu hız profili. ....	27
Şekil 3.12 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X3 istasyonu hız profili. ....	27
Şekil 3.13 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X4 istasyonu hız profili. ....	28
Şekil 3.14 : Dip bölgesi cansız durum (a) boyutsuz basınç konturları. ....	29
Şekil 3.15 : Dip bölgesi sıcak hava enjeksiyonu durumu (b) boyutsuz basınç konturları.....	29
Şekil 3.16 : Dip bölgesi H <sub>2</sub> -CO gazı enjeksiyonu durumu (c) boyutsuz basınç konturları.....	29
Şekil 3.17 : Dip bölgesi H <sub>2</sub> -CO gazı yanma durumu (d) boyutsuz basınç konturları.....	30
Şekil 3.18 : Dip bölgesi cansız durum (a) sıcaklık konturları ve akış çizgileri. ....	30
Şekil 3.19 : Dip bölgesi sıcak hava enjeksiyonu durumu (b) sıcaklık konturları ve akış çizgileri.....	31
Şekil 3.20 : Dip bölgesi H <sub>2</sub> -CO gazı enjeksiyonu durumu (c) sıcaklık konturları ve akış çizgileri.....	31
Şekil 3.21 : Dip bölgesi H <sub>2</sub> -CO gazı yanma durumu (d) sıcaklık konturları ve akış çizgileri. ....	31
Şekil 3.22 : Serbest akış sıcaklığı kontur çizgileri a) cansız durum b) sıcak hava enjeksiyonu durumu c) H <sub>2</sub> -CO gazı enjeksiyonu durumu d) H <sub>2</sub> -CO gazı yanma durumu.....	32
Şekil 3.23 : Sürüklenme kuvveti azaltım parametresine etki eden faktör ve etkileşimler.....	34

# DİPTEN YANMA ÜNİTELİ TOPÇU MERMİLERİNDEKİ DİP BÖLGESİ SÜRÜKLEME KUVVETİ AZALTIMININ HESAPLAMALI YÖNTEMLERLE ARAŞTIRILMASI

## ÖZET

Bu çalışmanın temel amacı dipten yanma üniteli topçu mermilerinde dip bölgesi akış fiziğini ve DYÜ karakteristiği hesaplamalı yöntemlerle detaylı olarak incelemektir. Bu kapsamda DYÜ fiziğini anlamak için doğrulama çalışmaları yürütülmüş, farklı parametrelerin etkileri incelenmiş ve menzil arttırımı konusunda büyük etkisi olduğu bilinen dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltımı için matematiksel bir model üretilmiştir.

Tezde yer alan HAD analizleri problem fiziğinin karmaşıklığından dolayı eksenele simetrik olarak gerçekleştirilmiştir. DYÜ yanma durumu için sonlu oranlı kimyasal yanma modeli kullanılmış olup, literatür ve Fluent teori rehberinden elde edilen bilgiler doğrultusunda türbülans modeli olarak Transition SST tercih edilmiştir.

İlk olarak mermi çalışmalarının güvenilirliği açısından çözüm ağı yakınsatma çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda üretilen farklı yoğunluklardaki çözüm ağları için dip bölgesi basınç değişimleri, dip bölgesi sürüklenme kuvveti değişimleri ve yüzde farkları hesaplanmıştır. Bu göstergeler değerlendirilerek sonraki mermi çalışmalarda gerçekleştirilecek olan HAD analizlerinde kullanılmak üzere çözüm ağından bağımsız sonuç veren 15696 eleman sayılı çözüm ağı tercih edilmiştir.

Bu tezde kullanılan yanma modeli için iki farklı doğrulama çalışması gerçekleştirilmiştir. İlk çalışma sesüstü eksenele yakıcı deneyidir. Bu deneyde bir düzenek yardımıyla H<sub>2</sub> gazı ve hava karışımı iki ayrı jetle eş zamanlı olarak serbest akışa püskürtülmektedir. Kimyasal olarak reaktif olan H<sub>2</sub> gazı ve hava karışımının buluşmasıyla tutuşma meydana gelmektedir. Doğrulama çalışmasında kapsamında farklı eksenele istasyonlarda sıcaklık ve hız profilleri karşılaştırılmıştır. Jet çıkışına yakın bölgelerdeki hız profillerinde bir takım uyuşmazlıklar görülsede diğer istasyonlardaki sıcaklık ve hız profilleri oldukça benzerdir. Bu çalışma sayesinde yanma modelinin belirli bir seviyede güvenilir olduğu kanıtlanmıştır.

İkinci doğrulama çalışması için DYÜ teknolojinin sayısal olarak incelendiği çalışma seçilmiştir. Bu çalışmada serbest akışa maruz kalan merminin dip bölgesi DYÜ ile kimyasal olarak reaktif olmayan sıcak hava ve kimyasal olarak reaktif olan H<sub>2</sub>-CO gazı ile beslenmektedir. Çalışmada DYÜ cansız (enjeksiyonun olmadığı) durumu, sıcak hava enjeksiyonu durumu ve H<sub>2</sub>-CO gazı yanması olmak üzere 3 farklı durum için sayısal çözümler verilmiştir. Doğrulama çalışmasına ek olarak yanmanın modellenmediği H<sub>2</sub>-CO gazı enjeksiyonu durumu çalışılmıştır. HAD analizleri sonucunda DYÜ cansız durumu ve sıcak hava enjeksiyonu durumları için doğrulama çalışması ile benzer dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı azaltımı değerleri elde edilmiş, yanma durumunda ise kullanılan yanma modellerinin farklı olmasından dolayı %3'lük bir fark gözlemlenmiştir. Dip bölgesi yanma durumunun dip bölgesine

kütle aktarımının yanında ısı enerjisi aktarımında yaptığı, bu sayede dip bölgesi sürüklenme kuvvetini daha fazla azalttığı görülmüştür. İkinci doğrulama çalışması ile yanma modeli istenilen seviyede doğrulanmıştır.

Geçerli seviyede güven veren doğrulama çalışmalarının ardından DYÜ karakteristiğini daha iyi anlamak için serbest akış Mach Sayısı, uçuş irtifa ve DYÜ debisi faktörleri ile  $2^k$  tam faktöriyel deney tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan deney noktalarında sonlu oranlı kimyasal yanma modeli kullanılarak HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltım parametresi elde edilmiştir. Deney tasarımı ticari Minitab istatistiksel yazılımı kullanılarak analiz edilmiş faktörlerin ve bu faktörlerin birbiri ile etkileşiminin dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltım sayısına etkisi elde edilmiştir. Dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltım parametresine en büyük etkinin %59 ile Mach Sayısı, irtifa ve debi etkileşim etkisinin %13 olduğu, diğer ikili etkileşimlerin ve üçlü etkileşimin toplam etkilerinin kabul edilebilir risk olan %5'in altında olduğu bulunmuştur. Dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltım parametresi için kabul edilebilir risk aralığında matematiksel bir model üretilmiş, bu modelin tüm düzey ve ara noktalarda kullanılabilir olduğu ispatlanmıştır. Bu tez çalışmasında üretilen matematiksel model kullanılarak 155 [mm] M864 topçu mermisi için menzil tahminlerinde dip bölgesi sürüklenme kuvveti girdisi sağlanabilir.

# **NUMERICAL INVESTIGATION OF BASE DRAG REDUCTION FOR BASE BLEED PROJECTILE**

## **SUMMARY**

The main objective of this study is to investigate the base flow physics for base bleed projectile and base bleed unit characteristics by using computational methods. In this context, validation studies were carried out to understand the physics of base bleed unit, the effects of different parameters were examined and a mathematical model was produced for the base drag reduction, which is known to have a great effect on the range increase.

The CFD analysis in the thesis were carried out as an axially symmetric due to the complexity of the problem physics. Finite rate chemical combustion model is used for the base bleed combustion situation and Transition SST has been preferred as the turbulence model according to the literature and the information obtained from the Fluent theory guide.

First of all, a grid convergence study was conducted for the reliability of the projectile studies. In this context, base pressure changes, base drag variations and percentage differences were calculated for different grid densities. These indicators were evaluated and the grid of 15696 element numbers was chosen to be used in the CFD analyses to be performed in subsequent projectile studies.

Two different validation studies were performed for the combustion model used in this thesis. The first study was a supersonic axial burner experiment. In this experiment, H<sub>2</sub> gas and air mixture are sprayed to the free flow simultaneously with two separate jets by means of a device. Reaction occurs when the chemically reactive H<sub>2</sub> gas and the air mixture meet. Temperature and velocity profiles were compared in different axial stations within the validation study. Although there are some mismatches in the velocity profiles in stations close to the jet exit, the temperature and velocity profiles in the other stations are very similar with experiment. Under favour of this study, the combustion model has been proven to be reliable at a certain level.

For the second validation study, the projectile base bleed technology was selected which examined numerically. In this study, the base area of the projectile exposed to free flow is fed with non-chemically reactive hot air and chemically reactive H<sub>2</sub>-CO gas. In the study, numerical solutions were given for 3 different conditions, including non-injection case, hot air injection case and H<sub>2</sub>-CO gas combustion case. In addition to the validation study, H<sub>2</sub>-CO gas injection case was studied without modelling combustion. As a result of CFD analysis, similar base drag coefficient reduction values were obtained for non-injection case and hot air injection case, and a difference of 3% was observed because of the different combustion models used for combustion case. It is seen that the base combustion case transmits heat energy to the base region as well as mass addition, thus decreasing the base drag force more. With

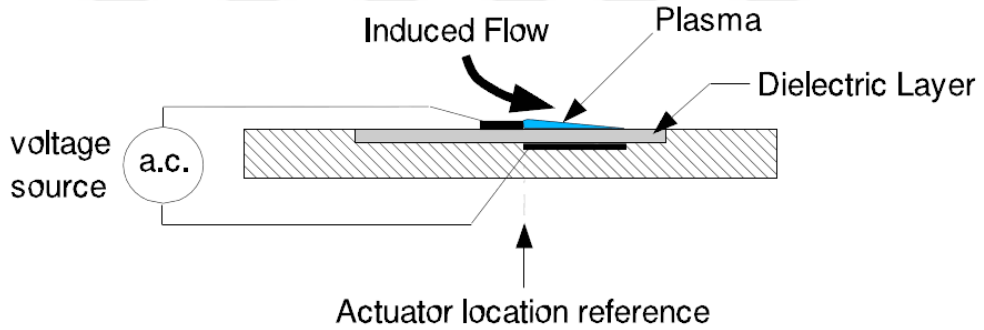
the second validation study, the combustion model was confirmed at the desired level.

After validation studies which giving confidence at the acceptable level, a  $2^k$  full factorial design of experiment was performed with free flow Mach Number, flight altitude and base bleed mass flow rate factors to better understand the characteristics of the base bleed unit. CFD analysis were performed by using the finite rate chemical combustion model at the designed experiment points and the base drag reduction parameter was obtained. The effects of the factors and the interaction of these factors with each other on the base drag reduction parameter were obtained by statistically analyzed the design of experimental using commercial Minitab software. It was found that the greatest effect on to the base drag reduction parameter was the Mach Number with 59%, altitude and mass flow rate interaction effect was 13%, and the overall effects of the other bilateral interactions and triple interaction were below the acceptable risk of 5%. A mathematical model has been produced in the acceptable risk range for the base drag reduction parameter, which has proven to be usable at all levels and intermediate points. Using the mathematical model generated in this thesis, a base drag force input can be provided in the range estimations for 155 [mm] M864 artillery bullet.

## 1. GİRİŞ

Roket, füze ve mermi gibi aerodinamik savunma sanayisi ürünleri uçuş sırasında dip bölgesindeki akışın ayrılmasından dolayı dip bölgesi sürüklenme kuvvetine maruz kalırlar. Sürüklenme kuvveti yakıt tüketimi ve menzil konusunda oldukça önemli bir parametredir. Özellikle ses hızı civarındaki uçuşlarda sürüklenme kuvvetinin %50 bileşeni dip bölgesi sürüklemesidir (Sahu ve Nietubicz 1985). Bu sebepten dolayı dip bölgesi sürüklenme kuvvetindeki azaltım yakıt tüketimi ve menzil artırımını konularında oldukça önemlidir. Dip bölgesindeki düşük basınç alanının sebep olduğu dip bölgesi sürüklenme kuvvetini azaltmak için pasif ve aktif olmak üzere birçok kontrol yöntemi geliştirilmiştir.

Corke ve diğ. (2008) çalışmasında yer alan Şekil 1.1'de şematik olarak gösterilen plazma tahrik düzeneği aktif yöntemlerden biridir.

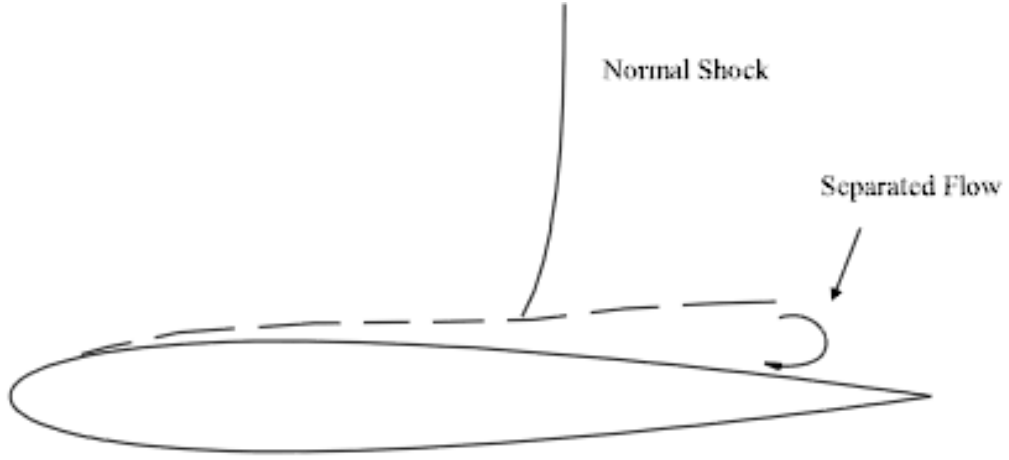


Şekil 1.1 : Plazma tahrik düzeneği şeması (Corke ve diğ. 2008).

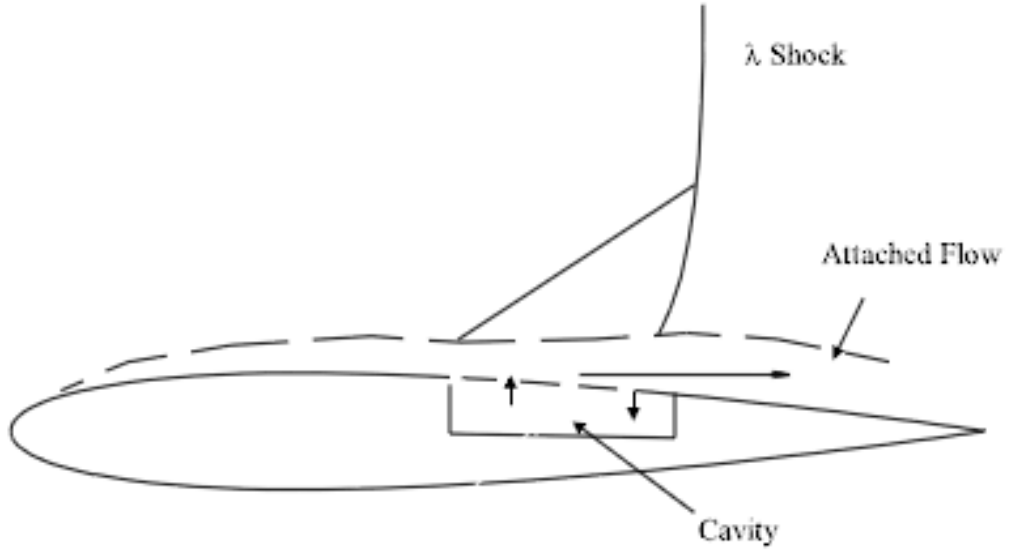
Bu düzenek tahmin edilen akış ayrılma bölgesine yerleştirilir. Bu bölgedeki hava iyonize edilerek basınç farkı oluşturulur, bu fark sebebiyle yüzeyi takip eden suni bir jet oluşur. Oluşan suni jet akım ayrılmasını engeller ve dip bölgesi sürüklenme kuvvetini azaltır.

Onn ve diğ. (2001) çalışmasında yer alan geçirgen ortam uygulaması ise pasif yöntemlerden biridir. Akış ayrılmasından dolayı meydana gelen şok dalgasının önü ve arkasını kaplayacak şekilde yüzey geçirgen hale getirilir. Şok dalgasının arkasındaki yüksek basınç bölgesi akışı sürerek şokun önünde yer alan alçak basınç bölgesine taşır, bu birleşim şokun gücünü azaltır daha az güçlü lamda şokunu meydana getirir. Bu sayede akış ayrılması engellenir ve sürüklenme kuvveti azaltılır.

Şekil 1.2 ve Şekil 1.3’de sırasıyla geçirgen ortam uygulaması yapılmayan ve yapılan kanat profili akış şemaları gösterilmiştir.

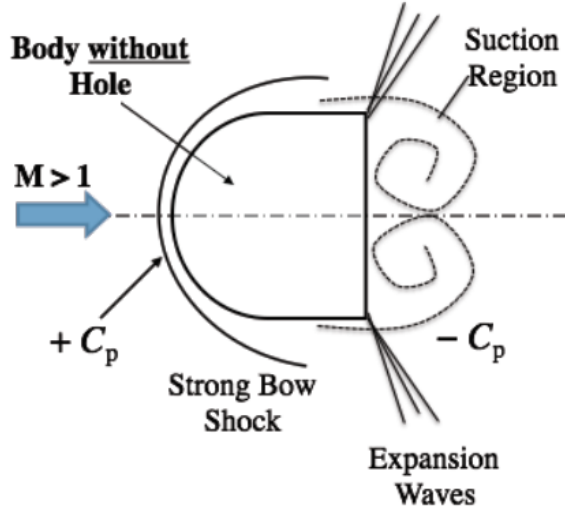


Şekil 1.2 : Geçirgen ortam uygulanmayan kanat profili akış şeması (Onn ve diğ. 2001).

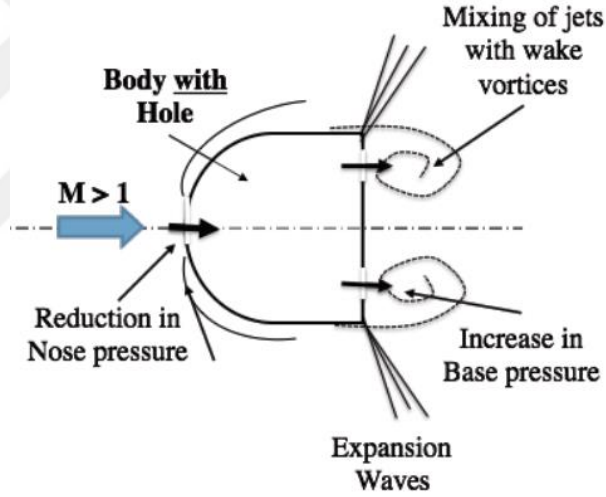


Şekil 1.3 : Geçirgen ortam uygulanan kanat profili akış şeması (Onn ve diğ. 2001).

Bir başka pasif sürüklenme kuvveti azaltma yöntemi ise delikli burun kullanımınıdır (Kahurana ve diğ. 2012). Burun şeklinden dolayı ses üstü akışta meydana gelen yay şok dalgası burunda yüksek basınç bölgesi oluşturur. Dip bölgesinde genişleyen akış ise genişleme dalgası meydana getirir. Dip bölgesindeki genişleme dalgası dip bölgesinde düşük basınç bölgesi oluşturur (Şekil 1.4). Delikli burun kullanımında burundan dibe doğru açılan bir kanalla akış yüksek basınç bölgesinden alçak basınç bölgesine sürülür. Bu sayede burun basıncı düşürülürken dip bölgesi basıncı artırılır ve sürüklenme kuvveti azaltılmış olur (Şekil 1.5).



Şekil 1.4 : Deliksiz burun akış şeması (Kahurana ve diğ. 2012).



Şekil 1.5 : Delikli burun akış şeması (Kahurana ve diğ. 2012).

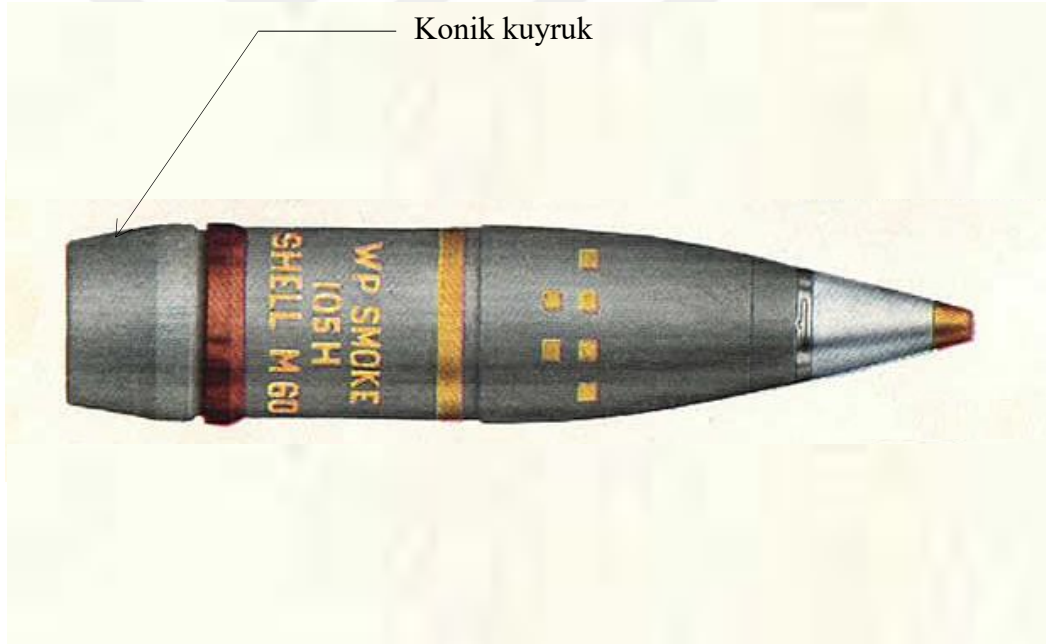
Bu çalışmada farklı çapta burun delikleri kullanılmış ve sürüklenme kuvveti katsayıları hesaplanmıştır. 5 mm çaplı burun deliği kullanımı sürüklenme kuvveti katsayısını bütün hücum açılarında düşürmüştür.

Konik kuyruk ve dipten yanma ünitesi (DYÜ) topçu mermilerinde dip bölgesi sürüklenme kuvvetini azaltmak için günümüzde kullanılan iki yaygın yöntemdir.

Konik kuyruk kullanımı genişleme dalgasına maruz kalan dip bölgesi alanını azaltarak sürüklenme kuvvetinin azalmasını sağlar. Kuyruk açısı ve dip geometrisi eniyilenecek %7 mertebesinde sürüklenme kuvveti azaltımı sağlanabilir. Topçu mermisinde düz ve konik kuyruk kullanımı Şekil 1.6 ve Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.6 : Düz kuyruklu topçu mermisi**



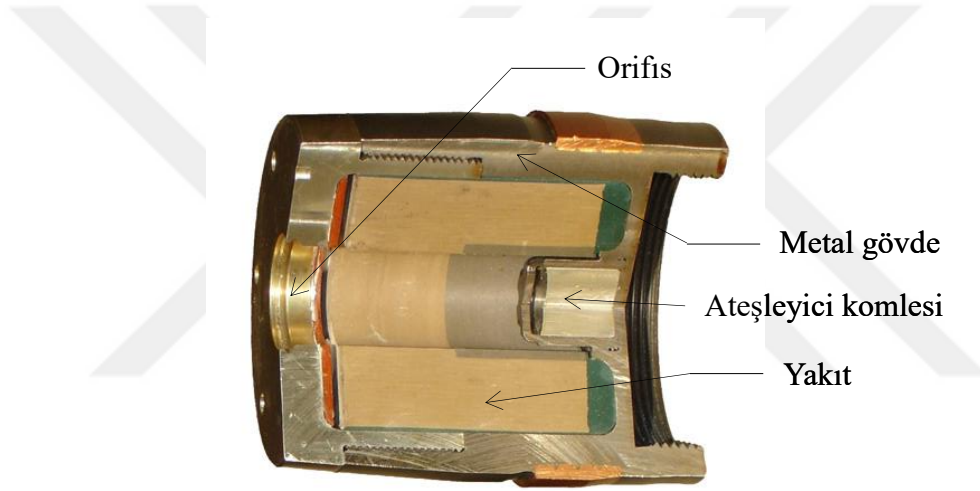
**Şekil 1.7 : Konik kuyruklu topçu mermisi**

Topçu mermisi uçuşu sırasında DYÜ içerisindeki katı yakıt yakılarak itki oluşturmayan düşük hızlı bir akış ile dip bölgesi beslenir. Şekil 1.8’de DYÜ’lü topçu mermisi gösterilmiştir.

Bu akış ile dipten yanma ünitesi (İng. base bleed) ana akıştan ayrılıp dip bölgesinde meydana gelen devridaim bölgesine enerji ve kütle aktarımı sağlar. Enerji ve kütle aktarımı dip bölgesindeki basıncı artırır ve sürükleme kuvvetini %30 mertebesinde azaltılır. Şekil 1.9’de kesit alınarak DYÜ bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 1.8 : DYÜ'lü topçu mermisi.



Şekil 1.9 : DYÜ bileşenleri.

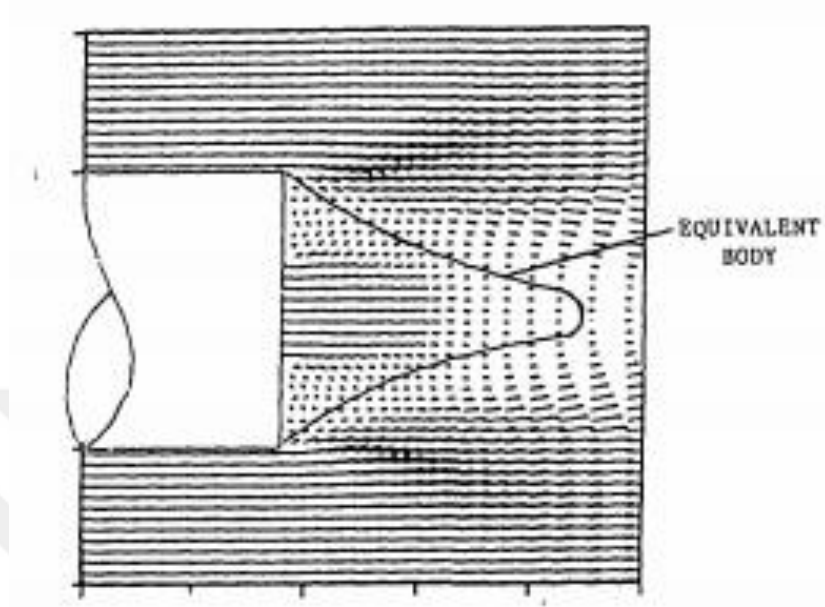
### 1.1 Literatür Araştırması

Literatürde DYÜ ile alakalı birçok çalışma bulunmaktadır. İlk olarak bu sürüklenme azaltım yöntemi Baker ve diğ. (1951) tarafından önerilmiştir.

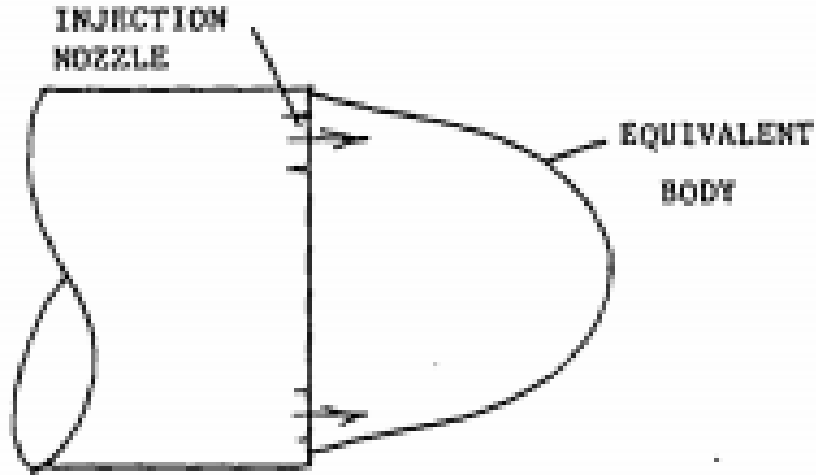
US Arm Ballistic Research Laboratory çalışanları Sturek, Nietubicz, Sahu ve Danberg tarafından hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile karmaşık fiziksel akışların hesaplanmasındaki gelişmeler ve yüksek başarımlı bilgisayarların yaygınlaşmasından sonra topçu mermisi akış fiziği alanında 1978-1986 arasında birçok çalışma yürütülmüştür.

Cavalleri (1987) tarafından yayınlanan teknik raporda kenar ve merkezi enjeksiyonun dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısına etkisini çalışılmıştır. Kenar

enjeksiyonunun oluşturduğu eşdeğer dip gövdesi merkezi enjeksiyona göre serbest akışı daha fazla takip ettiği için aynı kütle enjeksiyon oranında daha düşük sürüklenme kuvvetine sahiptir. Şekil 1.10 ve Şekil 1.11’de sırasıyla merkezi ve kenar enjeksiyonu durumlarındaki eş değer akış dip geometri şemaları verilmiştir.

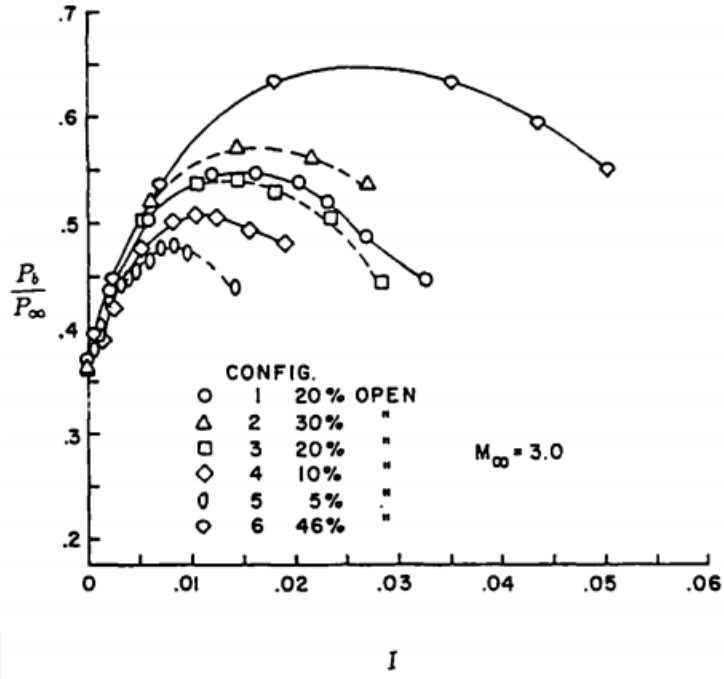


**Şekil 1.10** : Merkezi enjeksiyon durumunda eş değer akış dip geometri şeması (Cavalleri 1988).

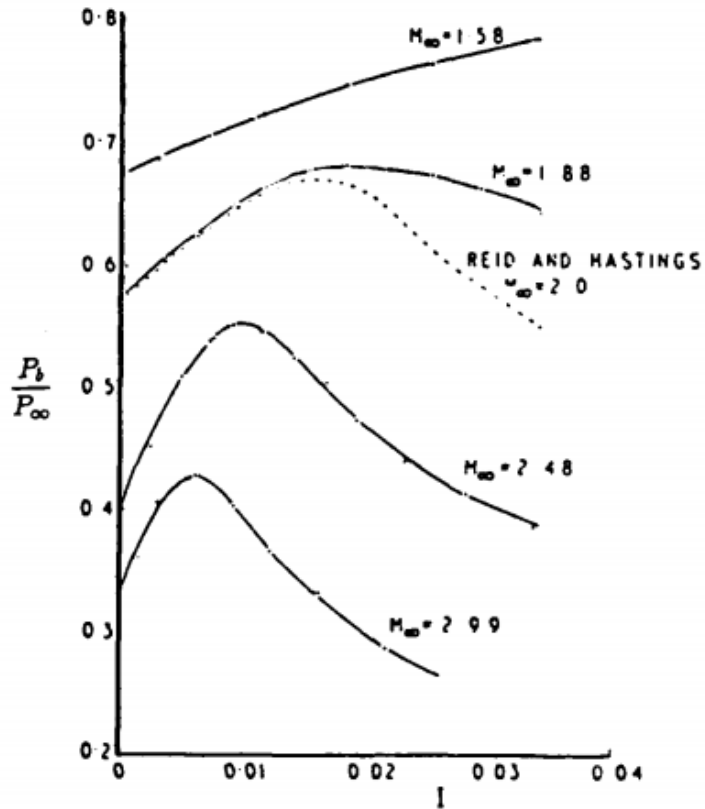


**Şekil 1.11** : Kenar enjeksiyonu durumunda eş değer akış dip geometri şeması (Cavalleri 1988).

Danberg (1990) yayınladığı teknik raporda farklı referanslardan elde ettiği dip bölgesi basıncına etki eden parametreleri göstermiştir. Şekil 1.12, Şekil 1.13 ve Şekil 1.14’de sırasıyla gaz çıkış alanı açıklık oranı, serbest akış Mach Sayısı ve enjeksiyon gazı sıcaklığı değişimlerinin dip bölgesi basıncını nasıl etkilediğini gösterilmiştir.

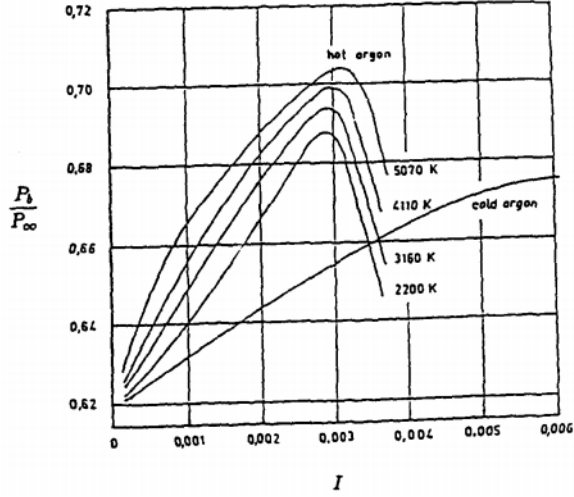


Şekil 1.12 : Dip bölgesi basıncına gaz çıkış alanı açıklık oranı etkisi (Kayser 1975).



Şekil 1.13 : Dip bölgesi basıncına serbest akış Mach Sayısı etkisi (Bowman ve Clayden 1967).

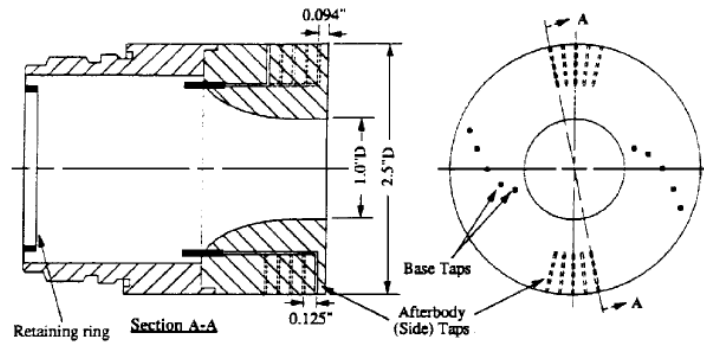
Dip bölgesi basıncı artan açıklık oranıyla birlikte artmış, Mach Sayısı artıka azalmış ve artan gaz sıcaklığıyla birlikte artmıştır.



**Şekil 1.14 :** Dip bölgesi basıncına enjeksiyon gazı sıcaklığı etkisi (Clayden ve Bowman 1968).

Gibeling ve Buggeln (1992) çalışmasında dip bölgesine enjekte edilen farklı gaz türlerinin dip bölgesi basıncına etkisini çalışmışlardır. Burada enjeksiyon olmadığı durum, sıcak hava enjeksiyonu durumu, H<sub>2</sub> gazı yanma durumu, ve H<sub>2</sub>-CO gazı yanma durumu olmak üzere dört farklı durum için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda DYÜ'nün aktif olduğu durumda yanma modellenmesinin gerekli olduğu anlaşılmıştır.

Sahu ve Heavey (1997) dip akışını sayısal olarak inceledikleri çalışmalarında dip bölgesi hız bileşenleri, türbülans kinetik enerji, türbülans kayma gerilmesi ve dip basıncı profillerini elde etmişlerdir. Bu çalışmada Mathur ve Dutton (1995) gerçekleştirdikleri deney çalışmasıyla oldukça benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 1.15'de deneyde kullanılan silindirik dip bölgesi kesit alınarak gösterilmiştir.



**Şekil 1.15 :** Dip bölgesinin şematik gösterimi (Mathur ve Dutton 1995).

Lee ve diğ. (2004) dip bölgesi sürüklenme kuvveti eniyileme çalışmalarında farklı türbülans modeli sonuçlarını deney verileriyle karşılaştırmış, en iyi modelin *k-w* türbülans modeli olduğunu belirtmişlerdir.



## 1.2 Sürüklenme Kuvveti

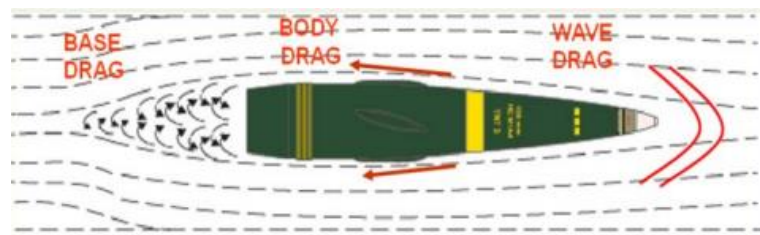
Akışkan içerisinde hareket eden cisme hareket yönünün tersinde etkiyen aerodinamik kuvvet sürüklenme kuvvetidir. Sürüklenme kuvveti cisim yüzeyine etkiyen teğetsel kuvvetin sebep olduğu viskoz sürüklenme ve cisim yüzeyine etkiyen basınç dağılımının sebep olduğu basınç sürüklenmesi olmak üzere iki temel bileşenden oluşur.

Viskoz sürüklenme kuvveti akışkan içinde hareket eden cismin yüzeyine akışkanın sürtünmesinden meydana gelir. Cisim yüzeyine değen akışkan katmanı yüzeye yapışır, bu akışkan katmanı bir sonraki akışkan katmanını durdurmaya çalışır. Bu diğer katmanlar boyunca devam eder, bundan dolayı bir miktar akışkan hareketli cisimle birlikte sürüklenir.

Basınç sürüklenme kuvveti akışkan içinde hareket eden cismin boylamsal şeklinin akışa engel olmasından dolayı harekete ters yönde meydana gelen kuvvettir.

Ses üstü hızlarda hareket eden cisim önünde basıncı süresiz bir şekilde artıran şok dalgası meydana gelir. Dalga sürüklenmesi bu şok dalgasının sebep olduğu enerji kaybından kaynaklanan bir tür basınç sürüklenme kuvvetidir.

Dip bölgesi sürüklenme kuvveti de bir çeşit basınç sürüklenmesidir. Akışkan içerisinde hareket eden cismin dip bölgesinde dış akıştan ayrılmış ikinci bir akış bölgesi oluşur. Bu bölgedeki basınç ortam basıncından düşüktür. Cismin ön ve dip bölgesindeki bu basınç farkından dolayı cisim hareketine ters yönde etkiyen dip bölgesi sürüklenme kuvveti oluşur. Şekil 1.18'de şematik olarak dip sürüklenmesi (İng. base drag), viskoz sürüklenme (İng. body drag) ve dalga sürüklenmesi (İng. wave drag) gösterilmiştir.

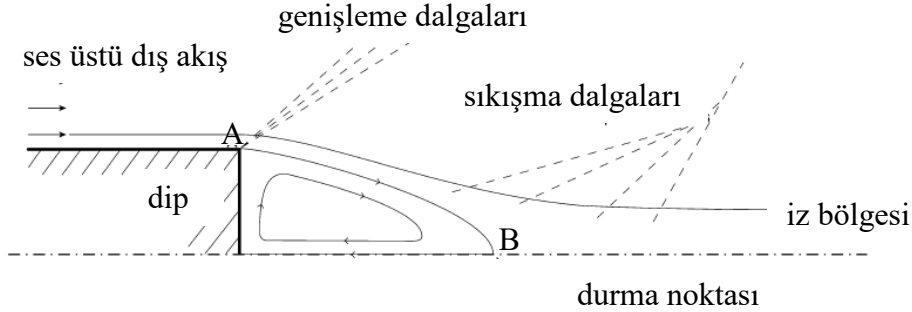


Şekil 1.18 : Mermi üzerine etkiyen sürüklenme kuvveti türleri (Youssef ve diğ. 2015).

## 1.3 DYÜ Akış Fiziği

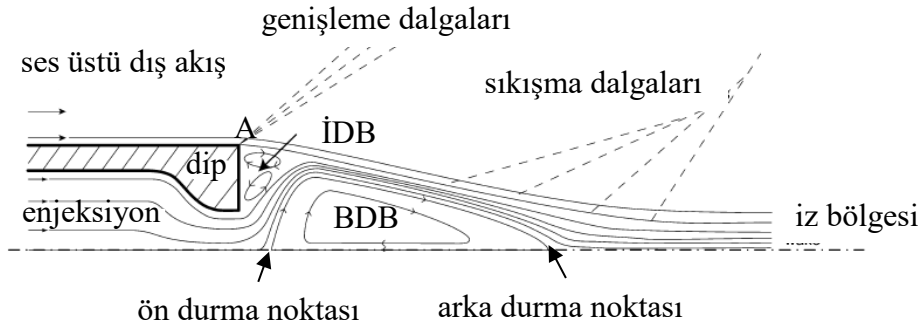
DYÜ'süz mermi yüzeyini takip eden akış dip köşe noktasından (A) ayrılarak aşağı doğru yönelen bir eğrilikle iz bölgesinden devam etmektedir (Şekil 1.19). Akış çizgisinin eğriliğinden dolayı A noktasında genişleme dalgaları, iz bölgesinde ise

tekrar sıkışma dalgaları meydana gelmiştir. Dipte oluşan devridaim bölgesi A noktasından başlayan ve simetri eksenindeki durma noktasında (B) biten akış çizgisiyle dış akıştan ayrılmıştır.



**Şekil 1.19** : DYÜ'süz ses üstü akış şeması (Bournot ve diğ. 2006).

Dibin DYÜ enjeksiyonu ile beslenmesiyle birincil devridaim bölgesi (BDB) iz bölgesine doğru ötelenmiştir (Şekil 1.20). Enjeksiyon bölgesinden kaçan gazlar ses üstü dış akış, dip yüzeyi ve BDB arasında ikincil bir devridaim (İDB) bölgesi meydana getirmiştir. BDB artık simetri eksenindeki ön durma noktasından başlayıp arka durma noktasında biten akış çizgisiyle dış ve enjeksiyon akışından ayrılmaktadır.



**Şekil 1.20** : DYÜ'lü ses üstü akış şeması (Bournot ve diğ. 2006).

#### 1.4 Deney Tasarımı Felsefesi

Mühendislik alanında yeni ürün ve süreç tasarımları veya mevcut ürün ve süreçlerin iyileştirilmesi sırasında deneysel çalışmalar yürütmek çok büyük önem arz etmektedir.

Girdilerde değişiklik yapılarak çıktıların gözlemlenmesi ile sistem, süreç vb. hakkında bilgi edinmek, tanımlamak veya anlamak için gerçekleştirilen test, analiz ve hesaplama çalışmalarının tamamına deney denir.

Deney tasarımı ise ( İng. design of experiment ) bir ürünü ya da süreci inceleyerek önemli faktörlerin belirlenmesi ve tasarımın eniyilemesini hedefleyen gelişmiş istatistiksel araçları kullanan teknik bir yöntemdir. İngiliz istatistikçi R.A Fisher ve arkadaşları tarafından 1920'lerde geliştirilmiştir.

Deneylemler sonunda kesin bir yargıya varmak için tasarım ya da sürecin bütün faktörleri değerlendirmek gerekir. Her seferinde bir faktör yaklaşımı en iyi değeri gözden kaçırmaya sebep olacağı gibi faktörler arasındaki etkileşim hakkında da bilgi vermez. Bu klasik yöntem hem pahalı, hem de gereksiz zaman ve emek sarfiyatına neden olur.

Gelişmiş istatistiksel yöntemler kullanılarak birçok faktörün etki ve etkileşiminin oldukça kısa bir sürede elde edilebileceği deneylemler tasarlanabilir. Tam faktöriyel deney tasarımı bu yöntemlerdir biridir. Bu yöntemdeki deney tasarımı faktörlerin herbir düzeyinin birbiri ile çarpılmasıyla oluşan kombinasyondur.

Tam faktöriyel deney tasarımında faktörlerin bütün düzeylerinin kombinasyonu tek tek denendiği için deney maliyeti ve süresi artmaktadır. Bazı çoklu etkileşim bilgilerden feragat ederek kesirli faktöriyel deneylemler tasarlanabilir. Bu çalışmada DYÜ karakteristiğini incelemek için 3 faktör ve her faktör için 2 düzey seçileceği için  $2^3$  kombinasyon denenecektir. Çok fazla sayıda kombinasyon olmadığından dolayı bu çalışmada tam faktöriyel bir deney tasarlanacaktır.

Minitab 1972 yılında Penn-State Üniversitesi'nde üç öğretim görevlisi (Barbara & Thomas Ryan, Brian Joiner) tarafından yazılmaya başlanan istatistiksel analiz programıdır. Minitab yazılımı ile hipotez testleri, normalite testleri, kapsamlı ölçüm sistemi analizleri, deney tasarımı, güvenilirlik analizleri ve süreç yeterlilik analizleri gerçekleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada belirlenen faktör ve etkileşimlerinin DYÜ karakteristiğine etkisini incelemek ve bu karakteristiğe bir matematiksel model üretmek için Minitab (18.0) yazılımı ile hipotez testleri ve deney tasarımı analizleri gerçekleştirilecektir.

## 2. ANALİZLER

### 2.1 Korunum Denklemleri

Bu tezde yer alan çalışmalar problem fiziğinin karmaşıklığından dolayı, eksenel simetrik olarak ele alınmıştır. Aşağıda akışkanlar mekaniği, türbülans taşınım ve türlerin korunumu denklemleri bağlaşıklık olarak korunumlu vektörel formda özetlenmiştir (2.1-2.9).

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial r} - \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial x} - \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial r} = \mathbf{W} + \mathbf{Q} + \mathbf{S} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{U} = [\rho, \rho u, \rho v, e, \rho k, \rho \omega, \rho_i] \quad (2.2)$$

$$\mathbf{F} = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (e + p)u, \rho ku, \rho \omega u, \rho_i u] \quad (2.3)$$

$$\mathbf{G} = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, (e + p)v, \rho kv, \rho \omega v, \rho_i v] \quad (2.4)$$

$$\mathbf{F}_v = \left[ 0, \tau_{xx}, \tau_{xr}, u\tau_{xx} + v\tau_{xr} + q_x, (\mu_l + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x}, (\mu_l + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x}, \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right] \quad (2.5)$$

$$\mathbf{G}_v = \left[ 0, \tau_{xr}, \tau_{rr}, u\tau_{xr} + v\tau_{rr} + q_r, (\mu_l + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial r}, (\mu_l + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial r}, \rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right] \quad (2.6)$$

$$\mathbf{W} = [0, 0, 0, 0, S_k, S_\omega, 0] \quad (2.7)$$

$$\mathbf{Q} = -\frac{v}{r} [\rho, \rho u, \rho v, e + p, \rho k, \rho \omega, \rho_i] \quad (2.8)$$

$$\mathbf{S} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, \sigma_i] \quad (2.9)$$

Burada  $\mathbf{U}$  korunumlu değişkenler vektörü,  $\mathbf{F}$  ve  $\mathbf{G}$  taşınım akı vektörleri,  $\mathbf{F}_v$  ve  $\mathbf{G}_v$  yayılma akı vektörleri,  $\mathbf{W}$  türbülans kaynak terimi,  $\mathbf{Q}$  eksenel simetrik kaynak terimi ve  $\mathbf{S}$  'de reaksiyon kaynak terimidir.  $x$  ve  $r$  sırasıyla eksenel ve radyal

koordinatlarıdır.  $u$  ve  $v$  aksel ve radyal hızlardır.  $\rho$  yoğunluktur.  $p$  basınç  $k$  türbülans kinetik enerjisi,  $\omega$  türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı,  $\tau$  viskoz stres,  $i$  1'den N'e kadar mevcut türleri,  $\lambda$  ısı iletim katsayısı,  $\mu_l$  laminar viskozite,  $\mu_t$  türbülans viskozite ve  $\sigma_i$  tür  $i$ 'nin kimyasal reaksiyon oranı temsil etmektedir. Isı taşınımı ve kütle yayılımından meydana gelen termal yayılım terimleri denklem 2.10 ve 2.11'de sırasıyla verilmiştir.

$$q_x = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \rho \sum_{i=1}^I D_i h_i \frac{\partial Y_i}{\partial x} \quad (2.10)$$

$$q_r = \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \rho \sum_{i=1}^I D_i h_i \frac{\partial Y_i}{\partial r} \quad (2.11)$$

$D_i$  moleküler kütle yayılımı,  $h_i$  özgül entalpi ve  $Y_i$  tür  $i$ 'nin kütle kesirini temsil etmektedir.

Birden fazla tür içeren karışım için toplam iç enerji denklem 2.12 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$e = \sum_{i=1}^I \rho_i h_i + \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) - p \quad (2.12)$$

Türbülans değişkenlerinden kaynaklanan denklem eksiklikleri detayları Fluent teori rehberinde anlatılan Transition SST modeli kullanılarak kapatılmıştır.  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\omega$  katsayıları ve  $S_k$ ,  $S_\omega$  türbülans kaynak terimlerinden Menter (1994) çalışmasında bahsedilmiştir.

## 2.2 Dipten Yanma Modeli

DYÜ katı yakıtı temel olarak yanıcı HTPB (hidroksi üçlü polibütadien) ve yakıcı AP(NH<sub>4</sub>CLO<sub>4</sub>) (amonyum perklorattan) oluşan oldukça zengin bir yakıt bileşimidir.

DYÜ katı yakıtın yanmasıyla CO, CO<sub>2</sub>, Cl, H, HCl, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ve N<sub>2</sub> gazları açığa çıkar. Ağırlıklı olarak karbon monoksit ve hidrojen içeren bu reaktif gaz havayla buluşunca yanmaya hazırdır. Sonradan gerçekleşen bu yanma ikincil devridaim bölgesindeki karışım oranına bağlı olarak önemli oranda ısı üretimine sebep olur.

Bu çalışmada kullanılacak yanma modeli için ileri reaksiyon oranları Arrhenius formunda denklem 2.13'de gösterilmiştir.

$$k_{fj} = AT^b \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2.13)$$

Geriye reaksiyon oranları denge katsayısı kullanılarak denklem 2.14 ile hesaplanmıştır.

$$k_b = k_c / k_f \quad (2.14)$$

Yanma modelinde kullanılan reaksiyon serileri ve Arrhenius sabitleri ileri reaksiyon için Çizelge 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1 :** Karbon monoksit oksidasyon mekanizması (Gibeling ve Buggeln 1992).

Numara	Reaksiyon	A	b	E <sub>a</sub> [kJ/mol]
1	H + O <sub>2</sub> = OH + O	1.20E+17	-0.91	69.1
2	H <sub>2</sub> + O = OH + H	1.50E+07	2	31.6
3	O + H <sub>2</sub> O = OH + OH	1.50E+10	1.14	72.2
4	OH + H <sub>2</sub> = H <sub>2</sub> O + H	1.00E+08	1.6	13.8
5	O + H + M = OH + M	1.00E+16	0	0
6	O + O + M = O <sub>2</sub> + M	1.00E+17	-1	0
7	H + H + M = H <sub>2</sub> + M	9.70E+16	-0.6	0
8	H <sub>2</sub> O + M = H + OH + M	1.60E+17	0	478
9	O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> = OH + OH	7.94E+14	0	187
10	CO + OH = CO <sub>2</sub> + H	4.40E+06	1.5	-3.1
11	CO + O + M = CO <sub>2</sub> + M	5.30E+13	0	-19
12	CO + O <sub>2</sub> = CO <sub>2</sub> + O	2.50E+12	0	200

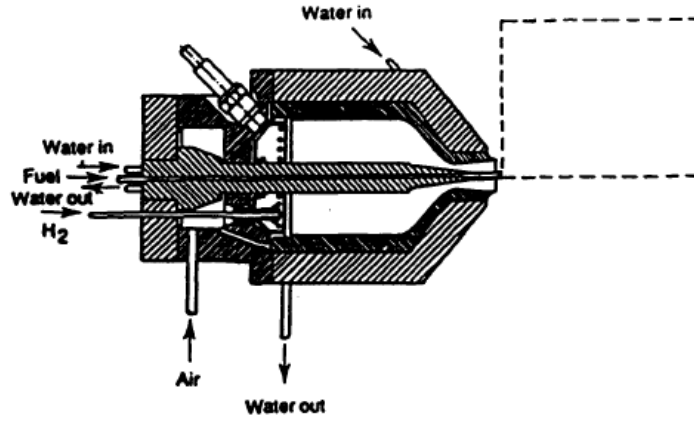
## 2.3 Sayısal Yöntemler

### 2.3.1 Fiziksel modeller

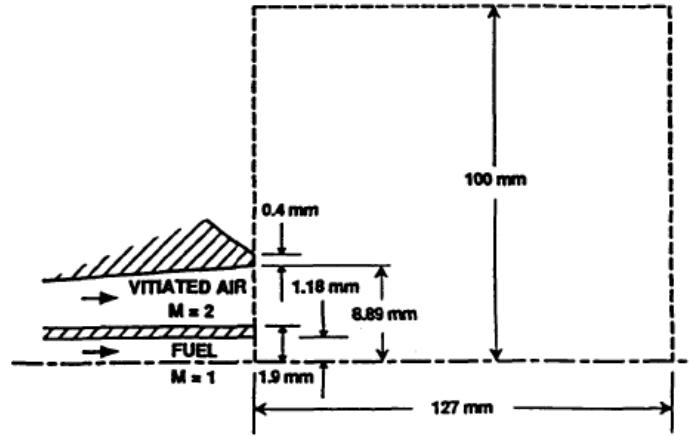
Yanma modeli doğrulama çalışmasının ilk adımı olarak Jarrett ve diğ. (1988) çalışmasında yer alan sesüstü aksenal yakıcı deneyi seçilmiştir. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de sırasıyla deney düzeneği ve hesaplama alanı şematik olarak gösterilmiştir. Ses üstü aksenal yakıcı düzeneği iç taraftan M=1.0 hızında H<sub>2</sub> gazı (yakıt) jetinin, dış tarafta ise M=2.0 hızında hava karışımı jetinin serbest akışa püskürtüldüğü bir sistemdir.

Şekil 2.3'de gösterilen çözüm ağı, H<sub>2</sub> gazı ve hava karışımı girişlerindeki elaman boyu 0.05 [mm] olacak şekilde 1.05 büyüme oranı ve yüzey elamanı limitleri kullanılarak oluşturulmuş olup 36116 adet yapısal olmayan elamandan oluşmaktadır. HAD çözücüsünde kullanılan akış sınır koşulları şematik olarak Şekil 2.4'de

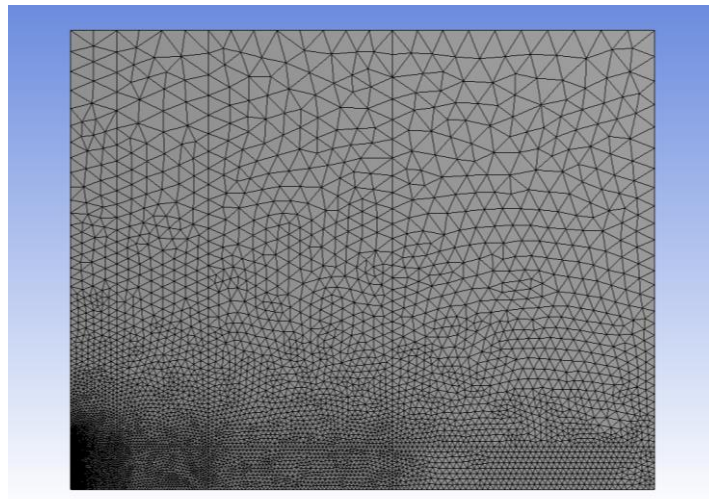
gösterilmiştir. Analizler için Jarrett ve diğ. (1988) çalışmasından elde edilen akış sınır koşulları Çizelge 2.2’de verilmiştir.



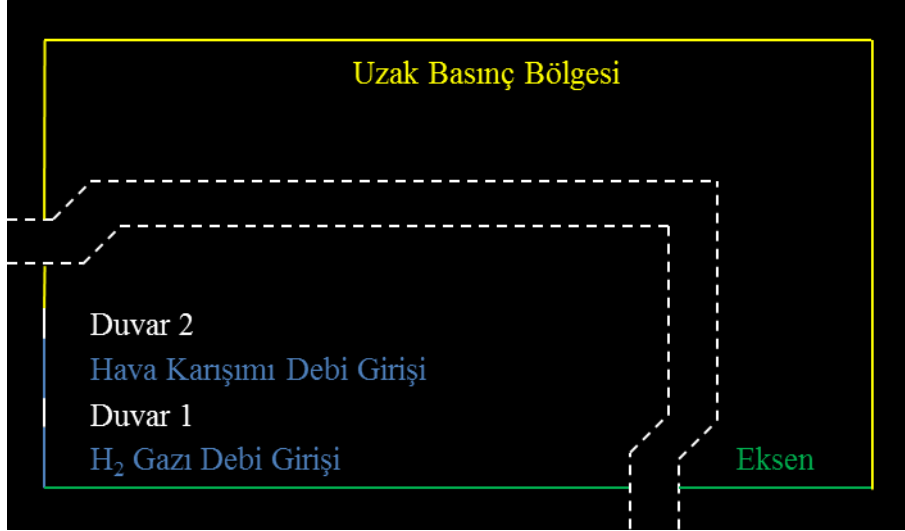
Şekil 2.1 : Deney düzeneği şeması (Jarrett ve diğ. 1988).



Şekil 2.2 : Hesaplama alanı şeması (Jarrett ve diğ. 1988).



Şekil 2.3 : Ses üstü aksenal yakıcı çözüm ağı.



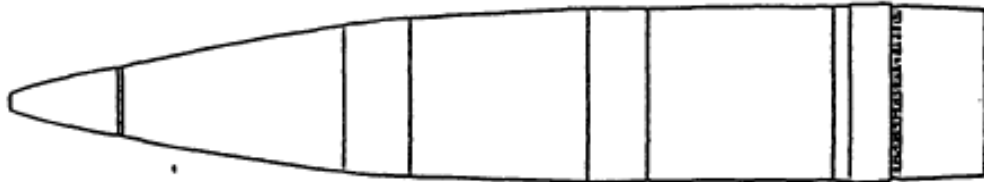
**Şekil 2.4 :** Ses üstü aksenal yakıcı sınır koşulları şeması.

**Çizelge 2.2 :** Ses üstü aksenal yakıcı akış sınır koşulları (Jarrett ve diğ. 1988).

Akışlar	M	T <sub>0</sub> [K]	U[m/s]	P <sub>0</sub> [MPa]	Kütle Oranları			
					H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Serbest akış	0	300	0	0.101	0	0.232	0.768	0
Hava jeti	2	1180	1390	0.107	0	0.254	0.572	0.174
H <sub>2</sub> jeti	1	545	1772	0.112	1	0	0	0

HAD analizleri Gibeling ve Buggeln (1992) çalışmasından elde edilen ve Çizelge 2.1'de verilmiş olan ilk 9 reaksiyon serisi ve Arrhenius sabitleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

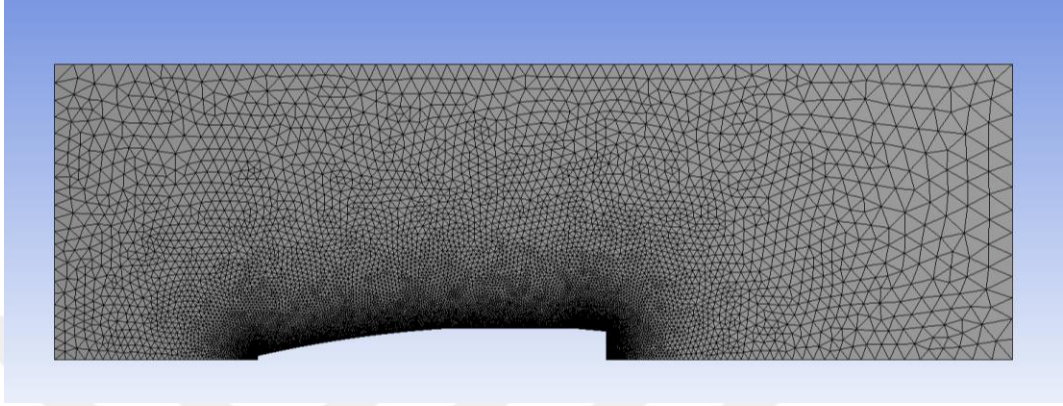
Yanma modeli doğrulama çalışması ikinci adımı olarak DYÜ teknolojinin sayısal olarak incelendiği Gibeling ve Buggeln (1992) çalışması seçilmiştir. Şekil 2.5'de küt burun ve mermi tabanı düz olan 155 [mm] M864 topçu mermisi şematik olarak gösterilmiştir. Mermi boyu 5.79 kalibre, burun boyu 3.42 kalibre, silindir boyu 1.80 kalibre, konik kuyruk boyu 0.5 kalibre, konik kuyruk açısı 3 derece ve DYÜ orifis çapı ise 0.32 kalibredir.



**Şekil 2.5 :** Mermi şeması (Danberg 1990).

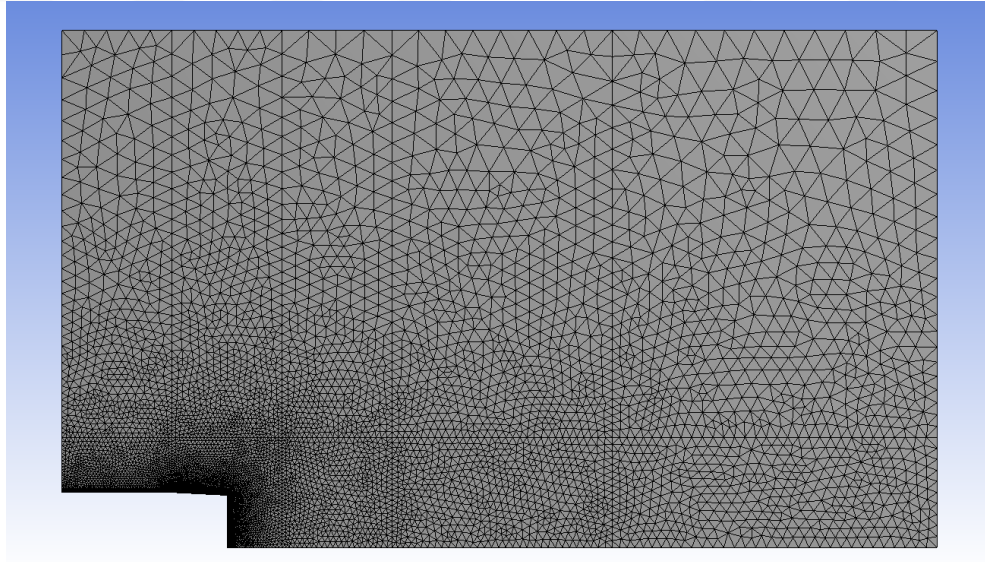
Bu çalışmada dip bölgesindeki fiziksel olaylar incelendiği ve ses üstü serbest akış koşulunda dip bölgesi akış fiziğinin burun bölgesi akışını etkilemeyeceği bilindiği

için iki farklı çözüm ağı üretilmiştir. Tam çözüm ağında tüm mermi geometrisi yer alırken azaltılmış çözüm ağının giriş sınırı kuyruk başlangıcının 1 kalibre önüne yerleştirilmiştir (Şekil 2.6). Tam çözüm ağının kullanıldığı HAD analizlerinden elde edilen Mach Sayısı, sıcaklık ve basınç profilleri azaltılmış çözüm ağında giriş sınır koşulu olarak kullanılmıştır.



**Şekil 2.6 :** DYÜ'lü topçu mermisi tam çözüm ağı.

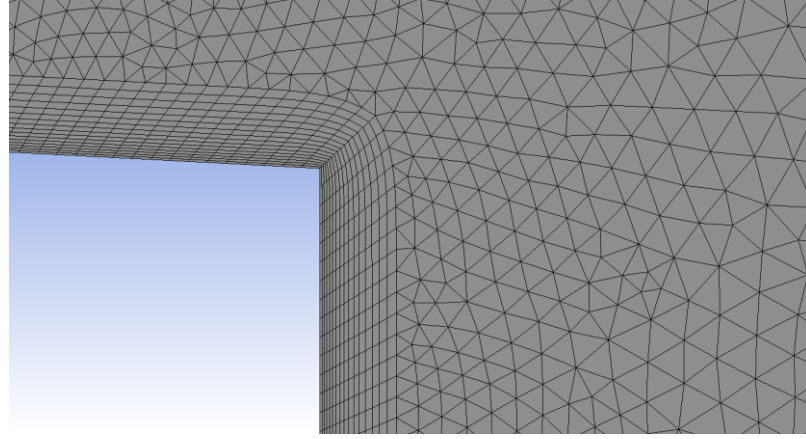
HAD analizlerinde azaltılmış çözüm ağının kullanılmasıyla analiz süreleri yarıya inmiştir. DYÜ'lü topçu mermisi için verilen tüm sonuçlar azaltılmış çözüm ağıyla elde edilmiştir (Şekil 2.7).



**Şekil 2.7 :** DYÜ'lü topçu mermisi azaltılmış çözüm ağı.

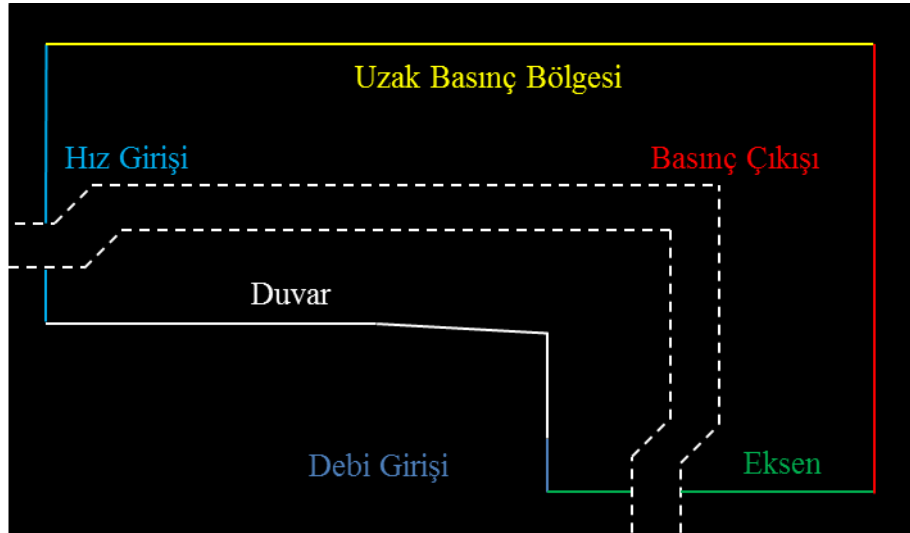
Bölüm 3.1'de kullanılması kararlaştırılan azaltılmış çözüm ağı orifis bölgesi, dip bölgesi ve kuyruk bölgesindeki elaman boyu 0.75 [mm] olacak şekilde  $y^+ \approx 120$  ile 16 kat sınır tabaka çözüm ağı üzerinde 1.05 büyüme oranı ve yüzey elamanı boyutlandırmaları kullanılarak oluşturulmuş olup 15696 adet yapısal olmayan

elamandan oluşmaktadır. Şekil 2.8’de DYÜ’lü topçu mermisi için üretilen, kuyruk ve dip bölgesi birleşiminde yer alan azaltılmış çözüm ağı sınır tabakası gösterilmiştir.



**Şekil 2.8 :** DYÜ’lü topçu mermisi azaltılmış çözüm ağı sınır tabakası.

HAD analizleri DYÜ cansız (enjeksiyonun olmadığı) durumu, sıcak hava enjeksiyonu durumu, H<sub>2</sub>-CO gazı enjeksiyonu ve H<sub>2</sub>-CO gazı yanması olmak üzere 4 farklı durum için gerçekleştirilmiştir. HAD çözücüsünde kullanılan akış sınır koşulları şematik olarak Şekil 2.9’de gösterilmiştir. Analizler için Gibeling ve Buggeln (1992) çalışmasından elde edilen akış sınır koşulları Çizelge 2.3’de verilmiştir.



**Şekil 2.9 :** DYÜ’lü topçu mermisi sınır koşulları şeması.

**Çizelge 2.3 :** DYÜ’lü topçu mermisi akış sınır koşulları (Gibeling ve Buggeln 1992).

Akışlar	M	T <sub>0</sub> [K]	I	P <sub>0</sub> [MPa]	Molekül Oranları					
					H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	CO <sub>2</sub>
Serbest akış	2	294	0	0.101	0	0.210	0.790	0	0	0
Hava enj.	0	1533	0.0022	0	0	0.210	0.790	0	0	0
H <sub>2</sub> -CO enj.	0	1533	0.0022	0	0.261	0	0.117	0.197	0.265	0.160

Boyutsuz enjeksiyon parametresi (I) denklem 2.15 ile hesaplanmıştır.

$$I = \frac{\dot{m}}{A_b \rho_\infty U_\infty} \quad (2.15)$$

Burada  $\dot{m}$  DYÜ kütle debisi,  $A_b$  dip alanı,  $\rho_\infty$  serbest akış yoğunluğu ve  $U_\infty$  ise serbest akış hızıdır. H<sub>2</sub>-CO gazı yanması durumu HAD analizleri Gibeling ve Buggeln (1992) çalışmasından elde edilen ve Çizelge 2.1’de verilmiş olan 12 adet reaksiyon serisi ve Arrhenius sabitleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

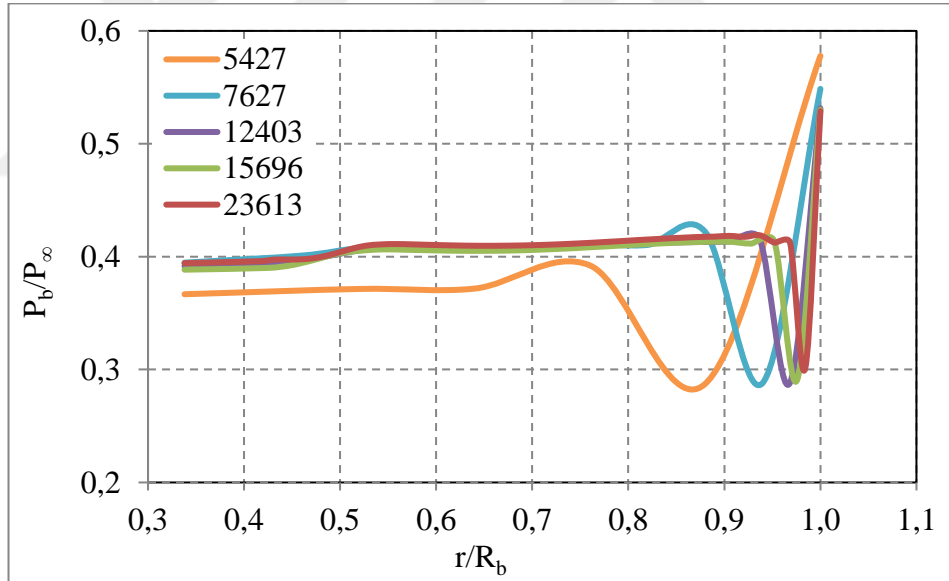
### 2.3.2 Sayısal çözüm

Birçok kimyasal tepkimenin olduğu karmaşık akış sistemleri için eksenel simetrik korunum denklemleri bir HAD çözücüsü olan Fluent (16.0) yazılımı kullanılarak eş zamanlı olarak çözülmüştür. Analizlerde çözücü türü için “Pressure Based”, tüm uzaysal ayrıklaştırmalar için “Second Order Upwind”, gradyan için “Least Squares Cell Based” ve basınç-hız bağlaşımı şeması için “Coupled” seçenekleri kullanılmıştır.

### 3. SONUÇ VE YORUMLAR

#### 3.1 Çözüm Ağı Yakınsatma Çalışması

Bu bölümde mermi çalışmalarının güvenilirliği açısından çözüm ağından bağımsız sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Sınır tabaka ilk yüksekliği, sınır tabaka kat sayısı ve büyüme oranı sabit tutularak sadece çözüm ağı minimum elaman büyüklüğü ve yüzey elemanı boyutlandırmaları değiştirilerek elde edilen farklı yoğunluklardaki çözüm ağları ile analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de dip alanı üzerindeki boyutsuz basınç parametresinin ( $P_b/P_\infty$ ) boyutsuz yarıçapa ( $r/R_b$ ) göre değişimi gösterilmiştir. 15696 ve 23613 eleman sayılı çözüm ağı grafiklerinin oldukça benzer olduğu göze çarpmaktadır.

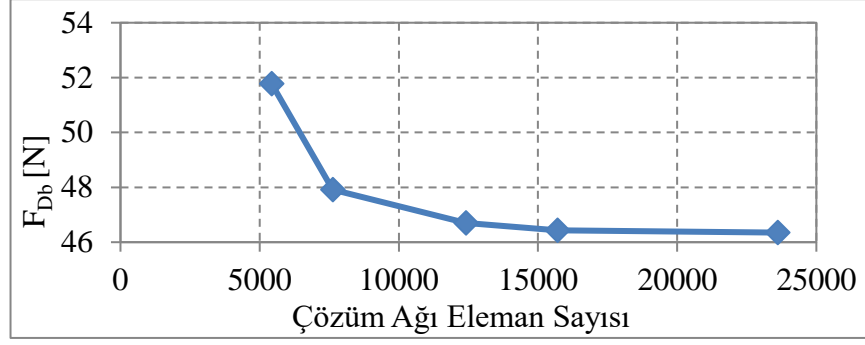


Şekil 3.1 : Boyutsuz dip bölgesi basıncının boyutsuz yarıçapa göre değişimi.

Şekil 3.2’de dip bölgesi sürüklenme kuvvetinin ( $F_{Db}$ ) çözüm ağı eleman sayısı artıkça sabit bir değere yakınsadığı gösterilmiştir.

Çizelge 3.1’de her bir çözüm ağı eleman sayısı için sonraki yoğunluktaki çözümün dip bölgesi sürüklenme kuvveti yüzde farkları verilmektedir. 15696 eleman sayılı çözüm ile 23613 eleman sayılı çözüm arasındaki fark %0.2’dir.

Bu göstergeler doğrultusunda sonraki mermi çalışmaları için gerçekleştirilecek HAD analizlerinde 15696 eleman sayılı çözüm ağı kullanılacaktır.



**Şekil 3.2 :** Dip bölgesi sürüklenme kuvvetinin çözüm ağı eleman sayısı ile değişimi.

**Çizelge 3.1 :** Çözüm ağı eleman sayısı için dip bölgesi sürüklenme kuvveti ve yüzde farkları.

Çözüm Ağı Eleman Sayısı	F <sub>Db</sub> [N]	% F <sub>Db</sub> Farkı
5427	51.78	8.1
7627	47.92	2.6
12403	46.70	0.6
15696	46.43	0.2
23613	46.35	-

### 3.2 Türbülans Modeli Etkisi Çalışması

HAD analizlerinde türbülansın doğru şekilde modellenmesi önem arz etmektedir. Bu sebeple türbülans modeli etkisi için Fluent teori rehberinde önerilen dört farklı türbülans modeli kullanılarak mermi analizleri gerçekleştirilmiştir. Transition SST (4 denklemlilik), Standart k-e (2 denklemlilik), Standart k-w (2 denklemlilik) ve Spalart Allmaras (1 denklemlilik) türbülans modelleri için elde edilen dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayıları ve yüzde farkları Çizelge 3.2’de verilmiştir. Dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı yüzde farkları Gibeling ve Buggeln (1992) çalışması referans alınarak hesaplanmıştır. Transition SST türbülans modeli ile Gibeling ve Buggeln (1992) çalışması arasındaki fark %1.8’dir.

Bu göstergeler doğrultusunda sonraki çalışmalar için gerçekleştirilecek HAD analizlerinde Transition SST türbülans modeli kullanılacaktır.

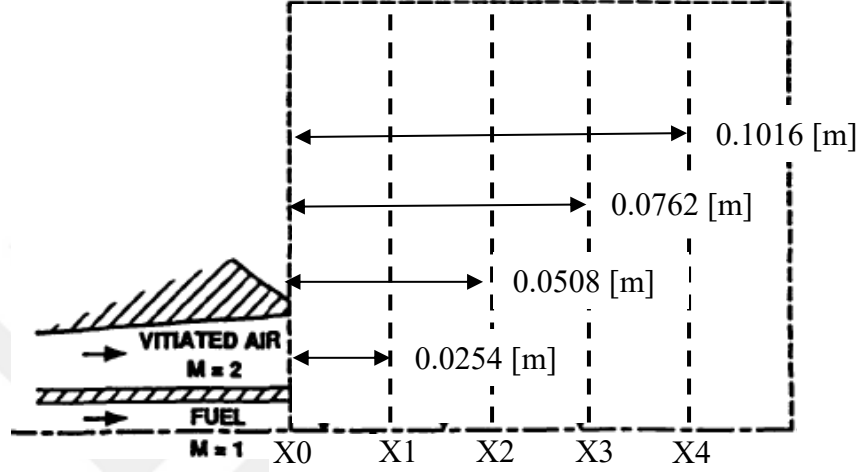
**Çizelge 3.2 :** Türbülans modeli etkisi için dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı ve yüzde farkları.

Durum	C <sub>Db</sub> [N]	% C <sub>Db</sub> Farkı
Gibeling ve Buggeln (1992)	0.167	-
Transition SST	0.164	1.8
Standart k-e	0.192	14.9
Standart k-w	0.132	20.8
Spalart Allmaras	0.182	9.2

### 3.3 Doğrulama Çalışmaları

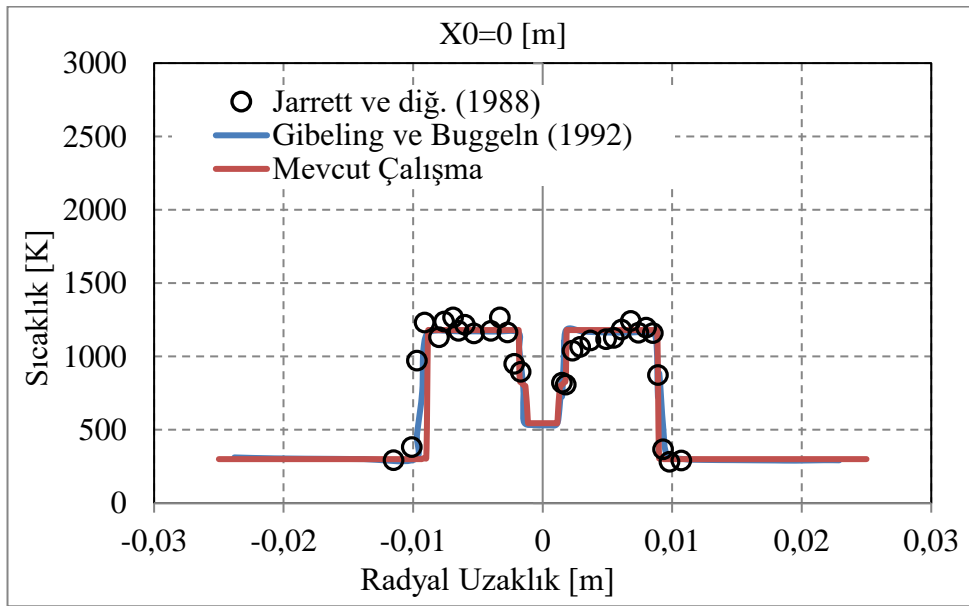
#### 3.3.1 Sesüstü aksenal yakıcı çalışması

Gerçekleştirilen HAD analizleri sonucunda Şekil 3.3’de hesaplama alanı üzerinde kesikli siyah çizgilerle şematik olarak gösterilen farklı aksenal istasyonlarda sıcaklık ve hız profilleri elde edilmiştir.

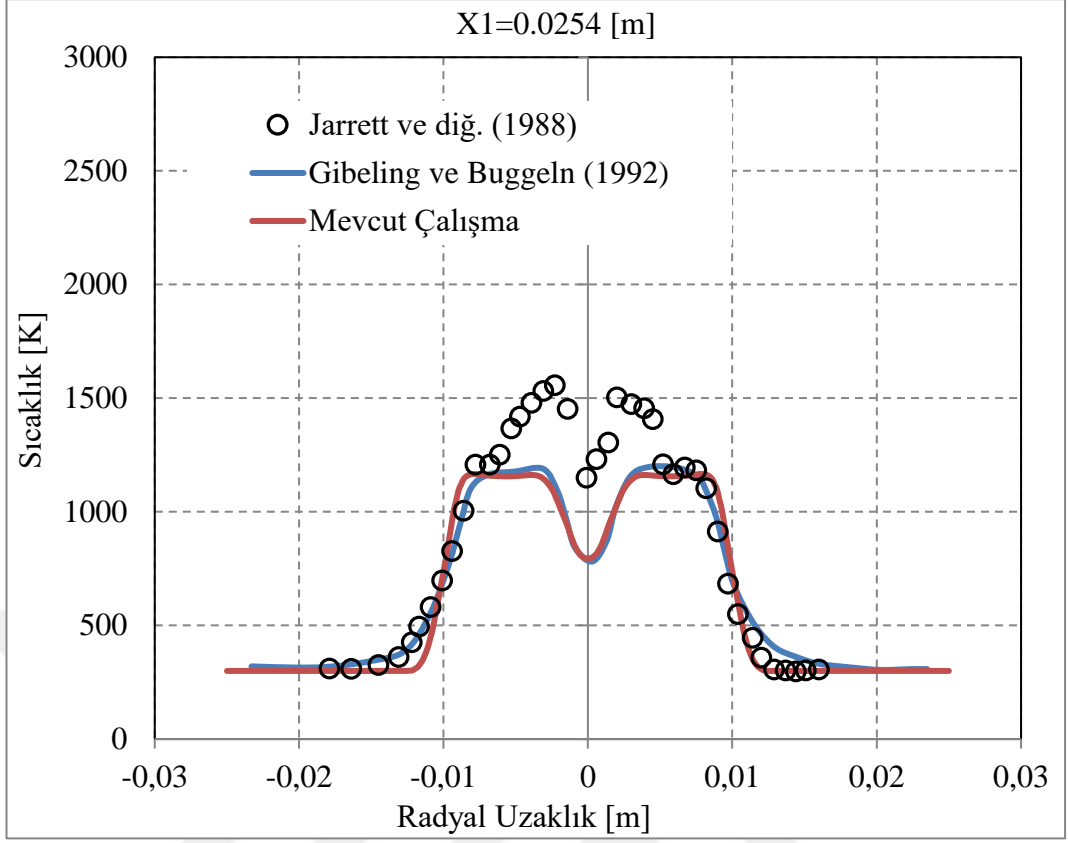


Şekil 3.3 : Eksenal istasyonlar (Jarrett ve diğ. 1988).

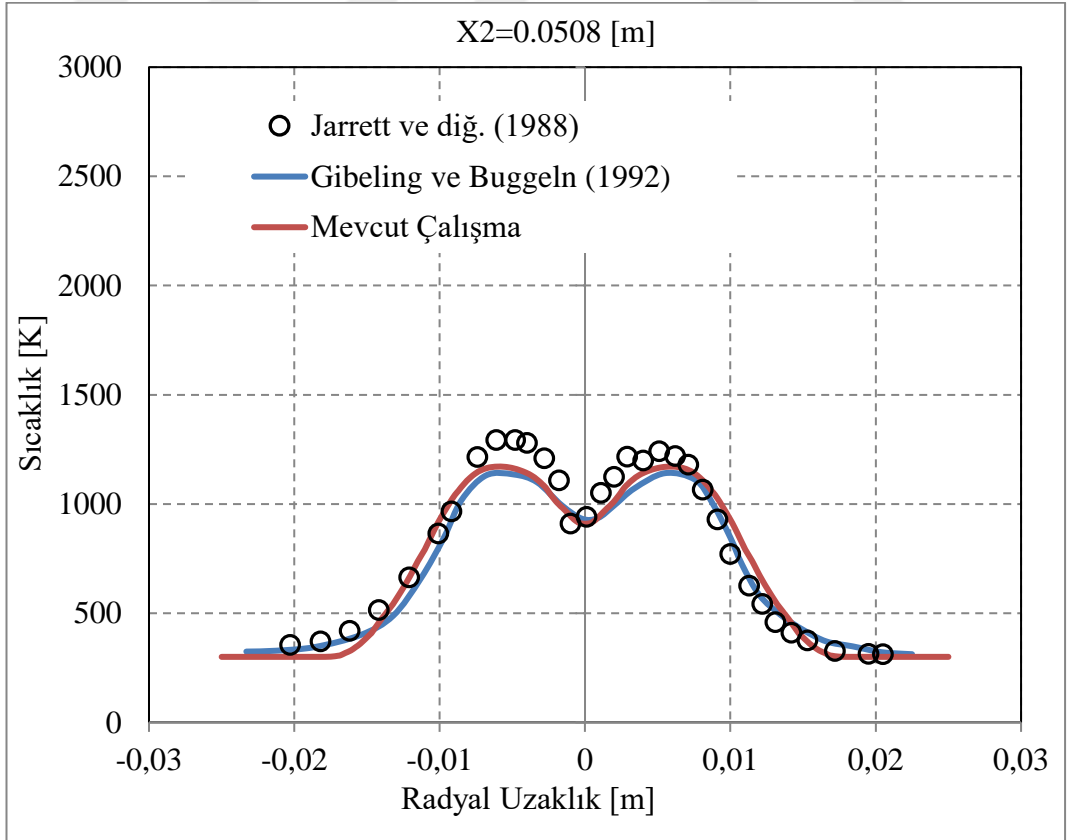
Mevcut çalışma sonuçları Jarrett ve diğ. (1988) çalışmasında yer alan deneysel ve Gibeling ve Buggeln (1992) çalışmasında yer alan sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 3.4-Şekil 3.8 arasında farklı aksenal istasyonlardaki sıcaklık profilleri aksenal simetrik radyal uzaklığa göre verilmiştir.



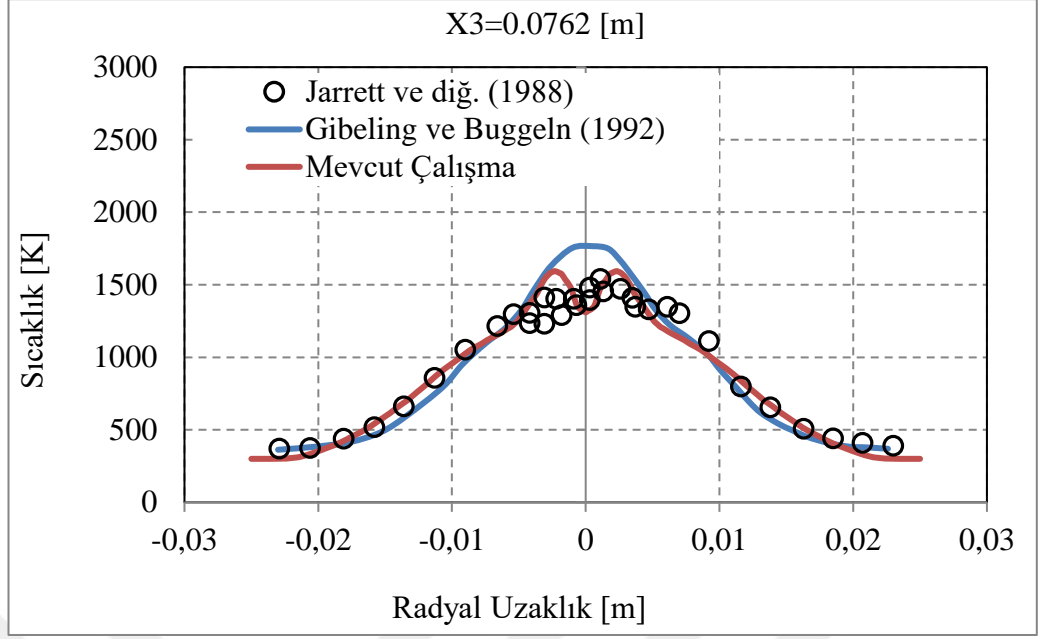
Şekil 3.4 : Ses üstü aksenal yakıcı çalışması X0 istasyonu sıcaklık profili.



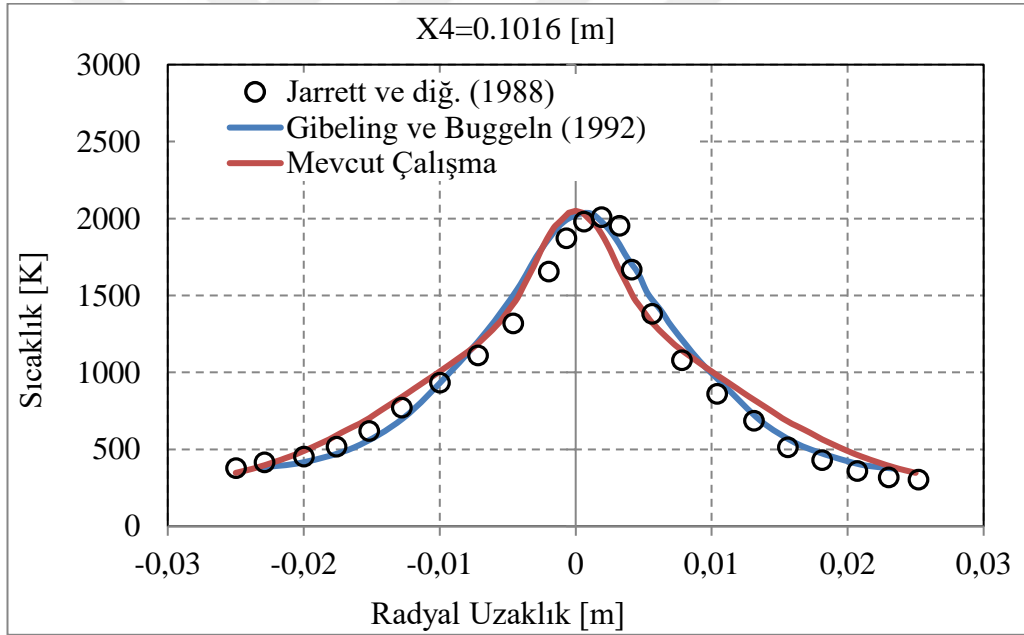
Şekil 3.5 : Ses üstü eksnel yakıcı çalışması X1 istasyonu sıcaklık profili.



Şekil 3.6 : Ses üstü eksnel yakıcı çalışması X2 istasyonu sıcaklık profili.



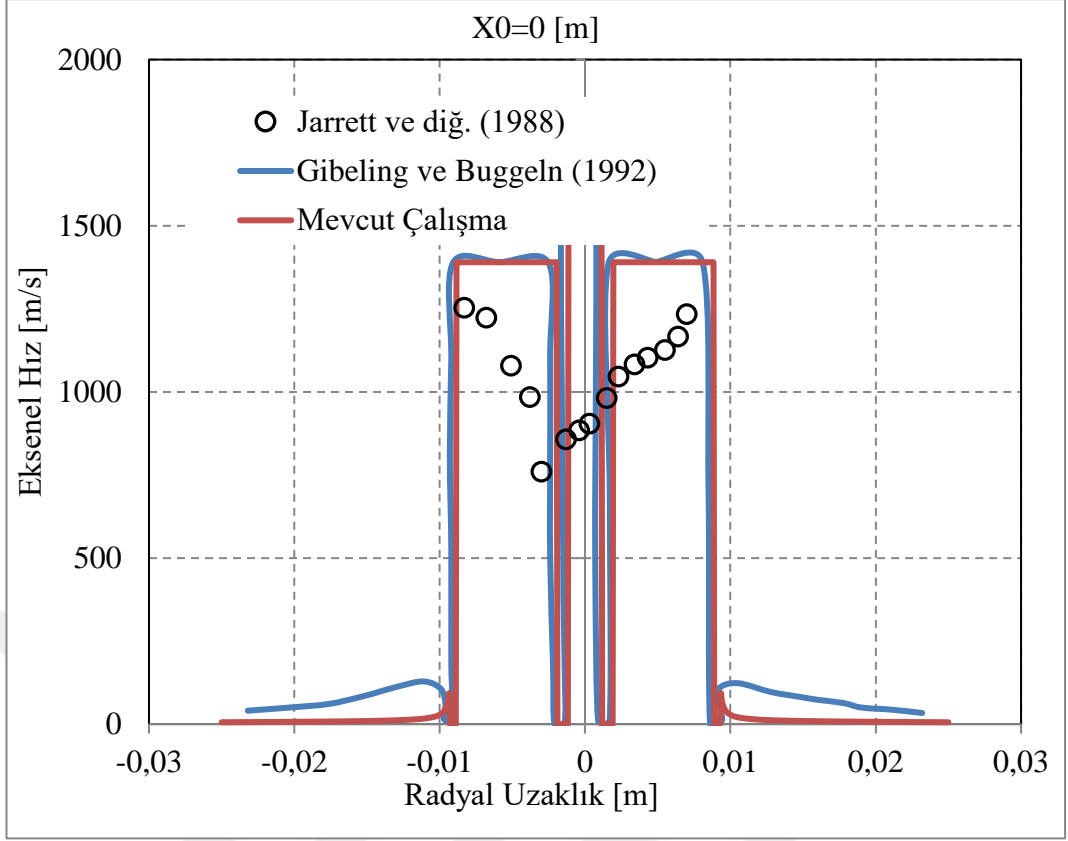
Şekil 3.7 : Ses üstü aksenal yakıcı çalışması X3 istasyonu sıcaklık profili.



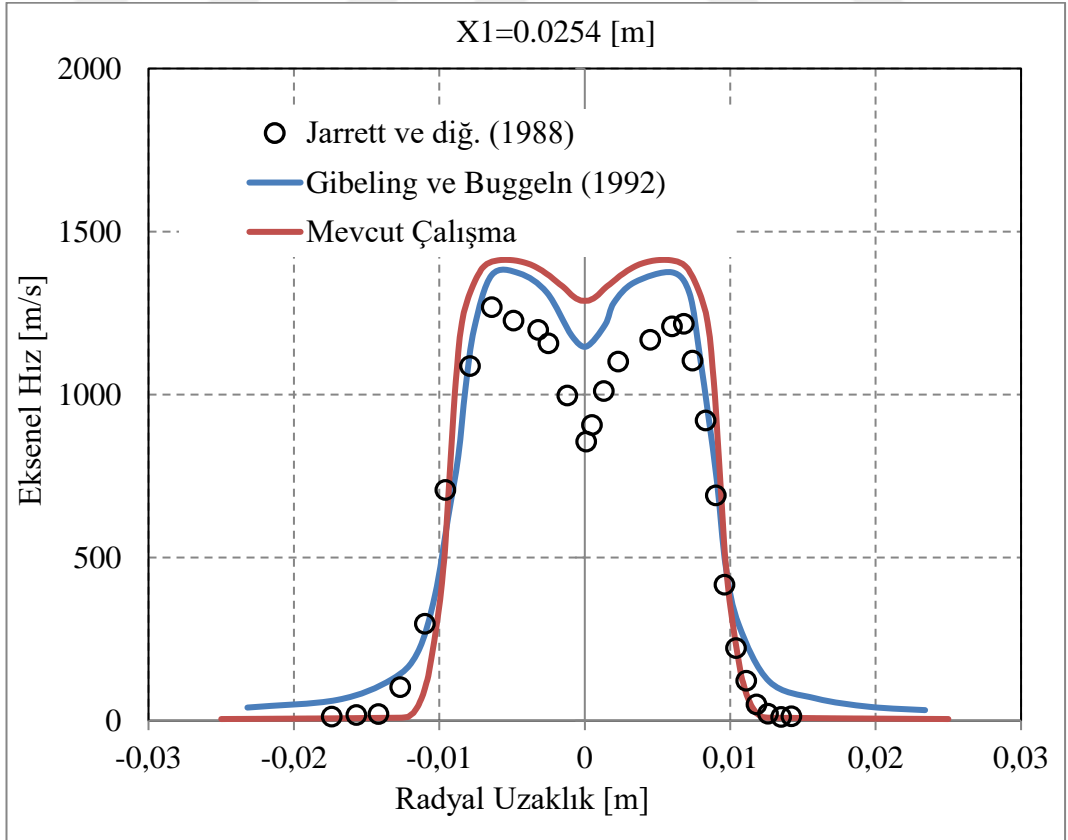
Şekil 3.8 : Ses üstü aksenal yakıcı çalışması X4 istasyonu sıcaklık profili.

Analiz sonucunda elde edilen sıcaklık değerlerinin X1=0.0254 [m] istasyonunun iç bölgesinde deneysel verilere göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.5). Bu istasyon verileri tutuşmanın tahmin edilenden daha yakın bölgede gerçekleştiğini işaret etmektedir. Diğer istasyonlardaki sıcaklık profilleri deneysel verilerle oldukça uyumludur (Şekil 3.4, Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8).

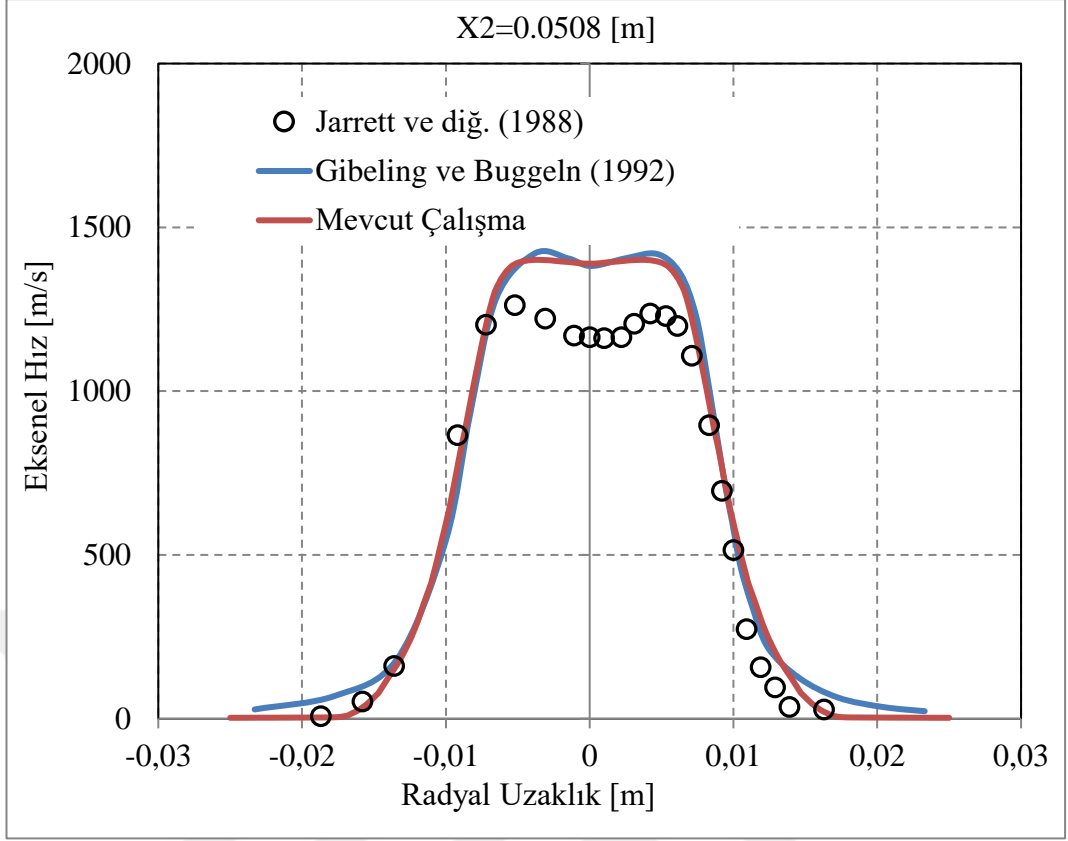
Şekil 3.9-Şekil 3.13 arasında farklı aksenal istasyonlardaki hız profilleri aksenal simetrik radyal uzaklığa göre verilmiştir.



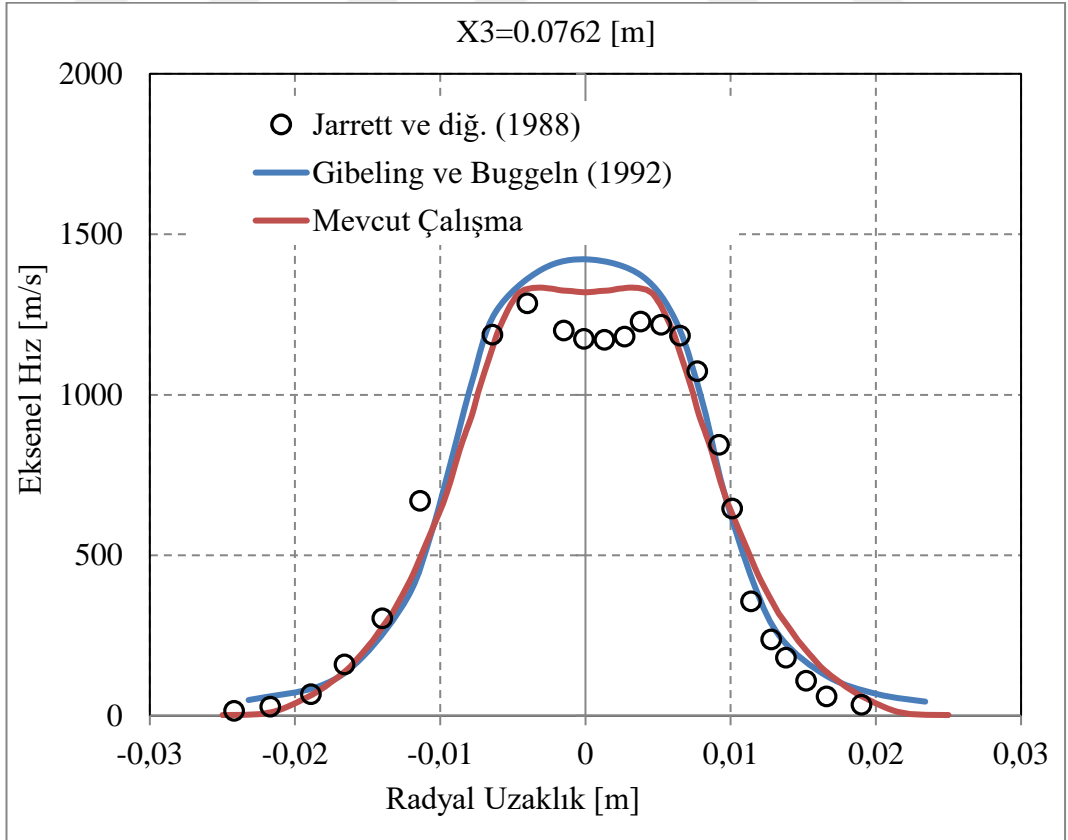
Şekil 3.9 : Ses üstü aksel yakıcı çalışması X0 istasyonu hız profili.



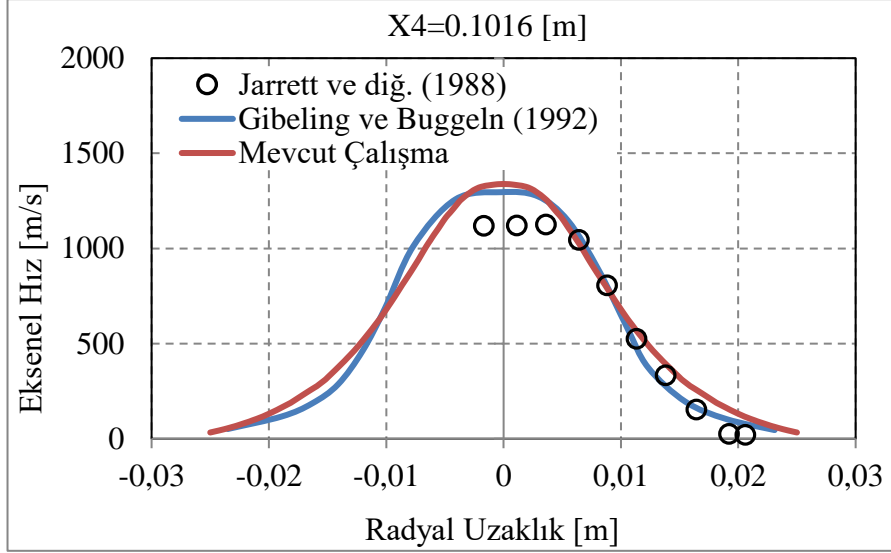
Şekil 3.10 : Ses üstü aksel yakıcı çalışması X1 istasyonu hız profili.



Şekil 3.11 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X2 istasyonu hız profili.



Şekil 3.12 : Ses üstü eksenel yakıcı çalışması X3 istasyonu hız profili.



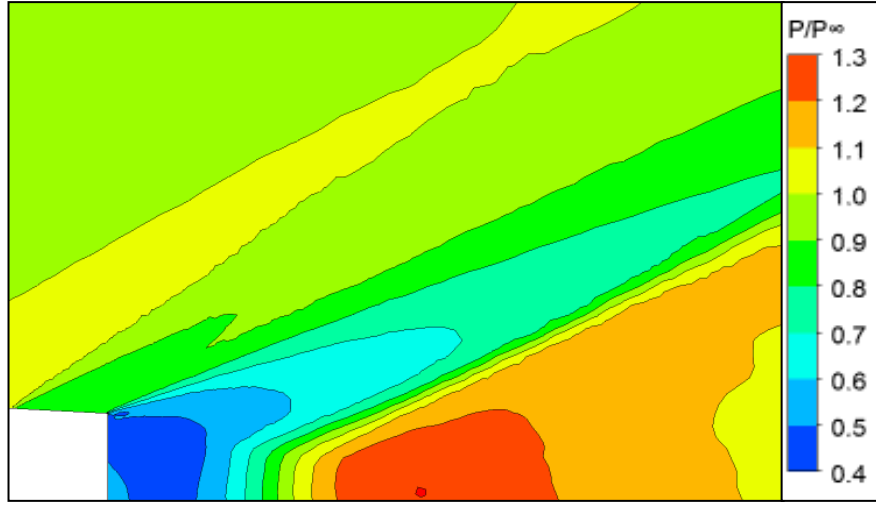
**Şekil 3.13 :** Ses üstü aksel yakıcı çalışması X4 istasyonu hız profili.

Elde edilen aksel hız profillerinin Gibeling ve Buggeln (1992) çalışmasında yer alan sayısal sonuçlara çok yakın olduğu görülmüştür (Şekil 3.9-Şekil 3.13). Ancak Jarrett ve diğ. (1988) çalışmasında yer alan deneysel sonuçlarla özellikle jet çıkışına yakın istasyonlarda  $X_0=0$  [m],  $X_1=0.0254$  [m] ve  $X_2=0.0508$  [m] uyumsuz olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11). Gibeling ve Buggeln (1992) bu belirgin farkın sebebinin “yüksek kesme bölgesindeki parçacık birikimi, lüle ve yakıt enjektörü konfigürasyonunun gerçek hız profilini bozması ve ölçüm aletlerinin yakıt enjektörü çapına oranla küçük olmaması sonucunda yüksek değişim bölgelerindeki deneysel profillerin etkilenmesi” olabileceğini aktarmıştır (s. 21).

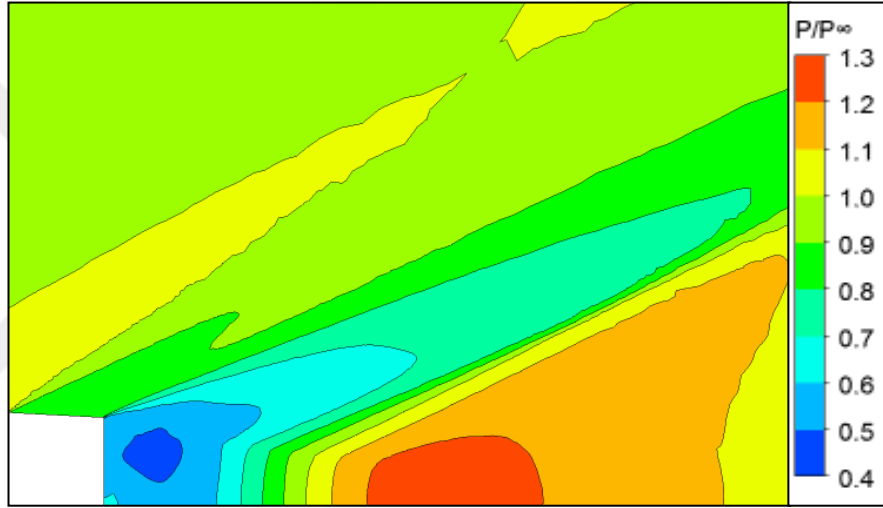
Bu doğrulama çalışması kullanılan yanma modelinin belirli bir seviyede güvenilir olduğunu belirtmektedir. Ayrıca kullanılan reaksiyon serisi dipten yanma hesaplamalarında kullanılacak olan karbon monoksit oksidasyon mekanizması serisinin alt serisidir.

### 3.3.2 DYÜ’lü topçu mermisi çalışması

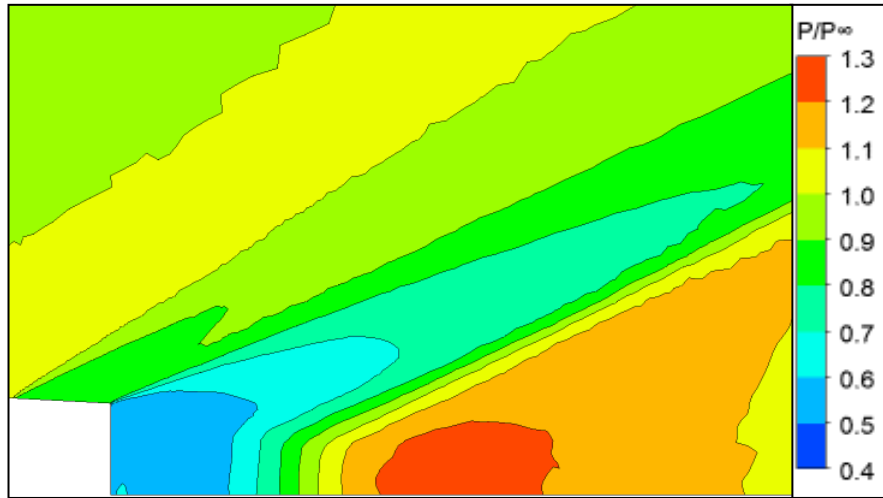
HAD analizleri sonucunda elde edilen dip bölgesi boyutsuz basınç konturları Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de 4 farklı durum için gösterilmiştir. Buna göre dip bölgesinin sıcak hava (b) veya  $H_2-CO$  gazı ile beslenmesinin (c) herhangi bir beslemenin olmadığı cansız duruma (a) göre dip bölgesi basınç değerini arttırdığı görülmüştür.  $H_2-CO$  gazı yanma durumu (d) ile birlikte tekrar sıkışma bölgesi yoğunluğu azalmış, ayrılmış akış çizgilerini düzleşmiş bu sayede dip bölgesi basınç değeri daha fazla artmıştır.



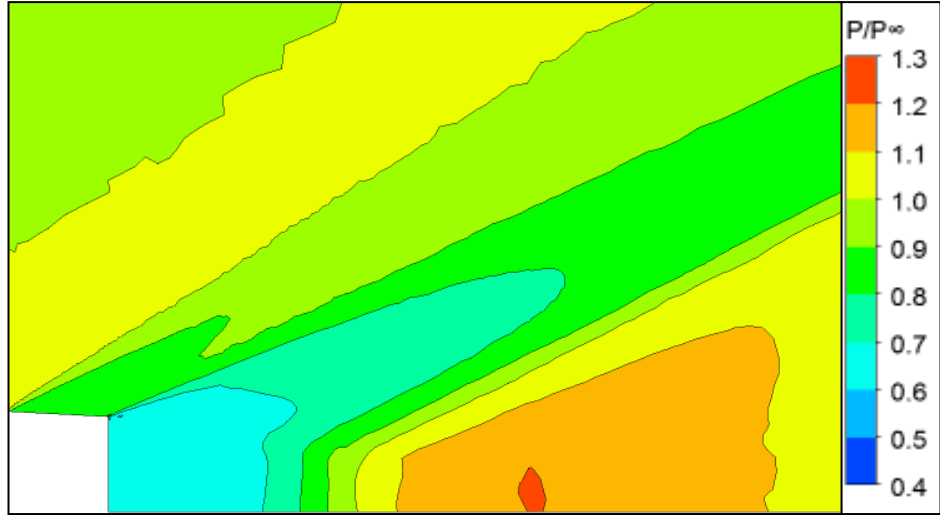
Şekil 3.14 : Dip bölgesi cansız durum (a) boyutsuz basınç konturları.



Şekil 3.15 : Dip bölgesi sıcak hava enjeksiyonu durumu (b) boyutsuz basınç konturları.



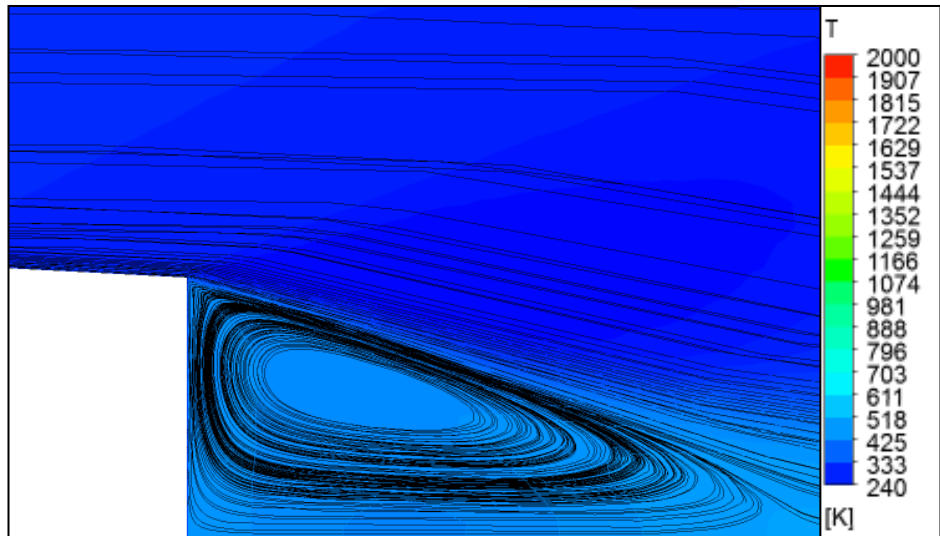
Şekil 3.16 : Dip bölgesi H<sub>2</sub>-CO gazı enjeksiyonu durumu (c) boyutsuz basınç konturları.



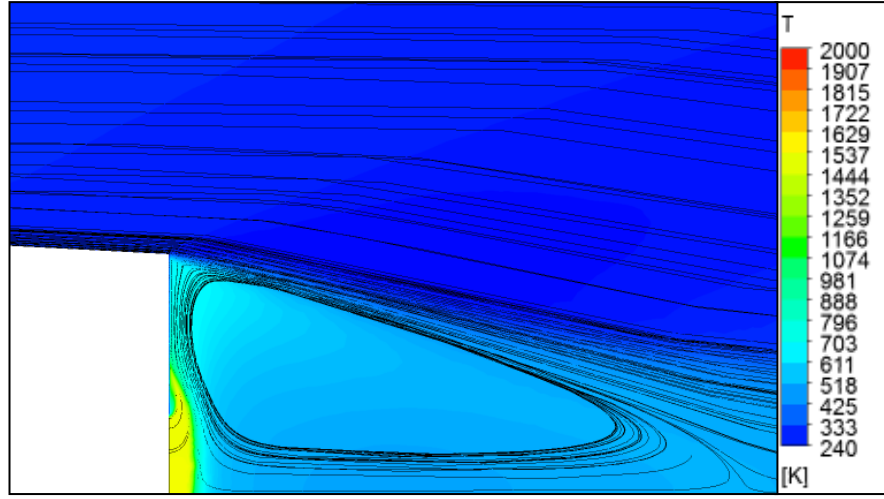
Şekil 3.17 : Dip bölgesi H<sub>2</sub>-CO gazı yanma durumu (d) boyutsuz basınç konturları.

Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de sıcaklık konturları üzerine akış çizgileri 4 farklı durum için gösterilmiştir. H<sub>2</sub>-CO gazı yanma durumu (d) dip bölgesi sıcaklık değerini sıcak hava (b) ve H<sub>2</sub>-CO gazı enjeksiyonu durumuyla (c) karşılaştırıldığında daha fazla artırmıştır. Sirkülasyon bölgesi H<sub>2</sub>-CO gazı yanma durumunda (d) dip bölgesinden daha fazla uzaklaşmış, genişleme ve tekrar sıkışma dalgaları gücünü kaybetmiştir. Bu sayede dip bölgesindeki sıcaklık artışı dip bölgesi basıncını daha fazla artmıştır.

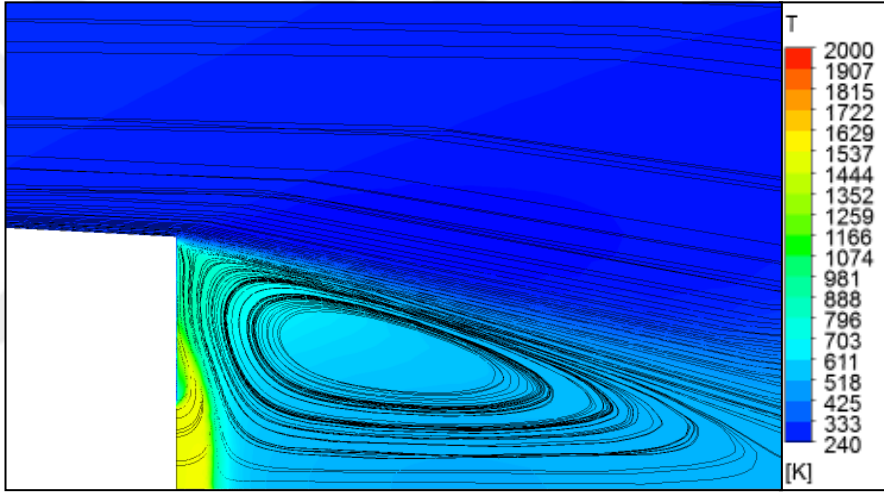
Dip bölgesi serbest akış sıcaklığı kontur çizgileri ( $T=T_{\infty}$ ) Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Görsel incelendiğinde H<sub>2</sub>-CO gazı yanma durumunun (d) akış çizgilerini düzleştirerek genişleme ve tekrar sıkışma bölgesi geçişlerini daha fazla yumuşattığı görülmüştür.



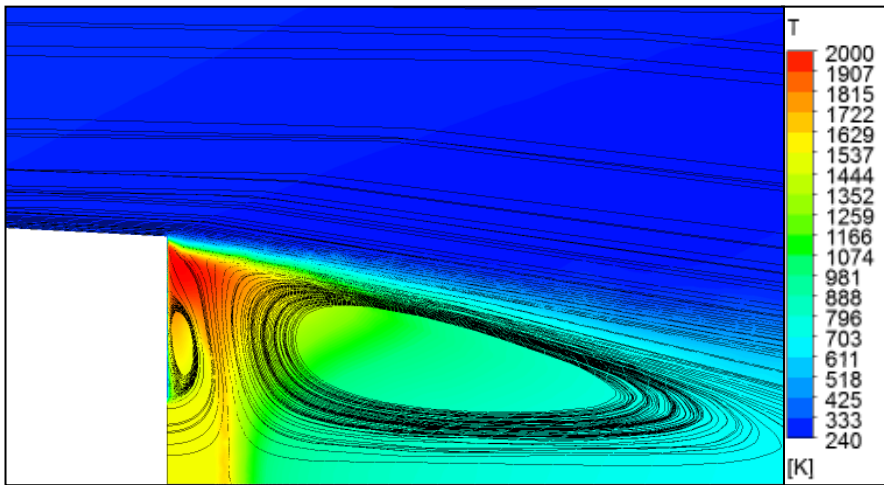
Şekil 3.18 : Dip bölgesi cansız durum (a) sıcaklık konturları ve akış çizgileri.



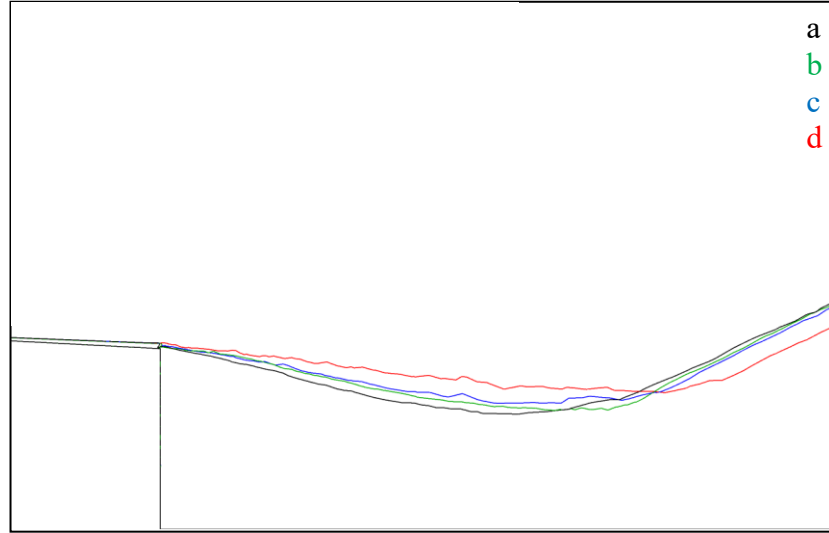
Şekil 3.19 : Dip bölgesi sıcak hava enjeksiyonu durumu (b) sıcaklık konturları ve akış çizgileri.



Şekil 3.20 : Dip bölgesi H<sub>2</sub>-CO gazı enjeksiyonu durumu (c) sıcaklık konturları ve akış çizgileri.



Şekil 3.21 : Dip bölgesi H<sub>2</sub>-CO gazı yanma durumu (d) sıcaklık konturları ve akış çizgileri.



**Şekil 3.22 :** Serbest akış sıcaklığı kontur çizgileri a) cansız durum b) sıcak hava enjeksiyonu durumu c) H<sub>2</sub>-CO gazı enjeksiyonu durumu d) H<sub>2</sub>-CO gazı yanma durumu

Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4 incelendiğinde cansız (a) ve sıcak hava enjeksiyonu durumları (b) için elde edilen dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı ( $C_{Db}$ ) değerlerinin Gibeling ve Buggeln (1992) çalışmasında yer alan sayısal sonuçlar ile benzer olduğu görülmektedir. H<sub>2</sub>-CO gazı yanma durumunda (d) ise Gibeling ve Buggeln (1992) çalışması ile %3'lük bir fark mevcuttur. Bu farkın kullanılan yanma modellerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Gibeling ve Buggeln (1992) çalışmasında H<sub>2</sub>-CO gazı enjeksiyonu durumunu (c) çalışmadığı için mevcut çalışma ile karşılaştırma yapılamamıştır. Yüzde dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı azaltım değerleri (% $C_{Db}$  azaltım) cansız durumlar (a) referans alınarak hesaplanmıştır.

**Çizelge 3.3 :** Gibeling ve Buggeln (1992) çalışması dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı ve yüzde azaltım değerleri

Durum	$C_{Db}$	% $C_{Db}$ azaltım
Cansız durum (a)	0.167	-
Sıcak hava enjeksiyonu durumu (b)	0.138	17
H <sub>2</sub> -CO gazı yanma durumu (d)	0.089	47

**Çizelge 3.4 :** Mevcut çalışma dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısı ve yüzde azaltım değerleri.

Durum	$C_{Db}$	% $C_{Db}$ azaltım
Cansız durum (a)	0.164	-
Sıcak hava enjeksiyonu durumu (b)	0.138	16
H <sub>2</sub> -CO gazı enjeksiyonu durumu(c)	0.135	18
H <sub>2</sub> -CO gazı yanma durumu (d)	0.092	44

Çalışma sonucunda yanma durumunun dip bölgesi basınç değerini daha fazla artırdığı ve dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısında belirgin bir azaltım sağladığı görülmüştür. Bu sayede DYÜ akış fiziği HAD analizlerinde yanma modelinin kullanılmasını gerekli olduğu anlaşılmıştır.

### 3.4 DYÜ Karakteristiği

Bu bölümde DYÜ karakteristiği Minitab programı yardımıyla incelenmiştir. Bu kapsamda DYÜ karakteristiğine etkisi olduğu bilinen üç faktör; serbest akış Mach Sayısı, uçuş irtifası ve DYÜ debisi için  $2^k$  tam faktöriyel deney tasarımı yapılmıştır. Buradaki 2 rakamı her bir faktörün düzey sayısını  $k$  ise faktör sayısını göstermektedir. Çizelge 3.5’de ilgili faktörler için seçilen düzeyler verilmiştir. Bu düzeyler Danberg (1990) çalışmasında yer alan 155 [mm] M864 topçu mermisinin uçuş koşulları ve DYÜ ’nden çıkan egzoz gazı miktarı dikkate alınarak seçilmiştir.

**Çizelge 3.5 :** Deney tasarımı için seçilen faktörlerinin düzeyleri.

Mach Sayısı	İrtifa [m]	Debi [kg/s]
1.5	2000	0.02
2.5	8000	0.04

Deney tasarımı sonrasında belirlenen  $2^3$  durum için HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve hesaplanan dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltım parametresi ( $p_{sa}$ ) değerleri Çizelge 3.6’de verilmiştir.

**Çizelge 3.6 :** Deney tasarımı ve sürüklenme kuvveti azaltım parametresi.

Mach Sayısı	İrtifa [m]	Debi [kg/s]	$p_{sa}$
1.5	2000	0.02	0.432
1.5	2000	0.04	0.597
2.5	2000	0.02	0.309
2.5	2000	0.04	0.431
1.5	8000	0.02	0.612
1.5	8000	0.04	0.607
2.5	8000	0.02	0.443
2.5	8000	0.04	0.431

HAD analizlerinde Bölüm 3.3.2 ‘de  $H_2$ -CO gazı yanma durumu için doğrulanan yanma modeli kullanılmıştır.

Dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltım parametresi değerleri HAD analizleri sonunda elde edilen dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayıları kullanılarak denklem 3.1 ile hesaplanmıştır.

$$p_{sa} = 1 - \frac{C_{Db}}{C_{Db0}} \quad (3.1)$$

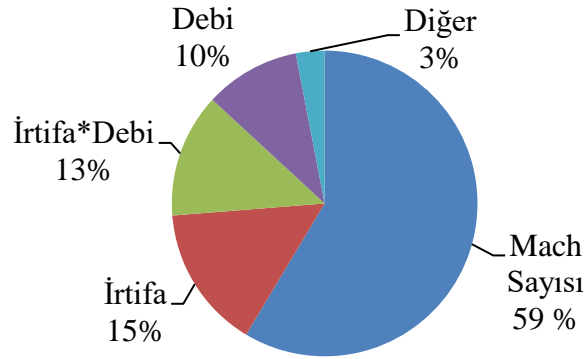
Bu denklemde  $C_{Db0}$  DYÜ cansız durumu için dip bölgesi sürüklenme kuvveti katsayısıdır. Minitab programı faktörlerin etkilerini inceleyerek sürüklenme kuvveti azaltım parametresine kabul edilebilir bir hatayla (%5) matematiksel bir model üretecektir. Bu model denklem 3.2’de gösterilmiştir.

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varphi_k + \tau_i\beta_j + \tau_i\varphi_k + \beta_j\varphi_k + \tau_i\beta_j\varphi_k + \varepsilon_{ijk} \quad (3.2)$$

Burada  $Y_{ijk}$  i, j ve k düzeylerindeki herhangi bir nokta,  $\mu$  genel ortalama,  $\tau_i$   $\tau$  faktörünün i’inci düzeyindeki ana etkisi,  $\beta_j$   $\beta$  faktörünün j’inci düzeyindeki ana etkisi,  $\varphi_k$   $\varphi$  faktörünün k’inci düzeyindeki ana etkisi,  $\tau_i\beta_j$   $\tau_i$  ve  $\beta_j$  etkileşimi,  $\tau_i\varphi_k$   $\tau_i$  ve  $\varphi_k$  etkileşimi,  $\beta_j\varphi_k$   $\beta_j$  ve  $\varphi_k$  etkileşimi,  $\tau_i\beta_j\varphi_k$   $\tau_i$ ,  $\beta_j$  ve  $\varphi_k$  etkileşimi ve  $\varepsilon_{ijk}$  ise hatayı temsil etmektedir.

Matematiksel modelde yer alan her bir etki için bir sıfır hipotezi ( $H_0$ ) ve bu hipotezlere alternatif hipotezler ( $H_a$ ) oluşturulacaktır. Bu hipotezler  $H_0$ : her  $\tau_i=0$  ve  $H_a$ : en azından bir  $\tau_i \neq 0$ ,  $H_0$ : her  $\beta_j=0$  ve  $H_a$ : en azından bir  $\beta_j \neq 0$ ,  $H_0$ : her  $\varphi_k=0$  ve  $H_a$ : en azından bir  $\varphi_k \neq 0$ ,  $H_0$ : her  $\tau_i\beta_j=0$  ve  $H_a$ : en azından bir  $\tau_i\beta_j \neq 0$ ,  $H_0$ : her  $\tau_i\varphi_k=0$  ve  $H_a$ : en azından bir  $\tau_i\varphi_k \neq 0$ ,  $H_0$ : her  $\beta_j\varphi_k=0$  ve  $H_a$ : en azından bir  $\beta_j\varphi_k \neq 0$ ,  $H_0$ : her  $\tau_i\beta_j\varphi_k=0$  ve  $H_a$ : en azından bir  $\tau_i\beta_j\varphi_k \neq 0$ ’dır.

Etki hipotezleri tercih edilen kabul edilebilir bir risk olan %5 değeri için Minitab programı ile test edilmiş ve sürüklenme kuvveti azaltım parametresine etkisi olan faktör ve etkileşimleri yüzdesel olarak Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



Şekil 3.23 : Sürüklenme kuvveti azaltım parametresine etki eden faktör ve etkileşimler.

Faktörlerin iki düzeyinde inceleme yaparken doğrusal bir ilişki olduğunu varsayılır. Ancak iki nokta arasındaki ilişki eğrisel olduğu durumda varsayımımız yanlış olmaktadır. Deney tasarımlarında eğriselliği araştırmak çok fayda sağlayacaktır. Bunu yaparken 3 düzeyli tam faktöriyel deney ( $3^k$ ) değil  $2^k$  tasarımımıza orta nokta ekleyerek deney sayımızı 3 düzeyli deneylere göre daha az sayıda deneyle tasarlayacağız. Eklenen orta nokta Çizelge 3.7’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.7 :** Deney tasarımı için eklenen orta nokta düzeyleri.

Mach Sayısı	İrtifa [m]	Debi [kg/s]
2.0	5000	0.03

Eklenen orta nokta için HAD analizi gerçekleştirilmiş ve hesaplanan sürüklenme kuvveti azaltım parametresi değeri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

**Çizelge 3.8 :** Orta nokta ve sürüklenme kuvveti azaltım parametresi.

Mach Sayısı	İrtifa [m]	Debi [kg/s]	$p_{sa}$
2.0	5000	0.03	0.526

Eğrisellik etkisi için bir sıfır hipotezi ve bu hipoteze alternatif bir hipotez oluşturulacaktır. Eğrisellik ( $E$ ) için oluşturulan hipotezler  $H_0: E=0$  ve  $H_a: E \neq 0$ ’dır.

Eğrisellik etkisi hipotezleritercih edilen kabul edilebilir bir risk olan %5 değeri için Minitab programı ile test edilmiş ve deney tasarımında eğriselliğin olmadığı gözlemlenmiştir.

Minitab programı ile analiz edilen deney tasarımı sonucunda üretilen matematiksel model denklem 3.3’de gösterilmiştir.

$$p_{sa} = 0.4449 - 0.1586M + 0.000052I + 9.74D - 0.001272I * D \quad (3.3)$$

Burada  $M$  serbest akış Mach Sayısı,  $I$  uçuş irtifası ve  $D$  DYÜ debisini temsil etmektedir. Eğrisellik bulunmadığı için bu denklem tüm düzeylerde ve ara noktalarda kullanılabilir. Elde edilen matematiksel model ile yörünge tahmin programlarına girdi olacak DYÜ’lü 155 [mm] M864 topçu mermisi için sürüklenme kuvveti veri tabanı üretilebilir.



#### 4. DEĞERLENDİRMELER

Dipten yanma üniteli topçu mermilerinde dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltımını konu alan bu çalışmada hesaplamalı yöntemlerle akış fiziği ve DYÜ karakteristiği detaylı olarak incelenmiştir.

Gerçekleştirilen doğrulama çalışması kapsamında farklı gazların enjeksiyonun dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltımına etkisi gözlemlenmiş, kimyasal reaksiyonların modellenmesinin gerekli olduğu görülmüştür.

Çalışma kapsamında DYÜ karakteristiğine etki eden faktör ve etkileşimlerinin yüzdesel oranları elde edilmiştir. En büyük etkiye sahip faktör %59 ile Mach Sayısı olarak bulunmuştur. İrtifa ve debi etkileşiminin DYÜ karakteristiğine etkisi %13 olarak bulunmuş, diğer ikili etkileşimler ve üçlü etkileşimin ise DYÜ karakteristiğine etkisi kabul edilebilir risk olan %5'in altında olduğu bulunmuştur.

Çalışma neticesinde dip bölgesi sürüklenme kuvveti azaltım parametresi için üretilen matematiksel modelin ilgili düzeyler ve ara noktalarında kullanılabilir olduğu bulunmuştur. Bu model kullanılarak yörünge tahmin programları için sürüklenme kuvveti girdisi elde edilebilir.

Bu çalışmada elde edilen bilgi birimi ile gelecekte kimyasal reaktif katı parçacıklar içeren çok fazlı akış alanlarının incelenmesi planlanmaktadır. Dip bölgesi akış fiziğinin ve DYÜ karakteristiğinin tamamen anlaşılmasından sonra DYÜ eniyileme çalışmaları gerçekleştirilecektir.



## KAYNAKLAR

**Ansys Fluent** (16.0) [Bilgisayar yazılımı].

**Ansys Fluent Theory Guide** [Teori rehberi].

**Baker, W. T., Davis, T. & Matthews, S. E.** (1951). Reduction of Drag of a Projectile in a Supersonic Stream by the Combustion of Hydrogen in the Turbulent Wake. *APL Report CM-637*, Applied Physics Lab., Johns Hopkins University.

**Bournot, H., Daniel, E. & Cayzac, R.** (2006). Improvements of the base bleed effect using reactive particles. *International Journal of Thermal Sciences* 45 1052–1065.

**Bowman, J.E. & Clayden, W.A.** (1967). Cylindrical afterbodies in supersonic flow with gas ejection. *AIAA Journal* Vol. 5 No. 8.

**Cavalleri, R.J.** (1988). Effects Of Base Bleed And Supersonic Nozzle Injection On Base Pressure. *AIAA 26th Aerospace Sciences Meeting*, Reno, Nevada.

**Choi, J.Y., Shin, E. & Kim, C.K.** (2005). Numerical Study of Base-Bleed Projectile with External Combustion. *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* Tucson, Arizona.

**Clayden, W.A. & Bowman, J.E.** (1968). Cylindrical Afterbodies at  $M=2$  with Hot Gas Ejection. *AIAA Journal*, Vol. 6, No. 12.

**Corke, T.C., Tillotson, D., Patel, M.P., Su, W.J. & Toledo W.** (2008). Radius Flow Vectoring for Projectile Drag and Steering Control Using Plasma Actuators. *4th Flow Control Conference*, Seattle, Washington.

**Danberg, J.E.** (1990). Analysis of the Flight Performance of the 155 mm M864 Base Burn Projectile. *Technical Report BRL-TR-3083*.

**Gibeling, H.J. & Buggeln R.C.** (1992). Projectile Base Bleed Technology Part I: Analysis and Results. *ARL-CR-2*.

**Jarrett, O., Jr., Cutler, A. D., Antcliff, R. R., Chitsomboon, T., Dancey, C. L & Wang, J.A.** (1988). Measurements of Temperature, Density, and Velocity in Supersonic Reacting Flow for CFD Code Validation. *25th JANNAF Combustion Meeting*, Huntsville, Alabama.

**Kayser, L.D.** (1975). Effects of Base Bleed and Supersonic Nozzle Injection on Base Pressure. *Memorandum Report No. 2456*, USA Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Maryland.

**Khurana, S., Suzuki, K. & Rathakrishnan, E.** (2012). Application of Breathing Blunt Nose Concept to Lifting Body Configuration. *30th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, New Orleans, Louisiana.

- Lee, Y.K., Kim, H.D. & Raghunathan, S.** (2004). A Study of Base Drag Optimization Using Mass Bleed. *15th Australasian Fluid Mechanics Conference*, The University of Sydney, Sydney, Australia.
- Mathur, T. & Dutton, J. C.** (1995). Base Bleed Experiments with a Cylindrical Afterbody in Supersonic Flow. *AIAA Paper 95-0062*.
- Menter, F.** (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA JOURNAL Vol. 32, No. 8*.
- Minitab** (18.0) [Bilgisayar yazılımı].
- Onn, S.C., Su, A., Wei, C.K. & Sun, C.C.** (2001). Computational drag and magnus force reduction for a transonic spinning projectile using passive porosity. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 190 6125-61 39.
- Sahu, J. & Heavey K.R.** (1997). Numerical Investigation of Supersonic Base Flow with Base Bleed. *Journal Of Spacecraft And Rockets, Vol. 34, No. 1*.
- Sahu, J. & Nietubicz C.J.** (1985). Navier-Stokes computations of projectile base flow with and without mass injection. *AIAA J. 23 (9) 1348–1355*.
- Youssef, E.M., Radwan, M.A., Mostafa, H.E. & Hadhoud,M.K.** (2015).Low Signature Advanced Base Bleed Grains.*International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 12*. ISSN 2229-5518.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Ali AT  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 25.08.1990 Korkuteli  
**E-posta** : aliat.itu@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:**2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİMLER:

- 2015 - Halen Aerodinamik Modelleme ve Analiz Mühendisi, Roketsan Roket San. Tic. Ltd.
- 2014 -2015 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Mühendisi, SDM Sıradışı Ar-ge ve Mühendislik San. Tic. Ltd.

### BİLDİRİLER:

- **Avşar, H., At, A. &Çelik, B.**(2013). Computational Simulation of Shock Wave Laminar Boundary Layer Interaction, *Ankara International Aerospace Conference, AIAC-2013-147.*