



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SCRAMJET MOTORLARDA ALEV TUTUCU GEOMETRİSİNİN
HAVA-YAKIT KARIŞIMINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUSTAFA YÜZÜCÜ

MAYIS

MUSTAFA YÜZÜCÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2024

**SCRAMJET MOTORLARDA ALEV TUTUCU GEOMETRİSİNİN
HAVA-YAKIT KARIŞIMINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

Mustafa YÜZÜCÜ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman

Doç. Dr. Burak KURŞUN

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2024

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Mustafa YÜZÜCÜ tarafından hazırlanan “Scramjet Motorlarda Alev Tutucu Geometrisinin Hava-Yakıt Karışımına Etkisinin Sayısal Olarak Araştırılması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman:Doç. Dr. Burak KURŞUN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : Doç.Dr.Fikret POLAT

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Doç.Dr. Halil BAYRAM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 02/05/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

(İmza)

Mustafa YÜZÜCÜ

02/05/2024

SCRAMJET MOTORLARDA ALEV TUTUCU GEOMETRİSİNİN HAVA-YAKIT
KARIŞIMINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa YÜZÜCÜ

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2024

ÖZET

Scramjet motorları, havayı süpersonik hızlara sıkıştırmak ve daha sonra bu hızda yanma gerçekleştirmek için tasarlanmış jet motorlarıdır. Geleneksel jet motorlarından farklı olarak, scramjetler içerisinde dönen bir fan veya kompresör bulunmaz. Bunun yerine, sabit parçalarla hava hızlandırılıp, sıkıştırılır ve yakıt püskürtülerek yanma işlemi gerçekleştirilir. Yapılan araştırmalar, scramjet motorlar için en uygun yakıtın içerdiği enerji bakımından hidrojen olduğunu ortaya koymuştur. Literatür çalışmalarında scramjet motorlarda yüksek hızdaki hava ile hidrojenin daha verimli bir şekilde karıştırılarak yanmasını sağlamak amacı ile farklı yöntemler denenmiştir. Farklı geometriye sahip alev tutucu kullanımı, farklı hidrojen enjeksiyon yöntemleri ve şok dalgası üretme mekanizmaları bu yöntemler arasındadır. Bu tez çalışmasında ise temel geometrik şekillerin birleşiminden oluşan hibrit geometrili bir alev tutucu tasarımı gerçekleştirmesi ve resirkülasyon bölgelerinin genişletilerek hava-yakıt karışımının artırılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda yamuk, dikdörtgen, üçgen ve daire geometrilerinin birleşiminden faydalanılmıştır. Oluşturulan alev tutucu geometrileri için arka duvar açısı ve alev tutucu derinliği değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Tez çalışmasında farklı derinliğe ($H=14$ mm, 22 mm, 30 mm ve 35 mm) ve arka duvar açısına ($\alpha=50^\circ$, 70° ve 90°) sahip alev tutucu geometrisinin hava-hidrojen karışımına, sıcaklığa ve basınca etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Alev tutucu derinliğinin artışı, alev tutucu içerisinde daha büyük boyutta ve uniform dağılımlı girdap akımları oluşturarak hava-hidrojen karışımının daha homojen olmasını sağlamıştır. Arka bölge açısının artışı hava-hidrojen karışımının, alev tutucunun çıkış bölgesinde yoğunlaşmasına neden olmuştur. Düşük arka bölge açısında ise ($\alpha=50^\circ$) hava ile hidrojenin daha homojen şekilde karıştığı anlaşılmıştır. Aynı derinlik ve arka duvar açısı değerleri için yamuk+üçgen geometrisinde hem daha uniform hem de daha yüksek konsantrasyonda hidrojen dağılımı elde edilmiştir. Diğer yandan dikdörtgen geometrili alev tutucu için düşük derinlik değerinde alev tutucu duvarlarındaki basıncın da düştüğü, diğer hibrit geometrili alev tutuculardaki derinlik ve arka duvar açısı değişiminin basınçta ihmal edilebilir düzeyde etki oluşturduğu gözlenmiştir. Yamuk ve yamuk+üçgen geometrilerinde alev tutucu içerisinde derinlik ve arka duvar açısına bağlı olarak uniform bir sıcaklık dağılımı elde edilebilirken, dikdörtgen alev tutucu geometrisi tüm parametre değerleri için uniform olmayan bir sıcaklık dağılımı sergilemiştir. Elde edilen tüm bulgular dikkate alındığında alev tutucunun taban yüzey geometrisinin akışı yönlendiren bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca boyut ve malzeme cinsi gibi tasarım kriterlerine bağlı olarak hem alev tutucu derinliğinin hem de arka duvar açısının optimize edilmesi verimli bir yanma ve itki gücü açısından önem arz etmektedir.

Sayfa Adedi : 63
Anahtar Kelimeler : Scramjet, Yanma odası, Hidrojen yakıt
Danışman : Doç. Dr. Burak KURŞUN



NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FLAME HOLDER GEOMETRY ON AIR-FUEL MIXTURE IN SCRAMJET ENGINES

(M. Sc. Thesis)

Mustafa YÜZÜCÜ

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2024

ABSTRACT

Scramjet engines are jet engines designed to compress air to supersonic speeds and then perform combustion at that speed. Unlike traditional jet engines, scramjets do not have a rotating fan or compressor. Instead, the air is accelerated and compressed by fixed parts and the combustion process is carried out by spraying fuel. Research has shown that the most suitable fuel for scramjet engines is hydrogen in terms of the energy it contains. In literature studies, different methods have been tried to ensure that high-speed air and hydrogen are mixed and burned more efficiently in scramjet engines. The use of flame holders with different geometries, different hydrogen injection methods, and shock wave generation mechanisms are among these methods. In this thesis, the objective is to realize a hybrid geometric flame holder design composed of the combination of basic geometric shapes, with the aim of expanding the recirculation zones to enhance the air-fuel mixture. To achieve this, combinations of trapezoidal, rectangular, triangular, and semicircular geometries have been utilized. Parameters such as aft wall angle and flame holder depth have been defined as variable parameters for the created flame holder geometries. In this study, the effects of flame holder geometry with different depths ($H=14$ mm, 22 mm, 30 mm, and 35 mm) and rear angles ($\alpha=50^\circ$, 70° , and 90°) on air-hydrogen mixture, temperature, and pressure were investigated numerically. The increase in flame holder depth has ensured a more homogeneous mixture of air-hydrogen by generating larger-sized and uniformly distributed vortex flows within the flame holder. The increase in the rear angle caused the air-hydrogen mixture to concentrate in the exit region of the flame holder. It was understood that at a low rear angle ($\alpha=50^\circ$), air and hydrogen mixed more homogeneously. For the same depth and rear wall angle values, a more uniform and higher concentration distribution of hydrogen has been achieved in the trapezoidal+triangle geometry. On the other hand, for the rectangular flame holder, a decrease in pressure on the flame holder walls has been observed at low depth values, while the variation in depth and rear wall angle in other hybrid geometries has had a negligible effect on pressure. In trapezoidal and trapezoidal+triangle geometries, a uniform temperature distribution can be obtained within the flame holder depending on the depth and rear wall angle, whereas the rectangular flame holder geometry exhibited a non-uniform temperature distribution for all parameter values. Taking all findings into consideration, it is concluded that the base surface geometry of the flame holder has a directing effect on the flow. Furthermore, optimization of both the flame holder depth and rear wall angle is crucial for efficient combustion and thrust performance depending on design criteria such as size and material type.

Number of pages : 63
Keywords : Scramjet, Combustion chamber, Hydrogen Fuel
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Burak KURŞUN



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tarih boyunca savaş sanayisi ve teknolojileri, günlük hayatımızın temellerini oluşturan teknolojilerin ilk olarak kullanıldıldığı mecralardır. Buna örnek olarak internet kullanımı tarihte ilk olarak Amerikan Donanma'sında haberleşme yöntemi olarak kullanılmaya başlanmış, günümüzde ise bütün hayatımızın temelinde yeralan bir teknoloji haline gelmiştir. Yine bununla beraber bazı teknolojiler de masumane olarak gösterilip ama altında çok büyük askeri hedefleri olan projelere dönüşmüştür. Buna örnek olarak Soğuk Savaş döneminde ABD ile Sovyetler Birliği arasında geçen uzay yarışının aslında kıtalar arası balistik füze çalışması için kullanılan bir paravan olmuştur. Yine bu uzay ve havacılık teknolojilerinde kullanılan katı yakıt teknolojisinin düzensiz sağladığı itki kuvvetinden ve sıvı yakıtlı roket motorlarının yanma ve limitlerinin olmasından dolayı bilim insanları bu motorları daha da ileriye götürecek olan teknolojiyi sırasıyla ramjet ve ardından scramjet motorlarını kullanarak aşmayı başarmıştır. Scramjet motorlarının hidrojen yakıt ile 5 Ma hızların üzerine çıkması, hipersonik kayma araçlarında kullanılmasına, uzay ve ileri füze çalışmalarında kullanımında seçilmesinin başlıca sebebi olmuştur.

Yüksek lisans ile ilgili herhangi bir çalışmaya başlamadan önce bana yol gösterip ve bu süreçte bana nasıl adımlar atmamı her defasında aynı sabır ve sükunetle cevap veren Doç. Dr. Burak KURŞUN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGE DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
3. MATERYAL METHOD	12
3.1. Matematiksel Model	12
3.2. Sayısal Model.....	13
3.3. Sınır Koşulları ve Hesaplama Bölgesinin Hücre Yapısı.....	16
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	18
4.1. Sayısal Sonuçların Doğrulanması	18
4.2. Parametrik Analiz Bulgularının Değerlendirilmesi	20
4.2.1. Yamuk alev tutucu geometrisi	22
4.2.2. Yamuk+daire alev tutucu geometrisi	34
4.3.3. Yamuk+üçgen alev tutucu geometrisi	46
5. SONUÇLAR	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Geleneksel jet motoru	1
Şekil 1.2. Scramjet motoru	2
Şekil 2.1. Üç (a) ve dört (b) destekli hidrojen püskürtme stratejileri (Krieti ve diğerleri, (2022)	5
Şekil 2.2. Farklı alev tutucu geometrileri (Moradi ve diğerleri, 2018).....	5
Şekil 2.3 Basamak şekilli alev tutucu geometrisinin diğer koşullarla karşılaştırılması (Kummitha ve diğerleri, 2018).....	6
Şekil 2.4. Sinüzoidal yüzeyli alev tutucu geometrisi (Kummitha ve diğerleri, 2018).....	6
Şekil 2.5. Farklı açılara sahip ön ve arka duvar geometrileri (Landsberg ve diğerleri, (2022)	7
Şekil 2.6. Farklı alev tutucu genişlikleri için oluşturulan hesaplama bölgesi (Choubey ve diğerleri, 2023)	8
Şekil 2.7. Farklı vorteks üretici yerleşim düzenleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı (Liu ve diğerleri, 2024)	8
Şekil 2.8. Arka duvar yüksekliği değişimi için oluşturulan hesaplama bölgesi (Cai ve diğerleri, 2018)	9
Şekil 2.9. Alev tutucuların farklı yerleşim düzenleri (Rajesh ve diğerleri, 2023).....	9
Şekil 2.10. Dikdörtgen alev tutucuların farklı yerleşim düzenleri (Chakravarthy ve Randive, 2021).....	10
Şekil 3.1. Alev tutucu geometrileri	12
Şekil 3.2. Hesaplama bölgesindeki hücre yapısı ve dağılımı.....	16
Şekil 4.1. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi (Gruber ve diğerleri, 2001)	19
Şekil 4.2. Hücre Sayısından Bağımsızlık Testi ve Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırılması.....	19
Şekil 4.3. Yamuk alev tutucu için hız konturu örneği ($H=14$ mm, $L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$).....	21

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için akım çizgileri ve hız vektörleri ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2.5$)	23
Şekil 4.5. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için akım çizgileri ve hız vektörleri dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2.5$)	24
Şekil 4.6. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için akım çizgileri ve hız vektörleri dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2.5$)	25
Şekil 4.7. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2.5$)	26
Şekil 4.8. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2.5$)	27
Şekil 4.9. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2.5$)	28
Şekil 4.10. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2.5$).....	29
Şekil 4.11. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2.5$).....	30
Şekil 4.12. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2.5$).....	31
Şekil 4.13. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2.5$).....	32
Şekil 4.14. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2.5$).....	33
Şekil 4.15. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2.5$).....	34
Şekil 4.16. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2.5$)	35
Şekil 4.17. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2.5$)	36
Şekil 4.18. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2.5$)	37
Şekil 4.19. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2.5$)	38

Şekil	Sayfa
Şekil 4.20. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)	39
Şekil 4.21. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)	40
Şekil 4.22. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$).....	41
Şekil 4.23. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$).....	42
Şekil 4.24. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$).....	43
Şekil 4.25. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$).....	44
Şekil 4.26. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$).....	45
Şekil 4.27. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$).....	46
Şekil 4.28. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)	47
Şekil 4.29. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)	48
Şekil 4.30. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)	49
Şekil 4.31. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)	50
Şekil 4.32. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)	51
Şekil 4.33. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)	52
Şekil 4.34. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$).....	53
Şekil 4.35. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$).....	54

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.36. Farklı yamuk+ üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$).....	55
Şekil 4.37. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$).....	56
Şekil 4.38. Farklı yamuk+ üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$).....	57
Şekil 4.39. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$).....	58



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Akışkan girdi değerleri	17



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
Ma	Mach sayısı
H	Entalpi
P	Basınç
ρ	Yoğunluk
u_i	Hız Bileşenleri
k	Türbülans Kinetik Enerji
ω $\widetilde{G}_k$	Özgül Yayılma Oranı Türbülans Kinetik Enerji Üretim
$\widetilde{G}_\omega$	ω oluşum
Γ_k	k 'nın efektif difüzitesi
Γ_ω	ω 'nın efektif difüzitesi
Y_k	k 'nın yayılımı
Y_ω	ω 'nın yayılımı
D_ω	Çapraz Difüzyon Terimi
μ_t	Türbülans Vizkozite Terimi
T	Sıcaklık

Kısaltmalar**Açıklama**

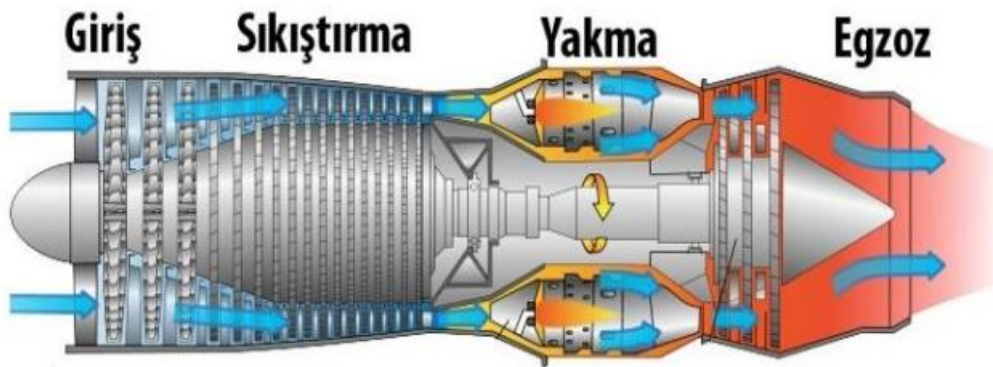
RANS

Reynolds-Ortalamaalı Navier-Stokes

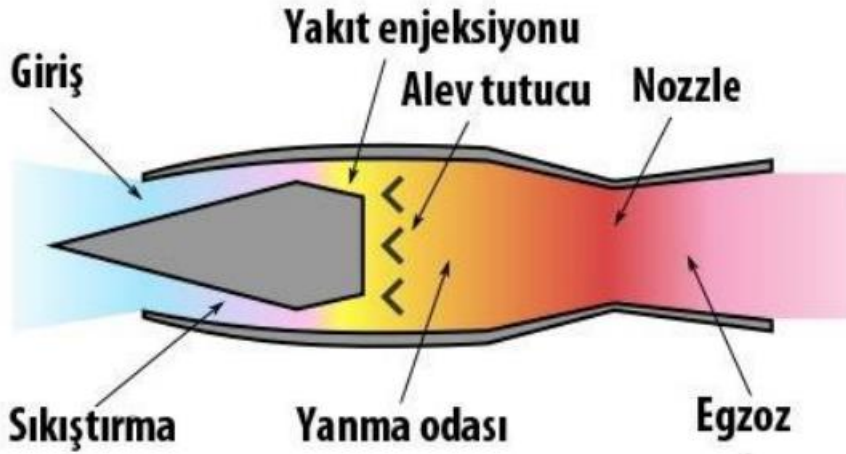


1. GİRİŞ

Scramjet motorlar gerek uzay araştırması için kullanılan hava araçlarında, gerekse güdümlü füzelerde popülerliği giderek artmaya devam eden motorlardır. Kendisi bir çeşit Ramjet motoru (supersonic combustion ramjet) olmasına karşın termal verimliliği hipersonik araçlardaki diğer itki sistemlerine göre daha yüksektir. Üzerinde dönen bir parçasının olmaması, oksijen tankı taşıma ihtiyacı duymaması ve yüksek özgül itkisi ile yüksek hızı onu diğer hipersonik itki sistemlerinden ayırmaktadır. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2’de sırasıyla geleneksel jet motoru ve Scramjet motorunun iç yapısı verilmiştir. Geleneksel jet motorlarında öncelikle hava kompresöre alınarak yüksek basınca çıkarılmakta ve sıcaklığı artırılmaktadır. Sonrasında yanma odasına girerek yakıt ile birleşmekte ve yanma meydana gelmektedir. Yanma ile bir itme gücü oluşmakta ve bu itme gücü ile aynı zamanda türbine hareket vermektedir. Son olarak yanma ürünü gaz egzoz vasıtasıyla dışarıya atılmaktadır. Şekil 1.2’de verilen Scramjet motorlarda da sıkıştırma, yanma ve egzoz aşamaları mevcuttur. Fakat geleneksel jet motorlarından farklı olarak içerisinde dönen bir parça mevcut değildir. Scramjet motorlarda serbest akış hızının yüksek olması nedeniyle ateşleme süreci çok hızlı gerçekleşir ve bu durum hava-yakıt karışımının verimli bir şekilde karışamamasına neden olabilir. Bu nedenle Scramjet motorları iyileştirmek için, yakıtın havayla etkili bir şekilde karıştırılması, bu motorların gelecekteki gelişimi için kilit rol oynamaktadır. Şekil 1.2’de görülen alev tutucular süpersonik akış hızını belirli ölçüde düşürüp yanma süresini artırmakta ve daha verimli hava-yakıt karışımı elde edilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 1.1 Geleneksel jet motoru



Şekil 1.2. Scramjet motoru

Scramjet teknolojisinde motor tasarımındaki temel hedef, verimli bir hava-yakıt karışımı sağlamak ve yüksek hızlarda yaşanan büyük direnç kuvvetlerini aşmak için büyük miktarda enerji üretmektir. Bu nedenle hızlı yanabilen ve büyük miktarda itme gücü üretebilen bir yakıt seçilmesi gerekmektedir. Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan yakıtlar kerosen ve nafta tipi petrol türevli yakıtlardır. Fakat bu yakıtların emisyonları atmosfere zarar verici etkiye sahiptir. Hidrojen ise diğer yakıtlar arasında en yüksek alt ısı değere sahip olması ve çevreye zararlı emisyon üretmemesi nedeni ile gelecekte yaygın olarak tercih edilmesi tahmin edilen yakıtlardan bir tanesidir. Günümüzde Scramjet motorların veriminin artırılmasına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmalarında dikkate alınan temel faktörler aşağıda verildiği şekilde özetlenebilir:

- ***Yakıt ve Hava Karışımının İyileştirilmesi:*** Scramjet motorların performansını artırmak için en önemli faktörlerden biri, yakıtın hava ile etkili bir şekilde karıştırılmasıdır. Bu, yanma odasındaki karışımın homojen olması ve verimli bir yanma gerçekleşmesi açısından kritiktir. Bu nedenle, daha etkili bir karışım elde etmek için farklı enjeksiyon yöntemleri ve geometriler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.
- ***Yanma Verimliliğinin Artırılması:*** Yanma odasındaki verimliliği artırmak için, yanma sürecinin boşluk içinde etkili bir şekilde gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu nedenle süpersonik akış içinde hızlı bir şekilde gerçekleşen ateşleme süreçlerinin daha iyi anlaşılması ve optimize edilmesi önemlidir.

- **Geometrik Modifikasyonlar ve Teknik Uygulamalar:** Scramjet motorun geometrik modifikasyonları, akış alan içerisindeki geometrik değişikliklerin yanı sıra farklı teknik uygulamalar, örneğin çoklu jet enjektörleri, mikro hava jetleri ve şok üreteçleri gibi yöntemler, karışımın ve yanmanın verimliliğini artırmak için kullanılan yöntemler arasındadır.
- **Yakıt Seçimi:** Scramjet motorlarında kullanılan yakıtın seçimi önemlidir. Hızlı yanabilen ve büyük miktarda itki üretebilen bir yakıt seçimi motorun performansını artırıcı etkiye sahiptir.
- **Motor Malzemesinin Seçimi:** Scramjet motorları için süpersonik akış ve yanma sırasında meydana gelen yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı malzeme seçiminin tercih edilmesi gerekmektedir.

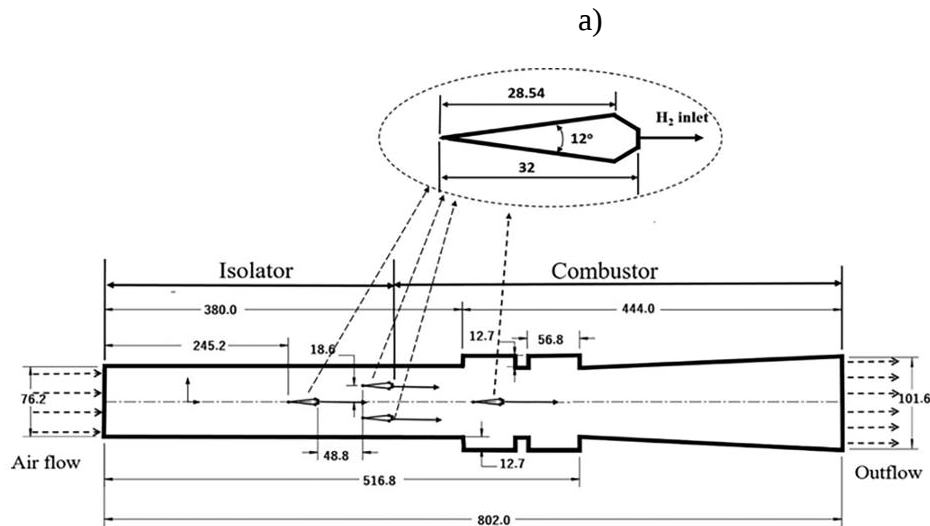
Scramjet motorların yüksek hızlı uçuş yetenekleri, yüksek enerji verimliliği, düşük atmosfer basıncında çalışabilme kabiliyeti, yüksek itiş gücü, mekanik yapısının basit olması, hafif olması ve uzay görevleri için uygun olması üzerine araştırma yapılmasına değer popüler bir konu haline gelmesini sağlamıştır. Yukarıda bahsedilen avantajlar, scramjet motorlarını yüksek hızlı ve uzun menzilli uçuşlar, hipersonik taşıtlar ve atmosfer dışındaki ortamlarda kullanım için çekici kılmaktadır. Ancak, scramjet teknolojisinde hala birçok teknik zorlukla karşılaşıldığından, uygulamada daha geniş bir kullanımı elde etmek için daha fazla araştırmalar ve geliştirmeler gereklidir.

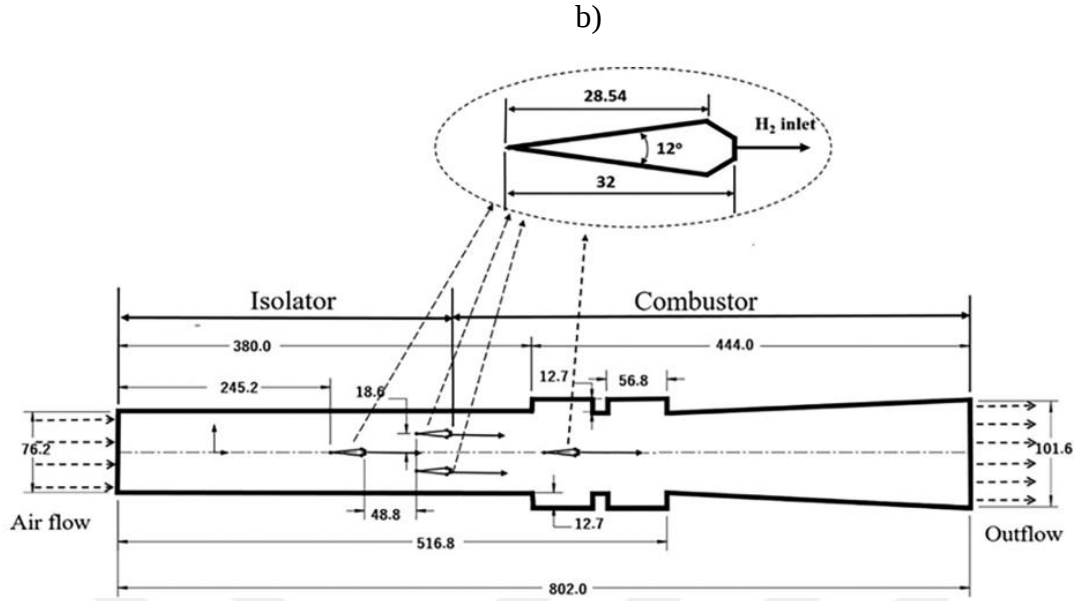
Ayrıca süpersonik akışlarda oluşan şok dalgaları neticesinde meydana gelen yüksek basınç ve aşırı gürültü problemleri scramjet motorlarla ilgili yapılan deneysel çalışmaları daha zor hale getirmektedir. Bu nedenle hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayanan sayısal çalışmalar bu tür zorlukların aşılmasında ve akış bölgesinin görselleştirilerek daha ayrıntılı incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada da boşluk tabanlı alev tutucucu geometrisine sahip bir scramjet motordaki hava-yakıt karışımının incelenmesi için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonraki bölümde Scramjet motorların verimini artırmak için yapılan çalışmalardan ve bu tez çalışmasının kapsamı ve amacından bahsedilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde daha önce scramjet motorlar üzerine yapılan çalışmalardan, çalışmalardan elde edilen sonuçlardan ve bu tez çalışmasının kapsamı ve amacından bahsedilmiştir. Scramjet motorlarda, yüksek hızdaki havayla hidrojenin daha etkili bir şekilde karıştırılması ve yanması için farklı stratejiler denenmiştir. Bu stratejiler arasında değişik geometriye, yerleşim düzenine ve sayıya sahip alev tutucuların kullanımı, çeşitli hidrojen enjeksiyon yöntemleri ve şok dalgası üretme mekanizmaları bulunmaktadır.

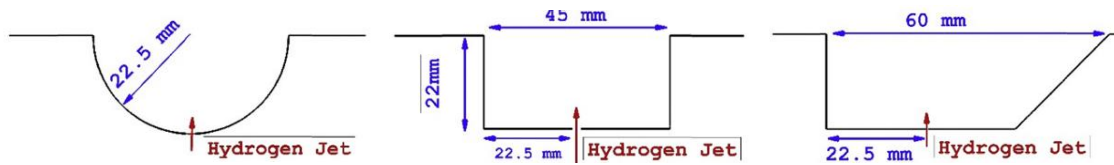
Yakıt püskürtme açısı ve yakıt püskürtücü desteklerin konumlandırılma düzeni, Scramjet'in yanma performansı ve itme gücü üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu için bu konuda çeşitli araştırmalar yürütülmüştür. Üç ve dört desteğe sahip hidrojen enjeksiyonlu ve boşluk tabanlı scramjet motoru incelenmiştir (Krieti ve arkadaşları, 2022). Dört destekli enjeksiyonun akış özellikleri, üç destekli enjeksiyonun akış özellikleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 2.1). Çalışmada dört destekli enjeksiyon sistemin, üç destekli enjeksiyon sistemine kıyasla daha iyi bir performans gösterdiği ve yanma karakteristiklerini iyileştirdiği belirtilmiştir. Bu durum, destek sayısının artmasıyla birlikte akıştaki resirkülasyon ve vorteks oluşumlarına ve şok dalgası etkileşimlerindeki artışa bağlı olarak açıklanmıştır.





Şekil 2.1. Üç (a) ve dört (b) destekli hidrojen püskürtme stratejileri (Krieti ve diğerleri, 2022)

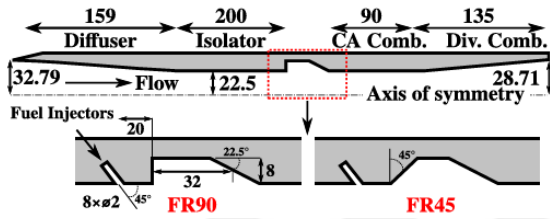
Alev tutucular, hava-yakıt karışımını artırma ve yanma için daha fazla süre oluşturma konularında kritik bileşenlerdir. Şekil 2.2’de verilen yarım daire, kare ve yamuk alev tutucu geometrilerin hava-yakıt karışımına etkilerini inceledikleri ve yamuk geometrinin en etkili karışımı sağladığı sonucuna ulaştıkları belirtilmiştir (Moradi ve arkadaşları, 2018).



Şekil 2.2. Farklı alev tutucu geometrileri (Moradi ve diğerleri, 2018)

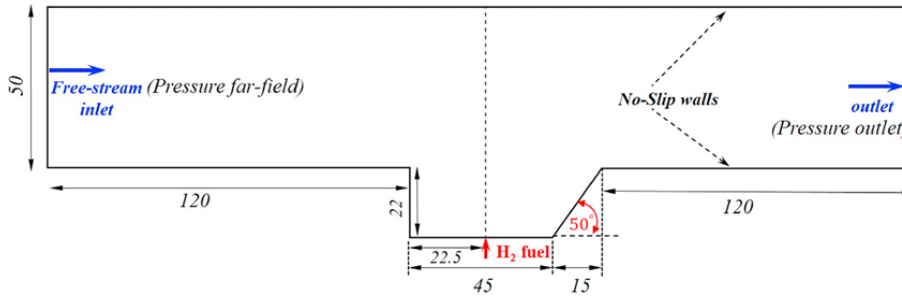
Basamak şekilli alev tutucu geometrisinin kullanımının hava-yakıt karışım performansını artırabileceğini göstermiştir (Kummitha ve diğerleri, 2018). Çalışmada basamak şekilli alev tutucu geometrisi, yarım daire şekilli alev tutucu olan ve alev tutucu olmayan durumlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 2.3).

Ysmuk şekilli alev tutucu geometrisinde boşluğun ön ve arka duvar açılarının süpersonik akışa etkileri ise deneysel bir çalışma ile araştırılmıştır (Landsberg ve arkadaşları, 2022). Şekil 2.5’te deneysel çalışmada uygulanan konfigürasyonlar verilmiştir. Deneysel çalışmada eğik ön duvar geometrisinin vorteks oluşumunu artırarak daha homojen bir hava-yakıt karışımı sağladığı gözlemlenmiştir. 90°’lik dik duvar açısı ise vorteks oluşumunu önemli ölçüde azaltmıştır.



Şekil 2.5. Farklı açılara sahip ön ve arka duvar geometrileri (Landsberg ve diğerleri, 2022)

Yamuk geometrili bir alev tutucudaki (Şekil 2.6) arka duvar açısı, Mach sayısı ve alev tutucu genişliğinin vorteks oluşumu, hidrojen konsantrasyonu ve sıcaklık dağılımı üzerine etkilerinin incelendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Choubey ve arkadaşları, 2023). Sayısal analiz sonuçları, Mach sayısı arttıkça, boşluk içindeki resirkülasyonun daha yoğun hale geldiğini ve istikrarlı bir ateşleme bölgesinin oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca şok dalgasının akış yönünde yayılmasının kontrol edebilmesini sağlayan ve sınır tabaka ayrılmasını minimize eden optimum bir genişlik olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmadaki geometri için optimum alev tutucu genişliğinin 45 mm olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak Huang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, alev tutucu geometrisinin yanma odası akış alanı üzerindeki etkilerini incelemiş ve arka duvar açısının 45° olduğu durumda itki verimliliğinin daha da artırabileceğini keşfetmiştir.



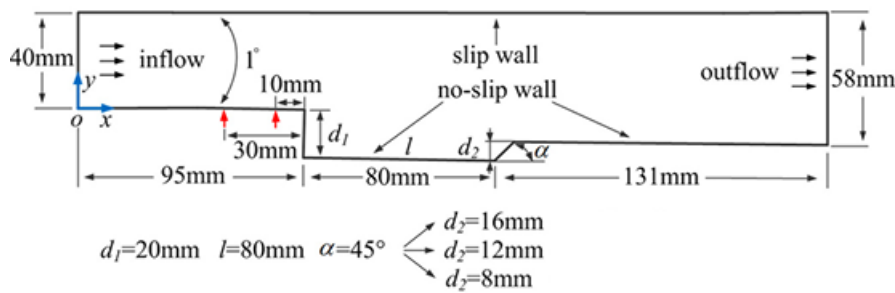
Şekil 2.6. Farklı alev tutucu genişlikleri için oluşturulan hesaplama bölgesi (Choubey ve diğerleri, 2023)

Alev tutucular içerisindeki karışımın artırılması için uygulanan diğer yöntemlerden bir tanesi de vorteks üreticilerin kullanılması olmuştur. Farklı yerleşim düzenine sahip vorteks üreticilerin yamuk alev tutucu içerisindeki akışa etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır (Liu ve arkadaşları, 2024). Şekil 2.7’de farklı vorteks üretici (üçgen geometriler) yerleşim düzenleri için sayısal analizlerden elde edilen bazı hidrojen konsantrasyonu konturları verilmiştir. Mor renkli bölgeler hidrojen konsantrasyonunun daha yoğun olduğu kısımları ifade etmektedir. Akış başlangıç noktasına uzaklıkları 81 mm ve 31 mm olan vorteks yerleşim düzeninde yakıt-hava karışımının daha homojen meydana geldiği tespit edilmiştir.



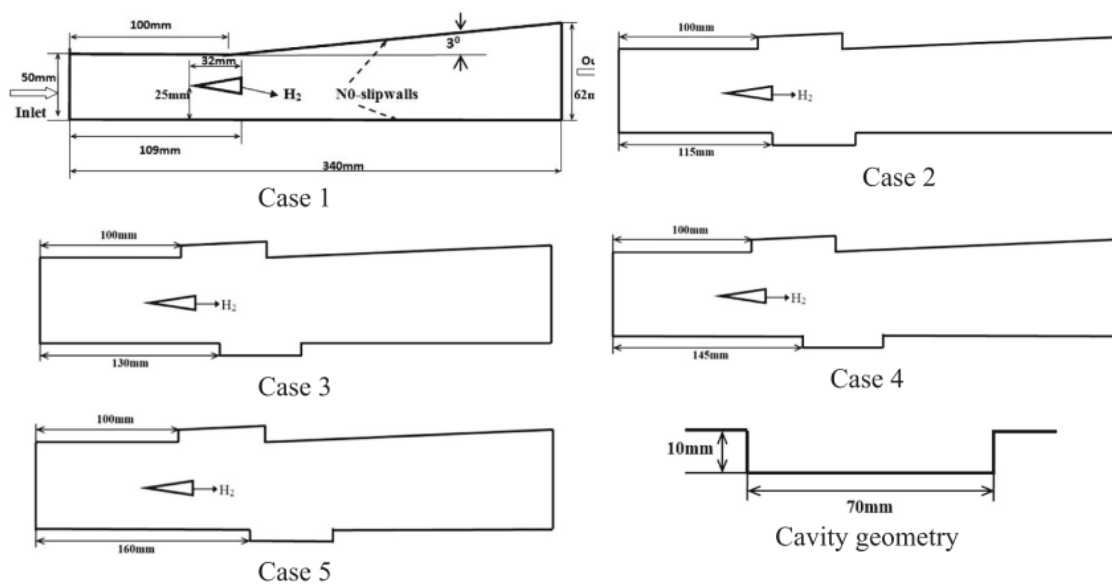
Şekil 2.7. Farklı vorteks üretici yerleşim düzenleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı (Liu ve diğerleri, 2024)

Yamuk geometrili bir alev tutucu için eğik arka duvar yüksekliğinin vorteks oluşumuna etkilerini sayısal olarak incelemiştir (Cai ve arkadaşları, 2018). Aşağıdaki şekilde 45°’lik arka duvar açısı için oluşturulan hesaplama bölgesi verilmiştir. Arka duvar yüksekliğinin düşürülmesi ile yakıtın alev tutucu içerisine daha yoğun bir şekilde aktarılabildiği fakat optimum bir yükseklik değerinin belirlenmesi gerektiği rapor edilmiştir.



Şekil 2.8. Arka duvar yüksekliği değişimi için oluşturulan hesaplama bölgesi (Cai ve diğerleri, 2018)

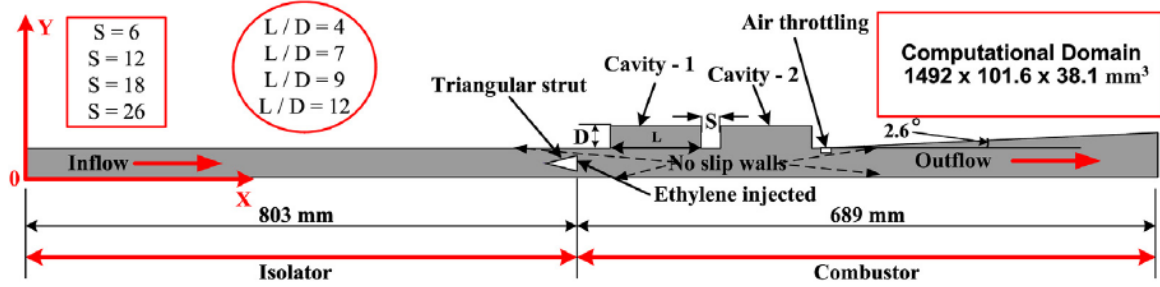
Bir scramjet motorda ikili alev tutucu kullanımında alev tutucuların birbirine göre konumlarının hava-yakıt karışımı ve vorteks oluşumu üzerine etkileri değerlendirilmiştir (Rajesh ve arkadaşları, 2023). Şekil 2.9’da görüldüğü gibi beş farklı konfigürasyon için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.9. Alev tutucuların farklı yerleşim düzenleri (Rajesh ve diğerleri, 2023)

Benzer şeklide ikili alev tutucu kullanımı ve alev tutucuların yerleşim düzeni ile ilgili sayısal analizler gerçekleştirmiştir (Chakravarthy ve Randive, 2021). Sayısal çalışmada dikdörtgen geometrilili alev tutucu kullanılmış ve alev tutucular arası mesafe (S) ve alev tutucu en/boy

(L/D) oranı parametrelerinin değişimleri incelenmiştir (Şekil 2.10). L/D oranı 7 ve tutucular arası mesafe 12 mm olan çift boşluklu konfigürasyon, diğer konfigürasyonlarla karşılaştırıldığında daha yoğun ve büyük rekürkülasyon bölgeleri sergilemiştir.



Şekil 2.10. Dikdörtgen alev tutucuların farklı yerleşim düzenleri (Chakravarthy ve Randive, 2021)

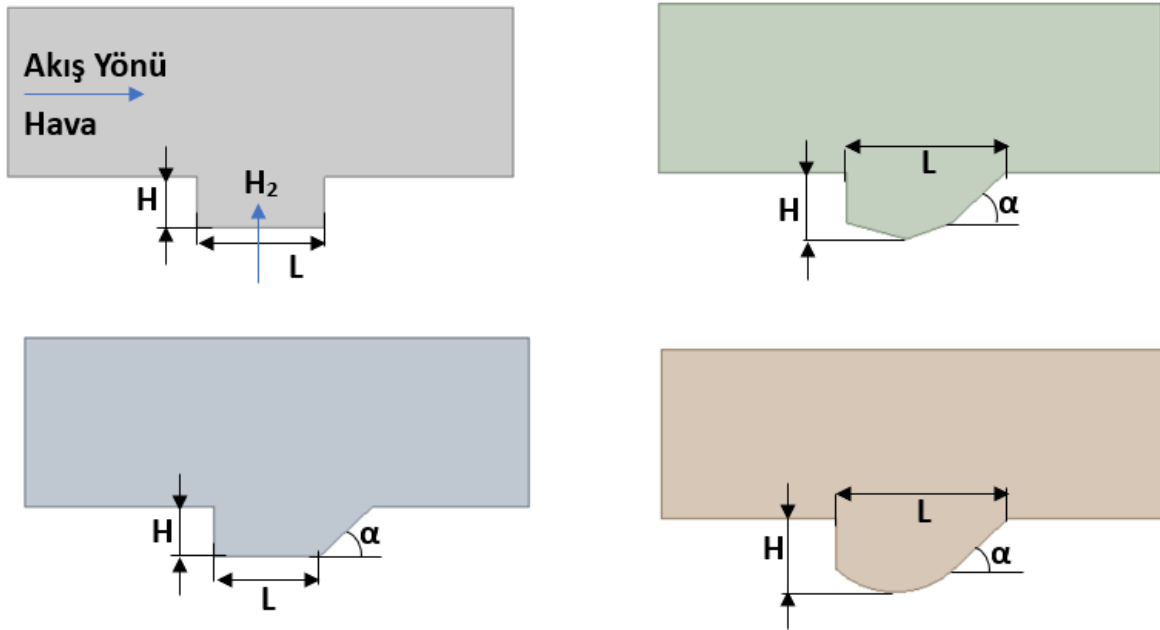
Literatürdeki çalışmalar scramjet motorlarda boşluk temelli alev tutucuların akış hızını yavaşlatarak akışkanın alev tutucu içerisindeki kalma süresini artırdığını göstermiştir. Bu durum hava-yakıt karışımının daha homojen olmasını ve yanma veriminin artmasını sağlamıştır. Boşluk temelli alev tutucularda resirkülasyon bölgelerinin genişlemesi ve vorteks oluşumlarının artması hava-yakıt karışımının homojenliğini artırmaktadır. Resirkülasyon bölgelerinin genişlemesi ve vorteks oluşumlarının artması amacıyla farklı teknikler kullanılmıştır. Yakıt enjeksiyon konumlarının ve enjeksiyon yönlerinin değiştirilmesi, alev tutucular için farklı geometriler kullanılması, alev tutucuların yüzey geometrisinin değiştirilmesi, ikili alev tutucu kullanımı ve vorteks oluşturmalar bu teknikler arasında yer almaktadır. Çalışmalarda yamuk alev tutucu geometrisinin diğer geometrilere göre daha uniform bir hava-yakıt karışımı sağladığı aktarılmıştır. Yamuk geometride arka duvarı eğik konumlandırmanın alev tutucu içerisine giren hava miktarını artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, yamuk geometrili alev tutucuda arka duvar yüksekliği, alev tutucu genişliği ve derinliği değiştirilerek resirkülasyon ve vorteks oluşum bölgelerinin artırılması ve yanma veriminin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasında ise yamuk geometrinin diğer temel geometrik şekillerle birleştirilerek hibrit geometrili bir alev tutucu tasarımı gerçekleştirilmiş ve resirkülasyon bölgelerinin genişletilerek hava-yakıt karışımının artırılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda yamuk, dikdörtgen, üçgen ve daire geometrilerinin birleşiminden faydalanılmıştır. Oluşturulan alev

tutucu geometrileri için arka duvar açısı ve alev tutucu derinliği değişken parametreler olarak belirlenmiştir. İlk olarak dikdörtgen geometrili alev tutucuda meydana gelen süpersonik akış için sayısal analiz sonuçları literatürdeki deneysel çalışma sonuçları ile doğrulanmış, sonrasında ise parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Parametrik analizlerden elde edilen bulgular hız vektörlerini, akım çizgilerini, basınç konturlarını, sıcaklık konturlarını ve hidrojen konsantrasyonu dağılımlarını içeren grafik ve şekiller verilerek değerlendirilmiştir. Yapılan alev tutucu tasarımları ile düz, yuvarlak ve keskin kenarların resirkülasyon bölgesine, vorteks oluşumuna, sıcaklığa ve basınca etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır. Böylece bu tez çalışması ile ileride hava-yakıt karışımının ve yanma veriminin iyileştirilmesi amacıyla yapılacak olan daha karmaşık geometriye sahip alev tutucu tasarımları için ön değerlendirme imkânı sağlayabileceği öngörülmüştür.

3. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında literatürdeki çalışma sonuçları dikkate alınarak oluşturulan dört hibrit alev tutucu geometrisi Şekil 3.1’de verilmiştir. Hibrit tasarımların elde edilmesinde dikdörtgen, yarım daire, üçgen ve yamuk geometrilerden faydalanılmıştır. Temel geometrilerin tercih edilme sebebi ise karmaşık geometrilere nispeten düşük maliyetle kolay imal edilebilir olmalarıdır. Hibrit geometrilerde farklı akışkan hızı, derinlik, genişlik ve arka bölge açısı değerleri için parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üç farklı yakıt püskürtme noktası belirlenerek, yakıt püskürtme noktalarının hibrit geometrilerle etkileşimi gösterilmeye çalışılmıştır. Sayısal analizler, $H=14$ mm, 22 mm, 30 mm ve 35 mm derinlik değerleri, $L=30$ mm, 35 mm ve 45 mm genişlik değerleri ve $\alpha=50^\circ$, 70° ve 90° arka bölge açıları için yapılmıştır. Hava akışı 1 Mach, 2 Mach ve 2,5 Mach hızlarında ve alev tutucu geometrisinin orta, yan ve giriş kısmından yakıt olarak püskürtülen hidrojen ise Mach 1 hızında alınmıştır.



Şekil 3.1. Alev tutucu geometrileri

3.1. Matematiksel Model

Akış ve enerji analizleri iki boyutlu, sıkıştırılabilir ve kararlı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Denklem (1), (2) ve (3) sırasıyla kütle, momentum ve enerjinin korunumunu ifade etmektedir.

Kütle korunumu

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

Momentum korunumu

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij}), \quad i, j = 1, 2 \quad (2)$$

Enerji korunumu

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho H u_i) = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\tau_{ij} u_i) + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} \right], \quad i, j = 1, 2 \quad (3)$$

Denklemlerde P, H, u_i ve ρ sırasıyla basınç, entalpi, hız bileşenleri ve yoğunluğu temsil etmektedir.

3.2. Sayısal Model

Bu tez çalışmasında, korunum denklemlerini sayısal olarak çözmek için Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerinden yararlanılmıştır. Süpersonik akışlarda şok sınır tabaka etkileşiminin öngörülmesi için k- ω türbülans modeli kullanılmıştır. Türbülans kinetik enerjisini (k) ve özgül yayılma oranını (ω) hesaplamak için aşağıdaki taşınım denklemleri kullanılmıştır (Choubey ve diğerleri, 2023);

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \widetilde{G}_k - Y_k + S_k, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

Türbülans kinetik enerji üretimi $\widetilde{G}_k$ ile ifade edilmiş, ω 'nın oluşumu ise G_ω ile gösterilmiştir. Γ_k ve Γ_ω sırasıyla k ve ω 'nın efektif difüzyon terimini ifade etmektedir. Benzer şekilde Y_k ve Y_ω ise k ve ω 'nın yayılımını göstermektedir. S_k ve S_ω ise kullanıcı tabanlı girdiler yapılması durumundaki kaynak terimleridir. Çapraz-difüzyon terimi D_ω olarak adlandırılır ve formülasyonu aşağıdaki gibidir. Bu terim, türbülans modelinde ω (özellik yayılma oranı) değişkeninin difüzyonunu temsil eder.

$$D_\omega = 2(1 - F_1)\rho\sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \quad (6)$$

SST $k-\omega$ modelinin etkili difüzyon terimini ifade eden denklemler şu şekildedir:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad (7)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \quad (8)$$

Burada σ_k ve σ_ω sırasıyla k ve ω 'nın türbülans Prandtl sayılarını temsil etmektedir. Türbülans viskozite terimi (μ_t) ise Denklem 9 ile ifade edilir;

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^* a_1 \omega}, \frac{1}{SF_2}\right]}, \quad (9)$$

Denklem 9'daki S ise şekil değiştirme hızını göstermektedir. σ_k ve σ_ω ise aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır;

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k,2}}}, \quad (10)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{\omega,2}}}, \quad (11)$$

Denklem 9'daki α^* terimi ise Denklem 12 ile verilmiştir;

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + \frac{(Re_t)}{R_k}}{1 + \frac{(Re_t)}{R_k}} \right), \quad (12)$$

Denklemlerin çözülmesinde kullanılan F_1 ve F_2 hibrit fonksiyonları ise aşağıdaki denklemlerle verilmiştir;

$$F_1 = \tanh(\varphi_1^4) \quad (13)$$

$$\varphi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right], \quad (14)$$

$$D_\omega^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right], \quad (15)$$

F_2 fonksiyonu için ise aşağıdaki denklem geçerlidir;

$$F_2 = \tanh(\varphi_2), \quad (16)$$

$$\varphi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right], \quad (17)$$

Denklemlerde y akışkan duvarlarına dik olan yönü, D_ω^+ ise çapraz-difüzyon teriminin pozitif kısmını ifade etmektedir. Ayrıca denklemlerde $\sigma_{k,1}=1,176$, $\sigma_{k,2}=1$, $\sigma_{\omega,1}=2$, $\sigma_{\omega,2}=1,168$, ve $\alpha_1=0,31$ olarak alınmıştır.

Hidrojen ve havanın yanma reaksiyonu için kütle transferi denklemi ise aşağıda verilmiştir;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_n) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho Y_n u_k) = \frac{\partial}{\partial x_k} (-\bar{J}_k) + \omega_n \quad k = 1,2 \quad (18)$$

Süpersonik akışlardaki yanma prosesi türbülansın önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle türbülans yoğunluğunun da hesaplamalara dahil edildiği Eddy-dissipation reaksiyon modeli kullanılmıştır. Hava ve hidrojen arasında tek aşamalı kimyasal reaksiyonun ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$) olduğu varsayılmış, böylece simülasyon süresinin azaltılması ve denklemlerin basitleştirilmesi amaçlanmıştır (Huang, 2015, Huang ve diğerleri, 2011).

Sayısal analizler için ANSYS-Fluent 2022R1 ticari yazılımı kullanılmıştır. Sayısal çözümlemede basınç-hız çifti için Coupled yöntemi kullanılırken, korunum denklemlerinin ayrıklaştırılmasında ikinci dereceden UPWIND yöntemi uygulanmıştır. Yakınsama kriterleri kütle ve momentumun korunumu denklemleri için 10^{-4} , enerjinin korunumu için ise 10^{-6} olarak kabul edilmiştir. Sayısal analizler bu yakınsama kriterlerine ulaşıldığında sonlandırılmıştır.

3.3. Sınır Koşulları ve Hesaplama Bölgesinin Hücre Yapısı

Hesaplama bölgesinin hava ve hidrojen giriş kısmına Denklem 19 ile verilen formülasyonlar uygulanmıştır. Giriş bölgesinde x eksenine doğrultusundaki hız (U_o), sıcaklık (T), k ve ω değerleri tanımlanmıştır (Pressure far field).

$$u = U_o; T = T_{inlet}; k = \frac{3}{2} (U_o I)^2; \omega = \sqrt{k} \left(c_\mu^{1/4} 0.07d \right), \quad (19)$$

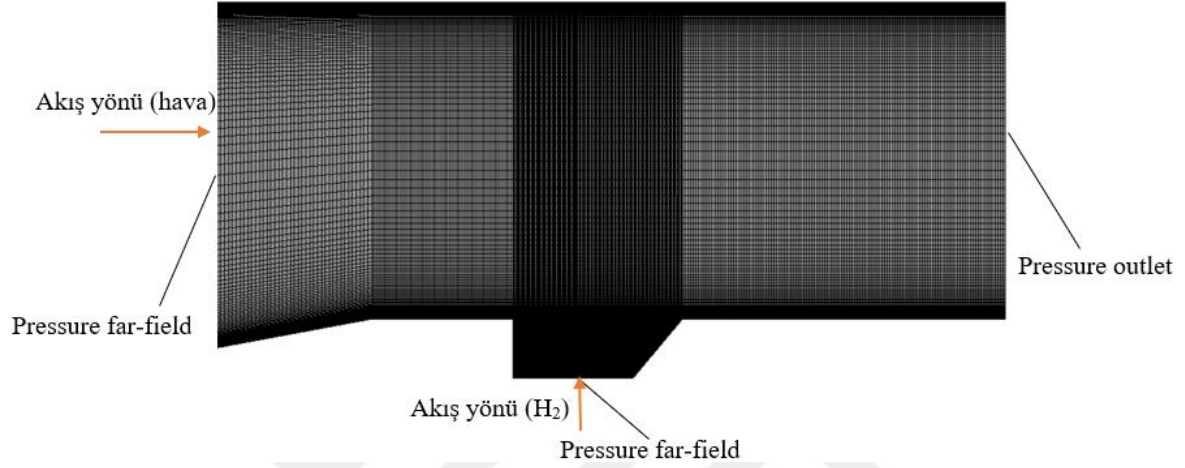
Akışkan bölgesindeki katı yüzeylerde kaymazlık sınır koşulu tanımlanmış ve değişkenlerin katı cidarlardaki değerleri aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$u = 0; \frac{\partial T}{\partial x} = 0, k = \omega = 0, \quad (20)$$

Akışkan çıkış bölgesinde ise tüm değişkenlerin çıkış yüzeyine dik olan değişimleri sıfır olarak kabul edilmiştir (Pressure outlet).

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0, \quad (21)$$

Hesaplama bölgesinde yapılandırılmış hücre yapısı tercih edilmiştir. Katı yüzey civarlarında hücre yoğunluğu artırılmış, alev tutucu bölgesine denk gelen alanda ise tümünden yoğunlaştırılmış hücre yapısı kullanılmıştır. Kullanılan hücre yapısı, hücre dağılımı ve sayısal analizlerde kullanılan sınır şartları Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Hesaplama bölgesindeki hücre yapısı ve dağılımı

Sayısal hesaplamalarda hava ve hidrojen için girdi olarak kullanılan veriler Tablo 3.1 ile sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Akışkan girdi değerleri

Akışkan	P (atm)	T (K)	Mach Sayısı	N ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ O (%)	H ₂ (%)
Hava	1	1000	2.5	73,6	23,2	3,2	0
H ₂	1	600	1	0	0	0	100

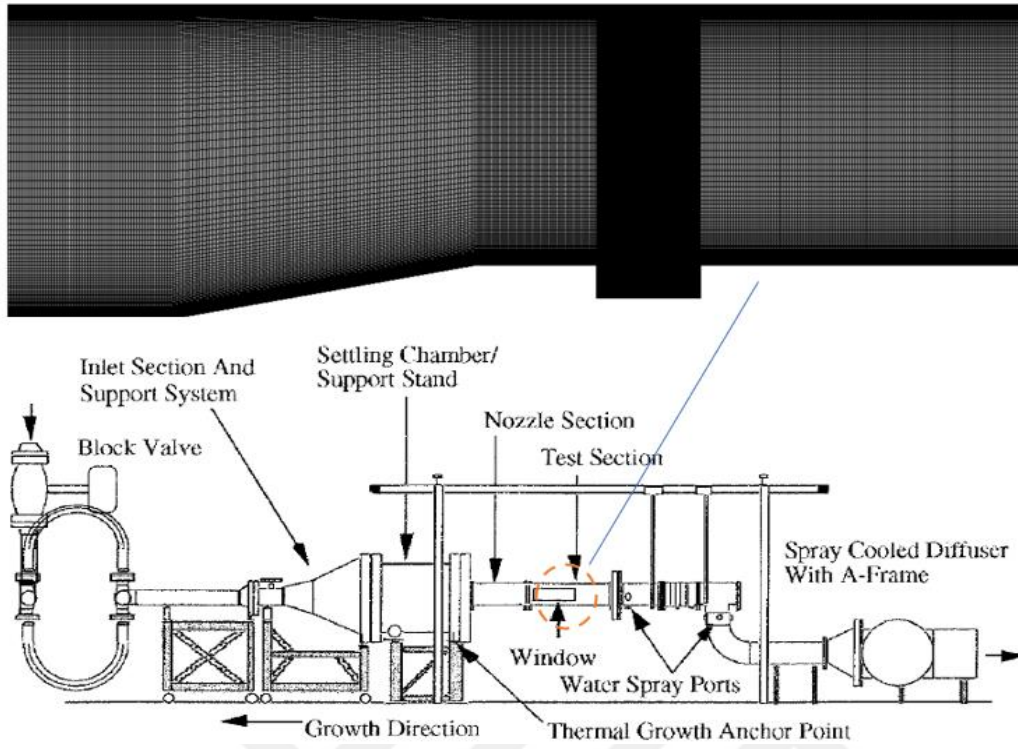
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda sayısal analiz sonuçlarının doğruluğu değerlendirilirken, ikinci kısımda ise parametrik çalışma sonuçları değerlendirilmiştir.

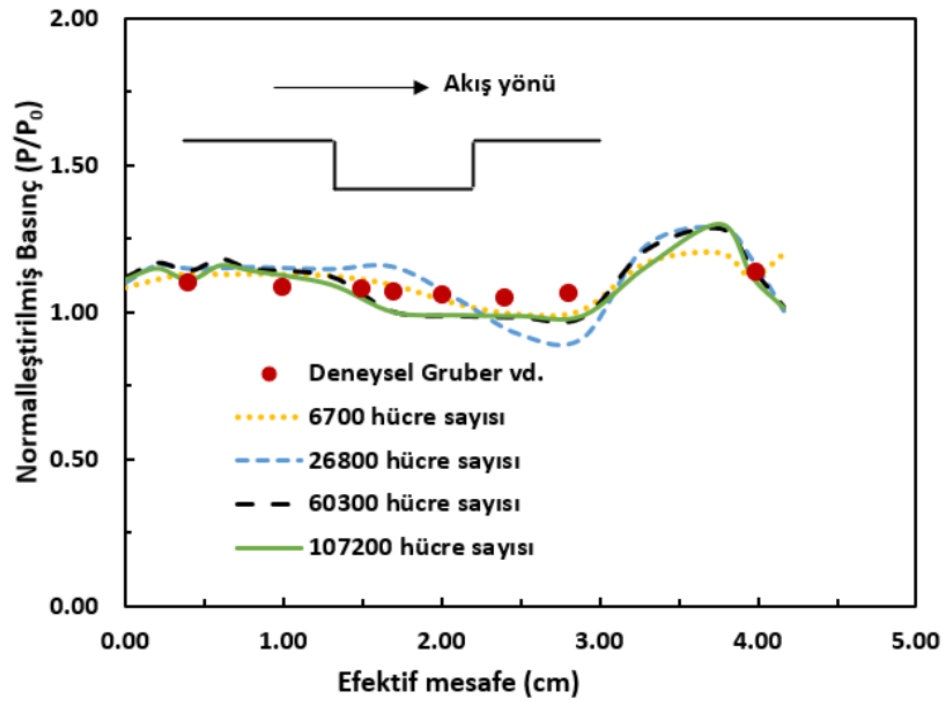
4.1.Sayısal Sonuçların Doğrulanması

Sayısal sonuçların doğrulanmasında Gruber ve arkadaşları (2001) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi ve deneysel ölçümlerin yapıldığı test bölgesi Şekil 4.1’de verilmiştir.

Doğrulama işlemi ise kendi içerisinde iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada hücre sayısından bağımsızlık testi yapılmıştır. Sayısal analizlerin doğruluğu için belirli bir hücre sayısından sonra sonuçların ihmal edilebilir seviyede değiştiğinin gözlenmesi gerekmektedir. İkinci aşamada ise belirlenen çıktılar açısından deneysel ve sayısal çalışma sonuçları kıyaslanmıştır. Şekil 4.2’de hem hücre sayısından bağımsızlık hem de deneysel bulgularla karşılaştırma sonuçlarına yer verilmiştir. Şekil 4.2’de efektif mesafe, alev tutucunun akışın geldiği yöndeki üst ucundan başlayıp arka kenar üst ucuna kadar ölçülen mesafeleri ifade etmektedir. Normalleştirilmiş basınç değeri ise alev tutucu yüzeyinde belirlenen efektif mesafedeki akışkan basıncının, akışkanın hesaplama bölgesine girişteki basıncına oranı olarak tanımlanmıştır. Hücre sayısından bağımsızlık testi ve deneysel sonuçlarla karşılaştırma işlemi de normalleştirilmiş basınç değeri dikkate alınarak yapılmıştır.



Şekil 4.1. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi (Gruber ve diğerleri, 2001)



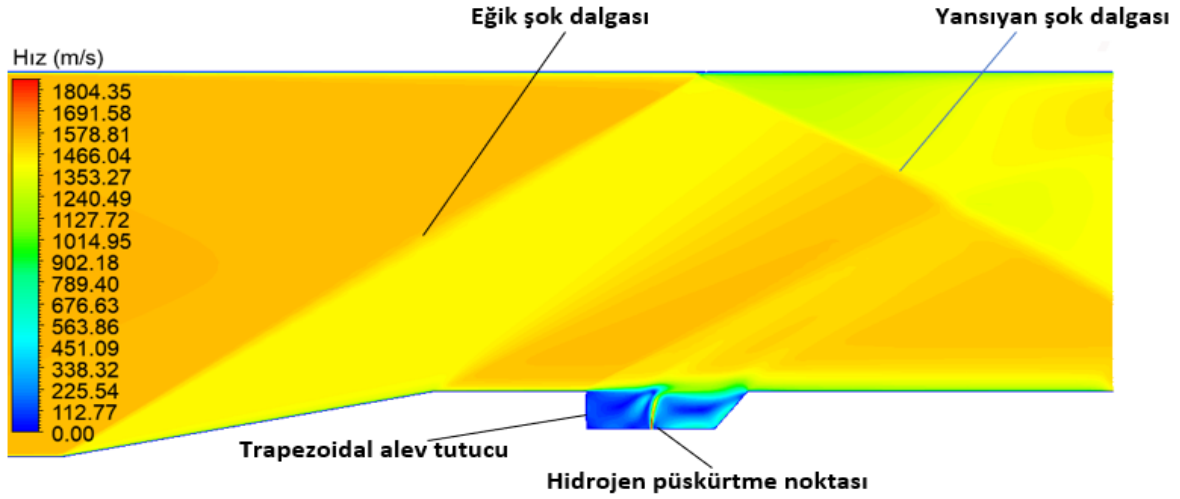
Şekil 4.2. Hücre Sayısından Bağımsızlık Testi ve Sayısal Sonuçların Deneysel Sonuçlar ile Karşılaştırılması

Şekil 4.2'deki doğrulama grafiğinden görüldüğü gibi 60300 hücre sayısından sonra normalleştirilmiş basınç değerlerindeki değişim %1'in altına düşmüştür. Bu durum 60300 hücre sayısından daha yüksek hücre sayılarında değişimin ihmal edilebilir seviyede olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenle parametrik analiz için 60300 hücre sayısı yeterli görülmüştür. Ayrıca deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki en yüksek sapma 1,5 cm ile 3 cm aralığında %6 civarında elde edilmiştir. Bu durum uygulanan sayısal yöntemin makul ölçülerde kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

4.2.Parametrik Analiz Bulgularının Değerlendirilmesi

Sayısal analizler, Bölüm 3'te Şekil 3.1 ile verilen alev tutucu geometrileri kullanılarak $H=14$ mm, 22 mm, 30 mm ve 35 mm derinlik değerleri, $L=45$ mm genişlik değeri ve $\alpha=50^\circ$, 70° ve 90° arka bölge açıları için yapılmıştır. Ana akım bölgesindeki hava akış hızı 2,5 Mach yakıt olarak püskürtülen hidrojen ise Mach 1 hızında alınmıştır.

Scramjet içerisindeki süpersonik akışta ses hızının üzerine çıkılması nedeni ile şok dalgaları oluşmaktadır. Şok dalgası önündeki akışkanın hızı şok dalgası arkasındaki akışkanın hızına göre daha düşüktür. Bu durum süpersonik hızdaki akışkanın alev tutucu civarındaki ikamet süresinin (resident time) artmasını sağlamakta böylece daha fazla hidrojen yanması sağlanabilmektedir. Şekil 4.3'te belirli parametre değerleri için elde edilen şok dalgası örneği verilmiştir.

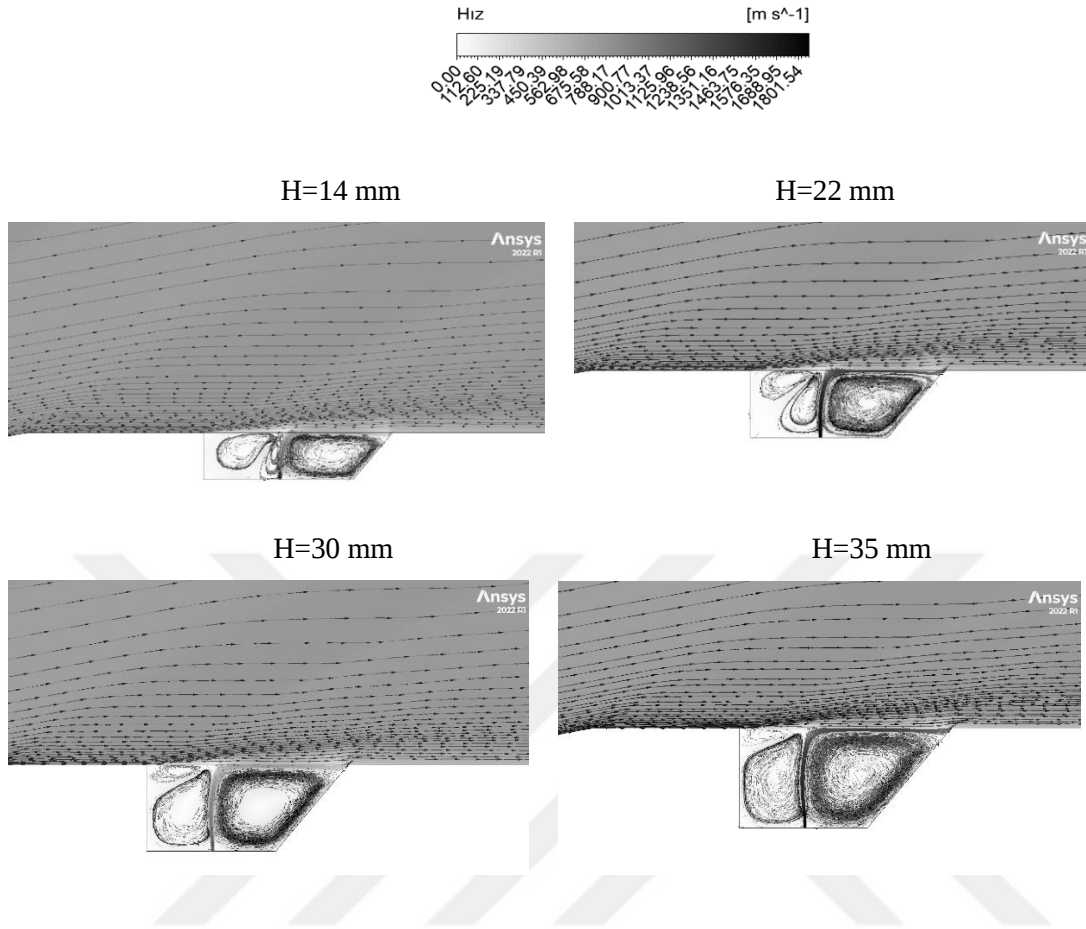


Şekil 4.3. Yamuk alev tutucu için hız konturu örneği ($H=14$ mm, $L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)

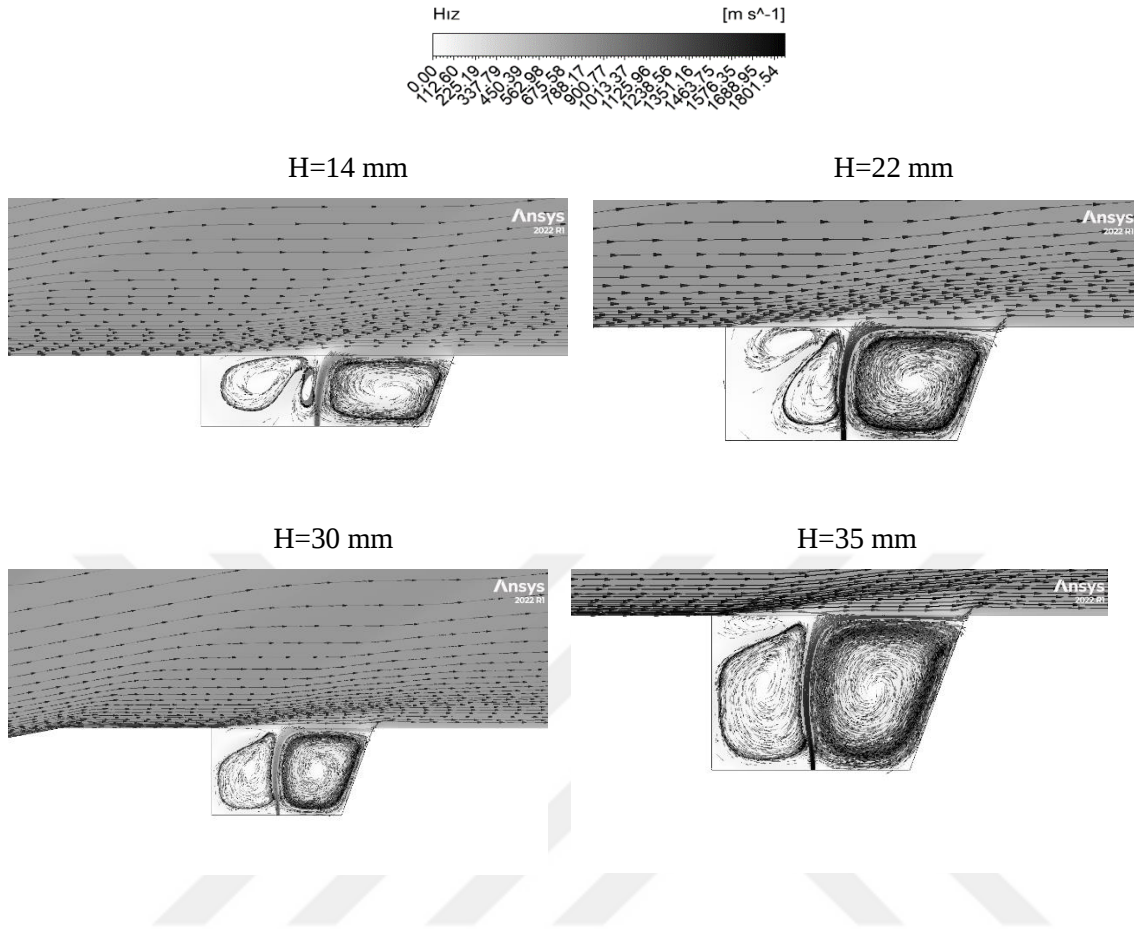
Bu çalışmadaki temel amaç, havanın alev tutucu geometrisi sayesinde hidrojen püskürtülen bölgedeki ikamet süresini artırmak ve böylece daha homojen bir hidrojen-hava karışımı sağlayarak yanma verimini artırmak olmuştur. Hidrojen-hava karışımının alev tutucu içerisinde daha homojen bir şekilde dağılmasının ve daha fazla miktarda hidrojenin yanmasının sağlanması alev tutucu geometrisi ile yakından ilişkilidir. Alev tutucu geometrisinin değişimi neticesinde ana akım hattı ve alev tutucu arasındaki basınç gradyanı değişmekte ve bu durum alev tutucu içerisine giren hava miktarını da etkilemektedir. Alev tutucu içerisine giren hava akımının oluşturduğu kaotik çalkantılı akış (vorteks) hidrojenin yanma miktarını ve hidrojen-hava karışımının homojenitesini değiştirmektedir. Vorteks oluşumuna bağlı olarak sistemde yanma sonucu oluşan sıcaklık ve basınç dağılımının da sistemdeki malzeme dayanımı açısından ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında dikdörtgen, trapezoidal (yamuk), üçgen ve yarım daire geometrilerinin birleşiminden oluşan alev tutucu geometrileri oluşturulmuş ve elde edilen bulgular yukarıda bahsedilen fiziksel olgular dikkate alınarak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Değerlendirmeler sonucunda basınç, sıcaklık ve hava-hidrojen karışımı açısından en uygun hibrit geometri tespit edilmiştir.

4.2.1. Yamuk alev tutucu geometrisi

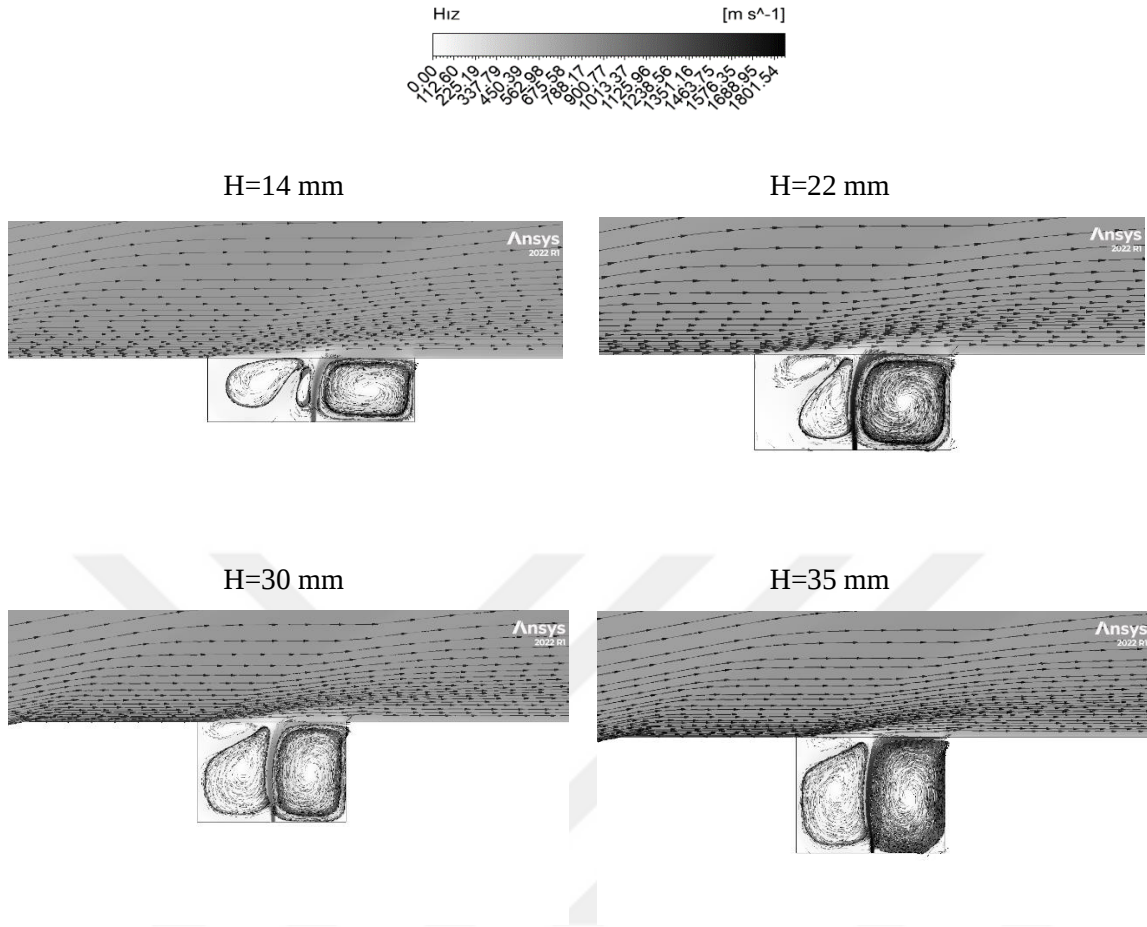
Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’da literatürdeki birçok çalışmada tercih edilen ve derinlik, genişlik ve arka bölge açısı gibi parametrelerin etkilerinin yaygın olarak incelendiği yamuk geometrili alev tutucu için akım çizgileri ve hız vektörleri verilmiştir. Yamuk geometride arka bölge duvarına belirli bir eğim açısı oluşturulmasının temel nedeni daha önce yapılan çalışmalarda da belirtildiği ana akım ve alev tutucu bölgesi arasındaki basınç farkının artırılarak daha fazla havanın alev tutucu bölgesine çekilmesi prensibine dayanmaktadır. Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’da yamuk geometri için hem arka duvar açılarının hem de alev tutucu derinliklerinin hız profillerine etkileri gözlenmektedir. Tüm arka duvar açıları için ($\alpha=50^\circ$, 70° ve 90°) düşük derinlik değerinde ($H=14$ ve 22 mm) arka duvar bölgesine yakın alanda daha yoğun şekilde vorteks oluşumları meydana gelmiştir. Derinliğin artması ile hidrojen püskürtme noktasının her iki tarafında da vorteks oluşumları belirginleşmiş ve daha uniform bir karışım hareketi meydana gelmiştir ($H=35$ mm). Arka duvar açısının $\alpha=50^\circ$ değerinde diğer açı değerlerindeki gibi tüm alev tutucu içerisinde daha uniform bir vorteks dağılımı meydana geldiği dikkati çekmektedir. Arka bölge açısının düşürülmesi ile hem alev tutucu içerisine giren hava miktarı hem de havanın alev tutucu bölgesindeki ikamet süresi artmış, böylece daha yoğun ve uniform bir karışım elde edilmiştir.



Şekil 4.4. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için akım çizgileri ve hız vektörleri ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)



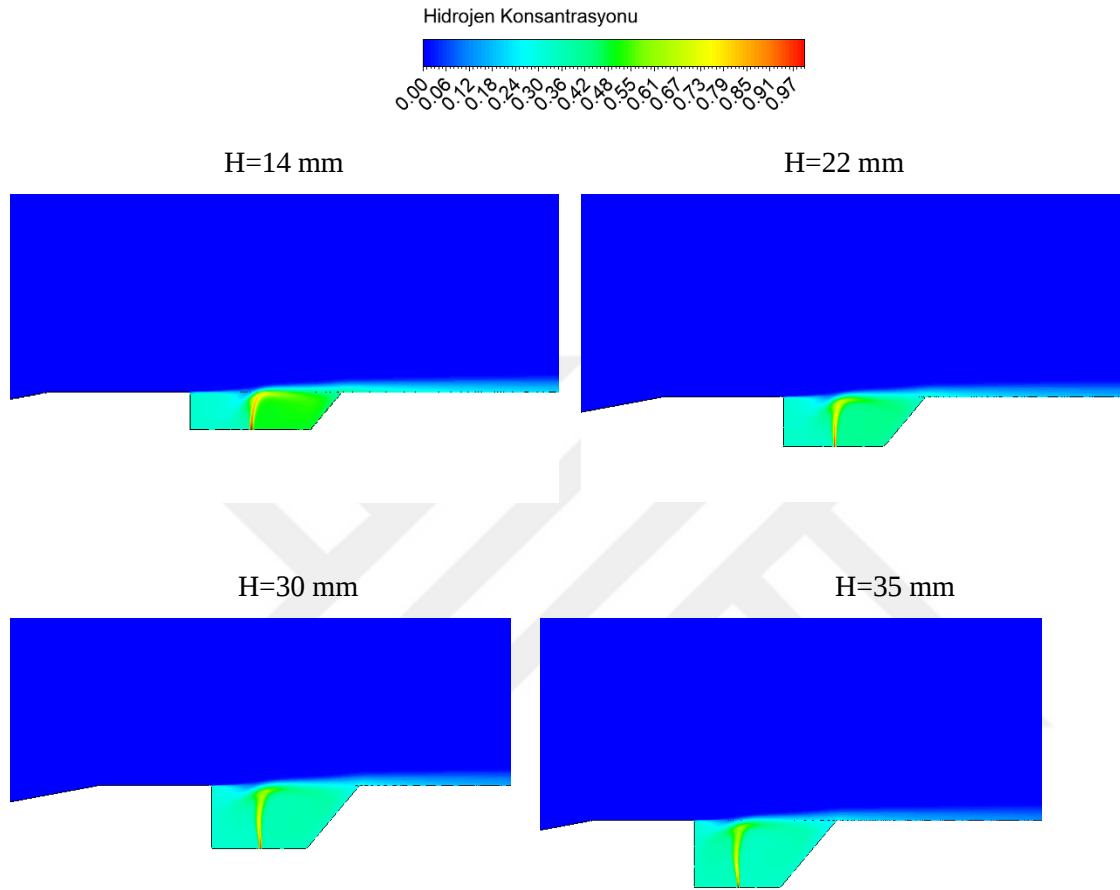
Şekil 4.5. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için akım çizgileri ve hız vektörleri ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)



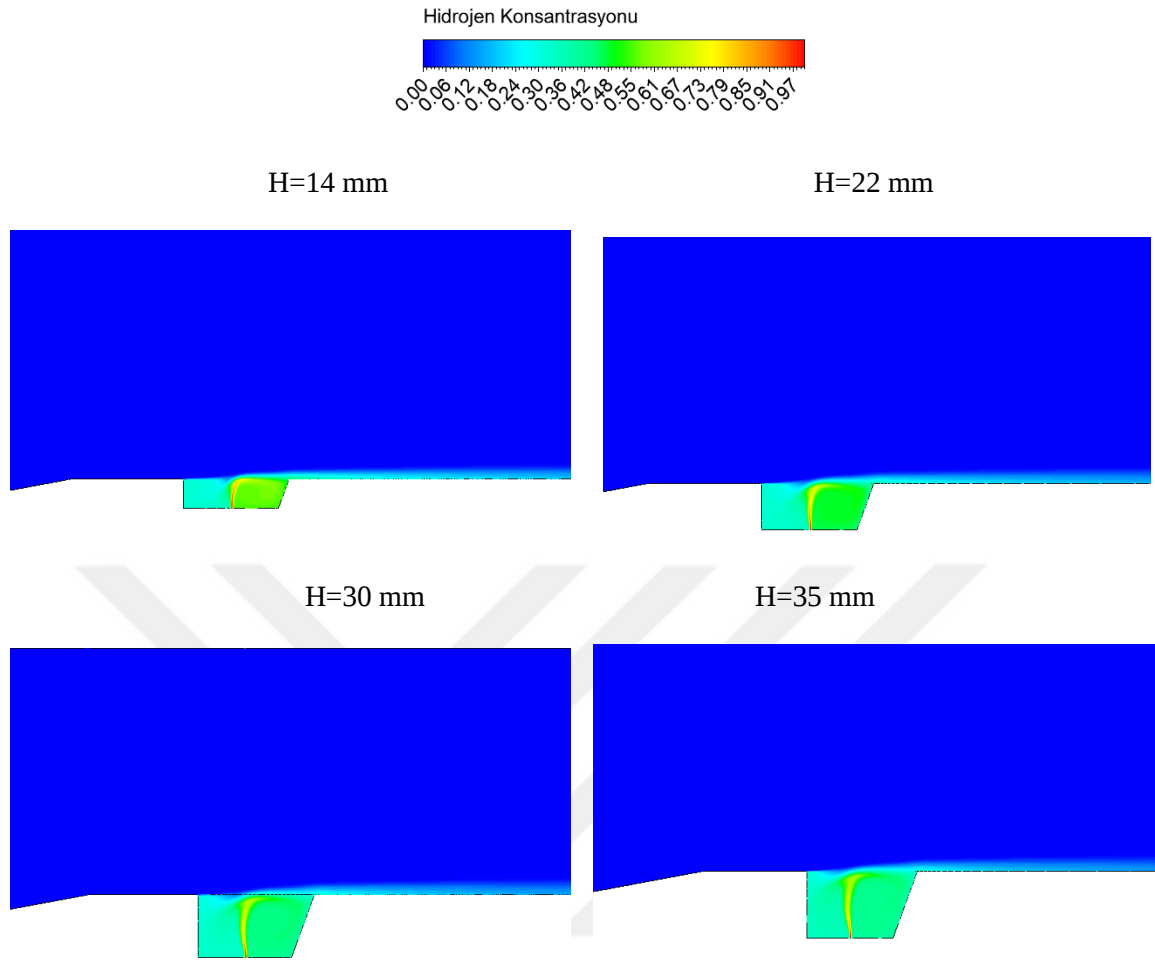
Şekil 4.6. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için akım çizgileri ve hız vektörleri ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9’da farklı derinlik ve arka duvar açlarına göre değişen alev tutucu içerisindeki hidrojen kütle konsantrasyonu dağılımları verilmiştir. Böylece yukarıda verilen hız dağılımı neticesinde oluşan hidrojen dağılımının gözlemlenebilmesi sağlanmıştır. Elde edilen bulgular hidrojen konsantrasyonu dağılımlarının hız dağılımında elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiğini ortaya koymuştur. Mavi renkten kırmızı renge doğru değişim hidrojen konsantrasyonunun artışı simgelemektedir. Düşük derinlik değerinde ($H=14$ mm) hidrojenin alev tutucunun yakıt püskürtme noktasına göre sağ tarafında yoğunlaştığı (turkuaz ve yeşil bölge ayrımı), yüksek derinlik değerinde ($H=35$ mm) ise tüm alev tutucu içerisinde daha homojen bir hidrojen dağılımının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, arka bölge açısının $\alpha=50^\circ$ değerine düşürülmesi ile hidrojen konsantrasyonunun tüm alev tutucu içerisinde daha homojen şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Şekil 4.7’de

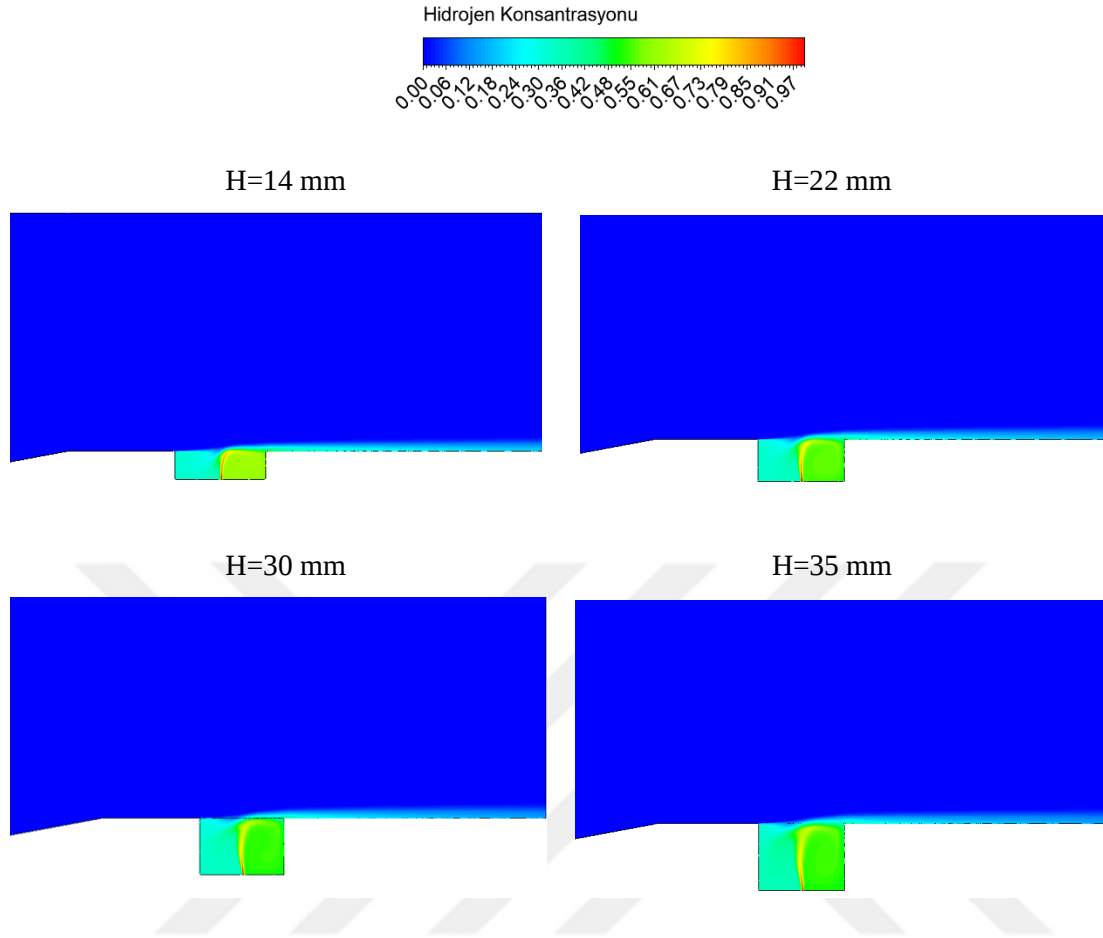
görüldüğü gibi tüm alev tutucu bölgesindeki konturlar turkuaz renge yakındır ve yaklaşık olarak 0,36 değerinde hidrojen konsantrasyonu elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)

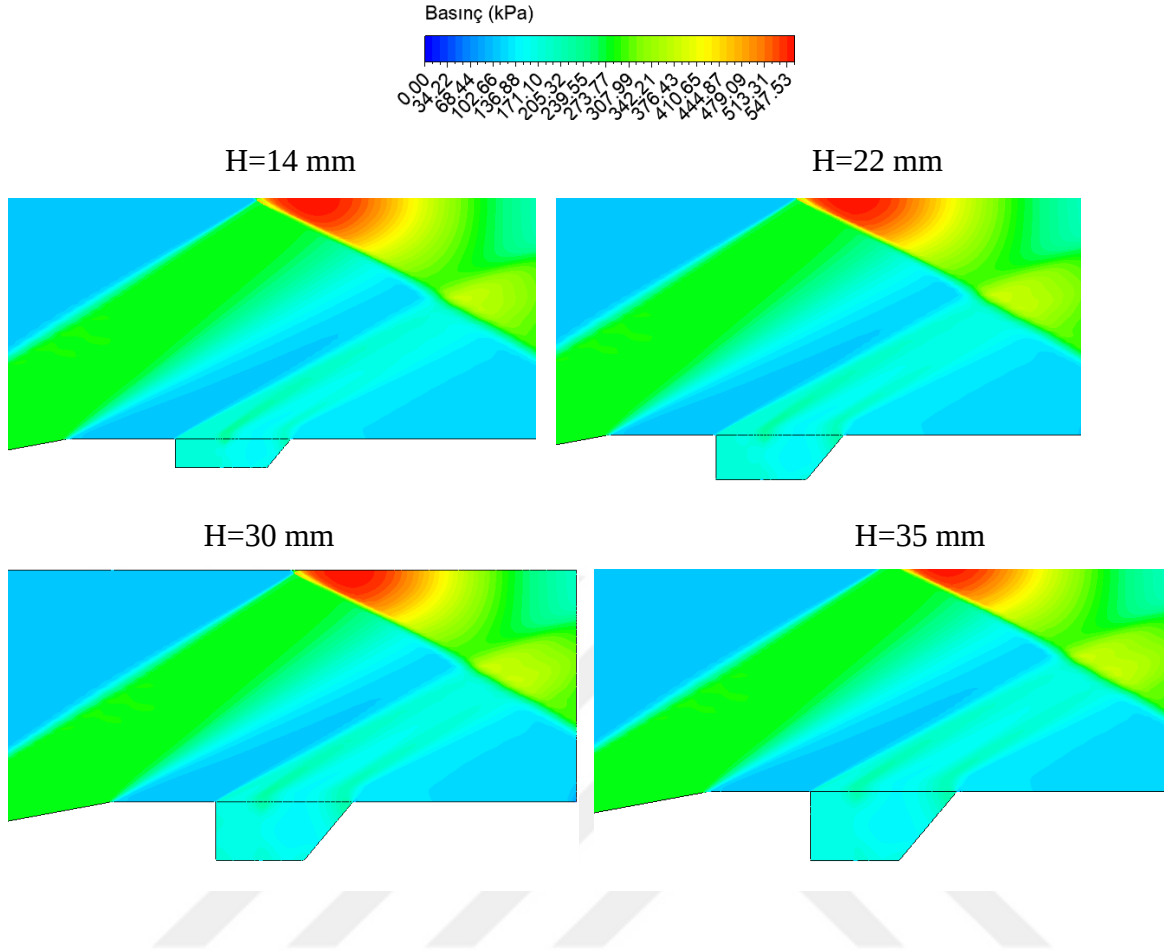


Şekil 4.8. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)

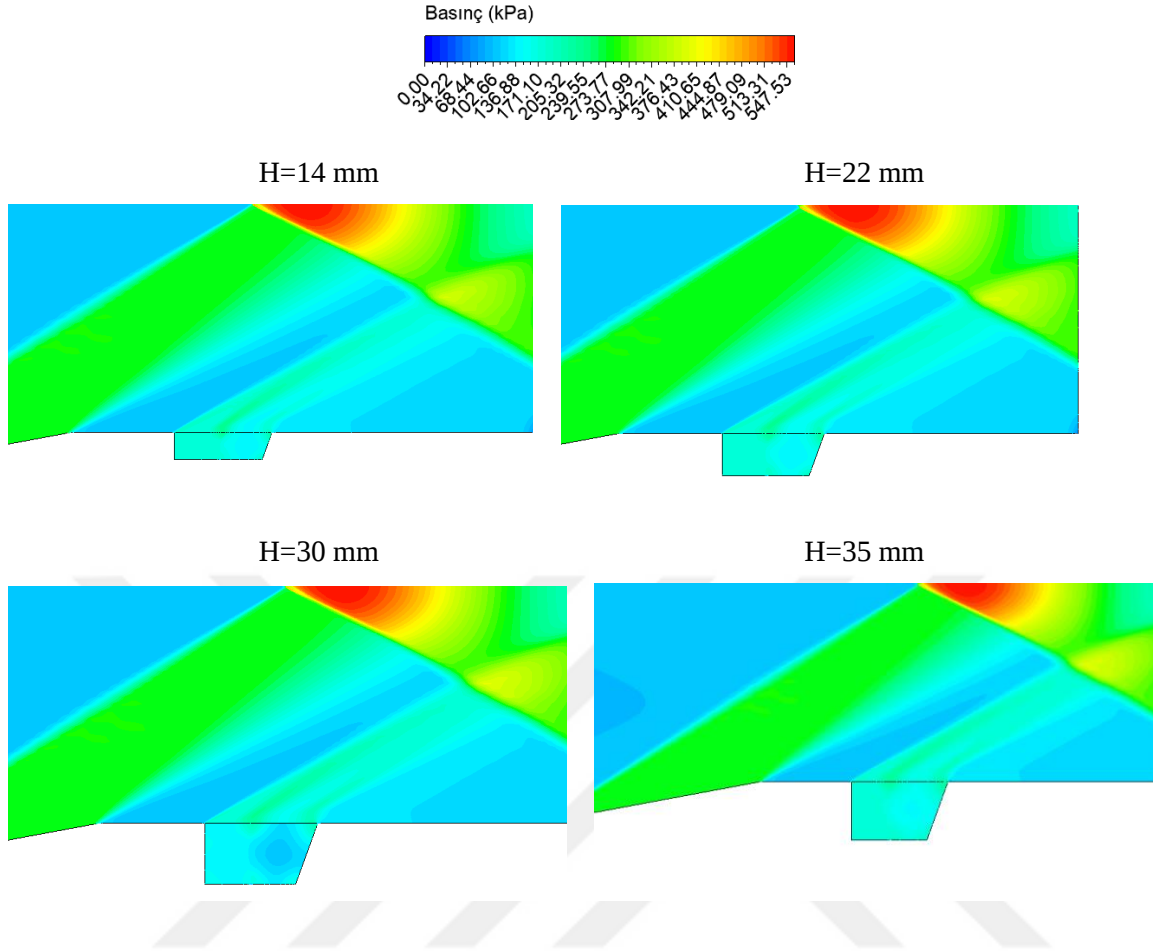


Şekil 4.9. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

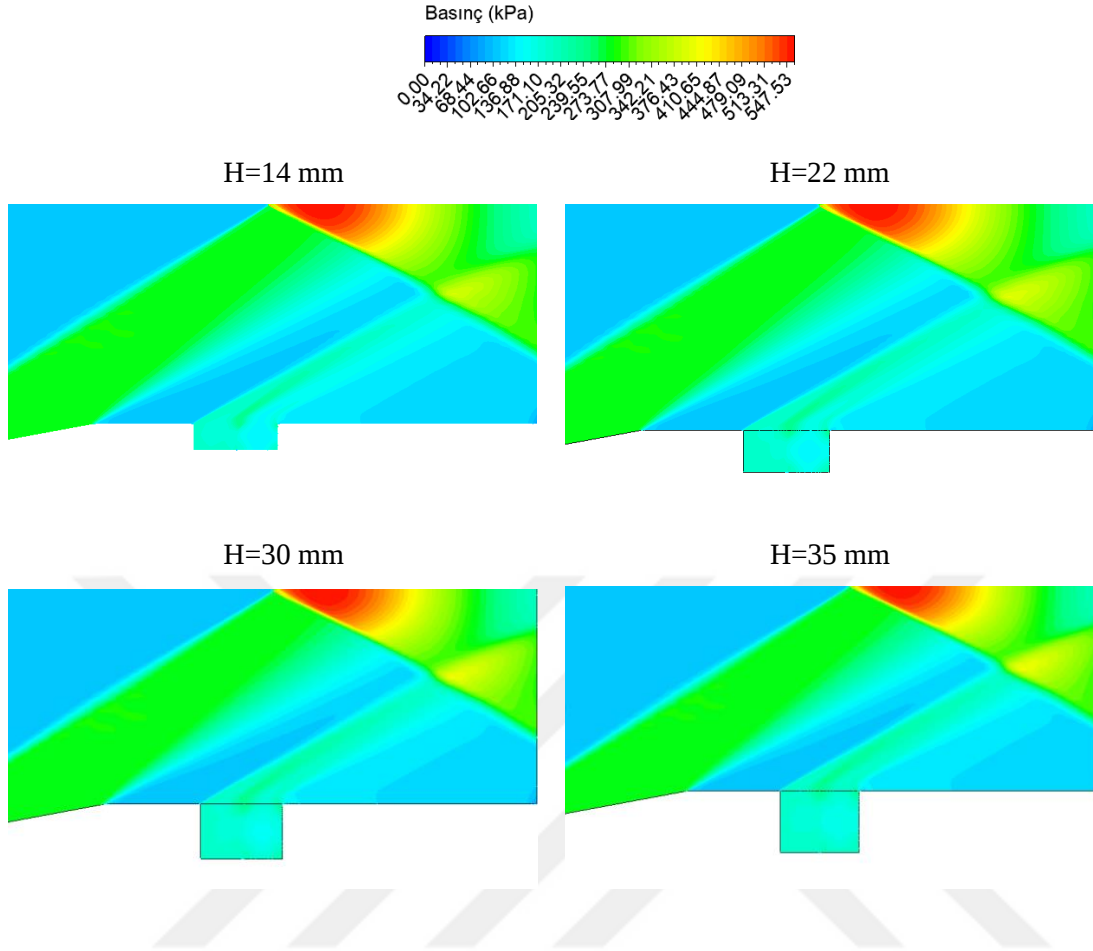
Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12’de görüldüğü gibi tüm arka duvar açıları için derinlik değişimi sonucu ana akım ve alev tutucu bölgelerindeki basınç gradyanları birbirine benzer karakteristik özellikler sergilemiştir. Sistemdeki en yüksek basınç yansıyan şok dalgası arkasında meydana gelmiştir ve yaklaşık değeri 548 kPa’dır. Alev tutucular içerisinde derinliğe bağlı basınç değişimleri arasındaki fark ihmal edilebilir seviyede kalmıştır. Fakat arka duvar açısının değişimi alev tutucu içerisindeki basınç dağılımını belirli ölçüde etkilemiştir. Arka duvar açısının $\alpha=50^\circ$ değerinde alev tutucu içerisinde ortalama 171 kPa basınç meydana gelirken $\alpha=90^\circ$ ’de bu ortalama değer 205 kPa basınca yükselmiştir. Böylece düşük arka duvar açısında ana akım bölgesi ve alev tutucu arasındaki basınç farkı artmıştır. Basınç gradyanındaki artış alev tutucu bölgesine daha fazla havanın vakumlandığının bir göstergesidir.



Şekil 4.10. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)

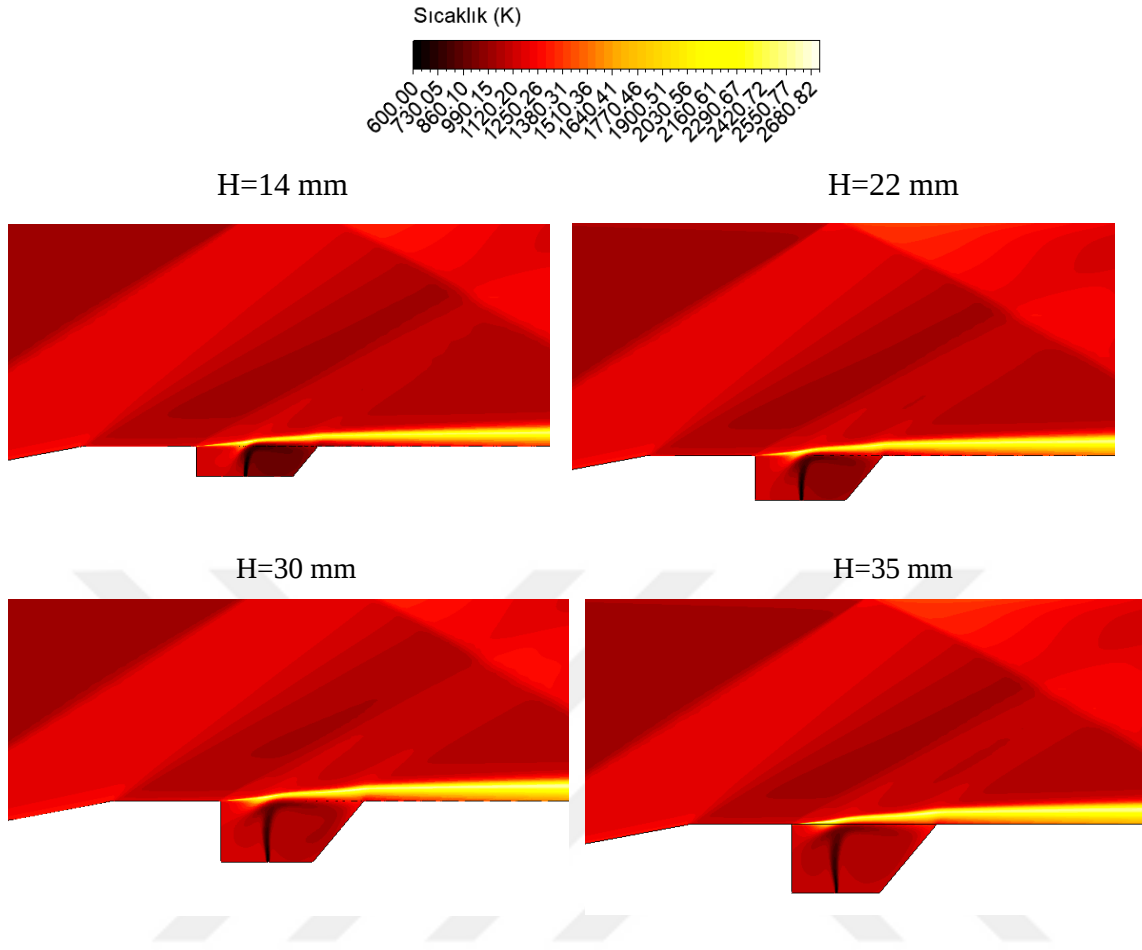


Şekil 4.11. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)

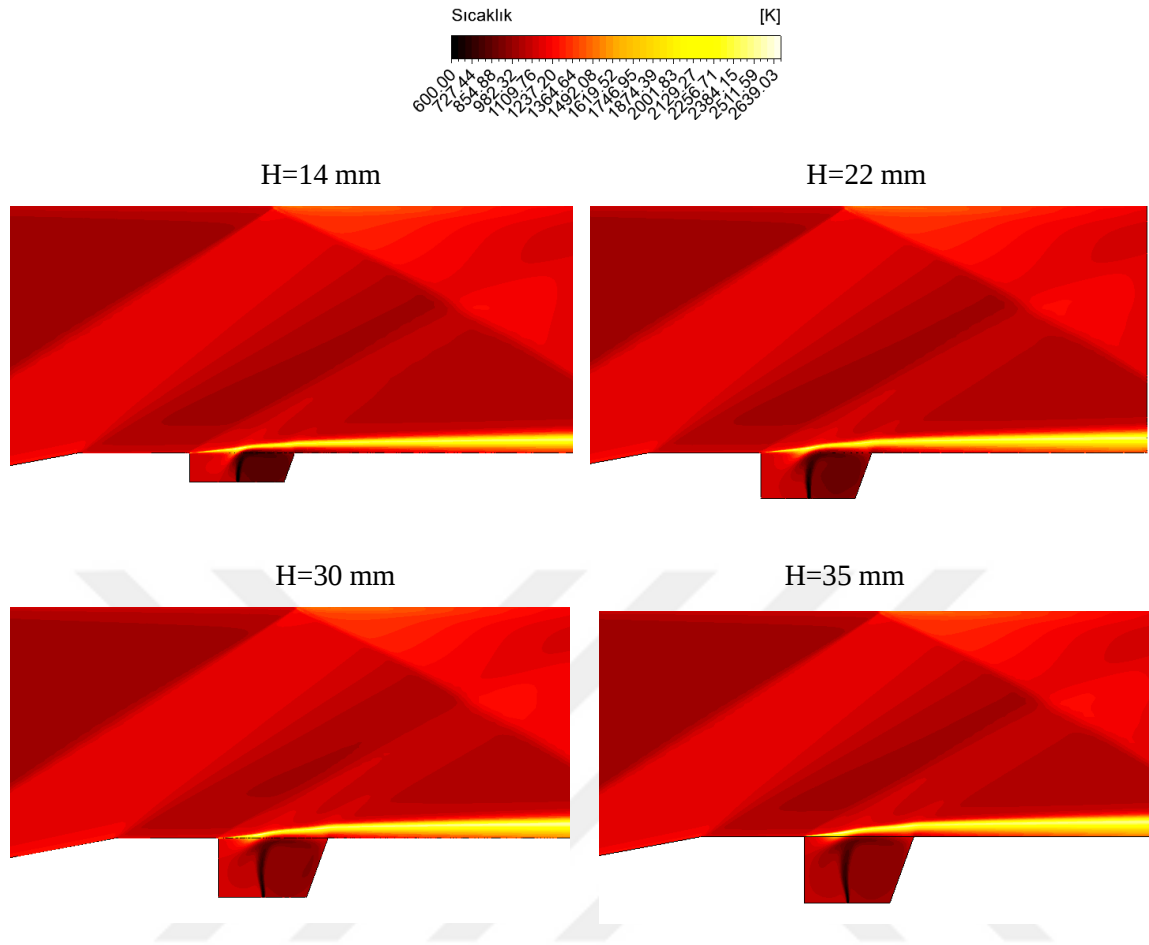


Şekil 4.12. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

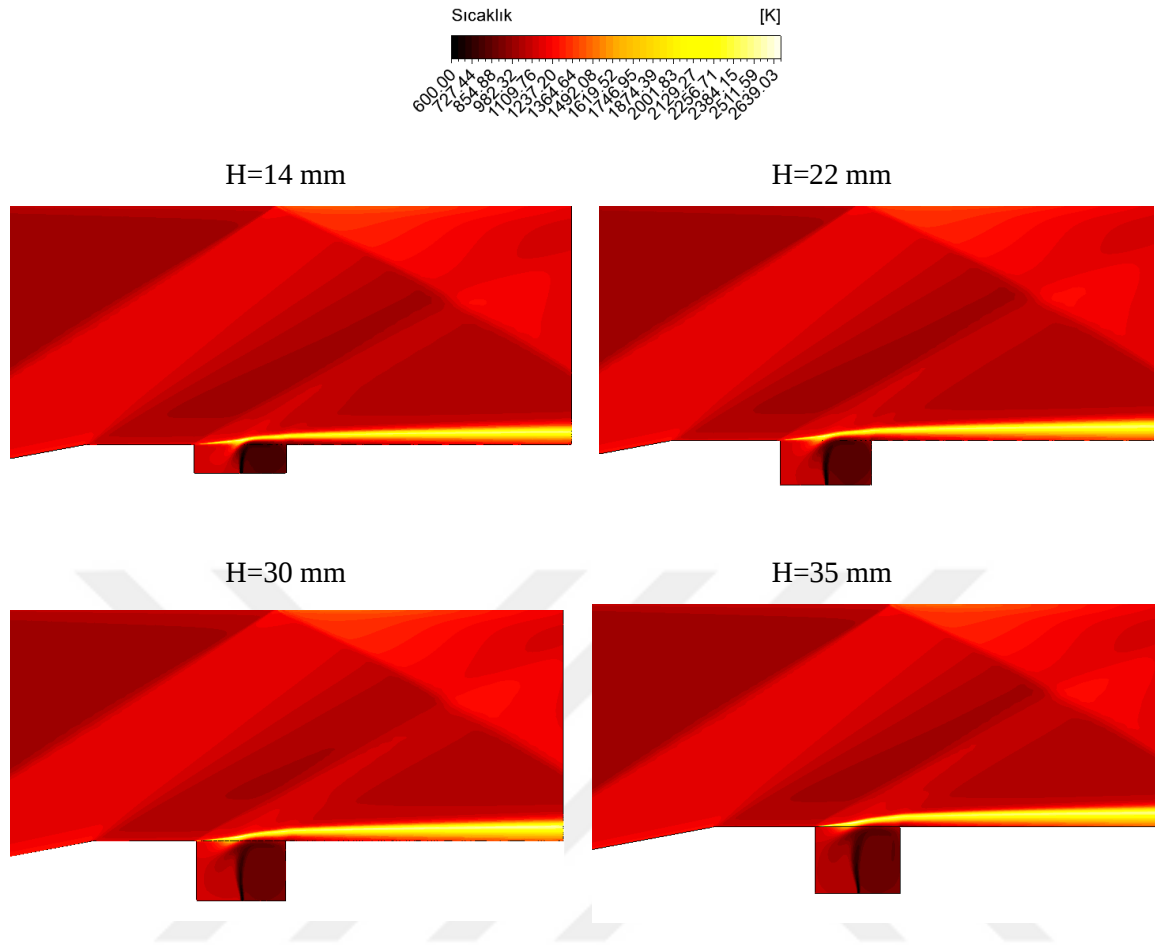
Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'te farklı derinlik değerlerine bağlı olarak oluşan sıcaklık konturları verilmiştir. Alev tutucular dışındaki ana akım bölgelerinde sıcaklık dağılımının tüm derinlik ve arka duvar açısı değerleri için benzer olduğu görülmektedir. Sarı renkli yanma reaksiyonunun gerçekleştiği bölgelerde tüm parametrelerin değişimi için 2700 K civarında sıcaklık oluşmuştur. Alev tutucu bölgeleri incelendiğinde ise $\alpha=50^\circ$ ve $\alpha=70^\circ$ değerleri için $H=14$ mm ve 22 mm'de alev tutucunun eğik kenarının olduğu tarafta sıcaklıkların diğer derinlik değerlerine göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. $H=30$ mm ve 35 mm için ise alev tutucu içerisinde daha uniform bir sıcaklık dağılımı meydana gelmiştir. Bu durum derinlik artışı ile alev tutucunun her bölgesinde daha yoğun ve uniform vorteks oluşması ve daha fazla hidrojenin yakılmasının bir sonucudur. Arka duvar açısının $\alpha=90^\circ$ değerinde ise durum farklıdır. Tüm derinlik değerlerinde alev tutucu içerisinde yüksek sıcaklık farkları meydana gelmiştir. Alev tutucudaki sıcaklık farkının artışı malzemede iç gerilmelere ve hasara yol açabilecek bir fiziksel olgudur.



Şekil 4.13. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)



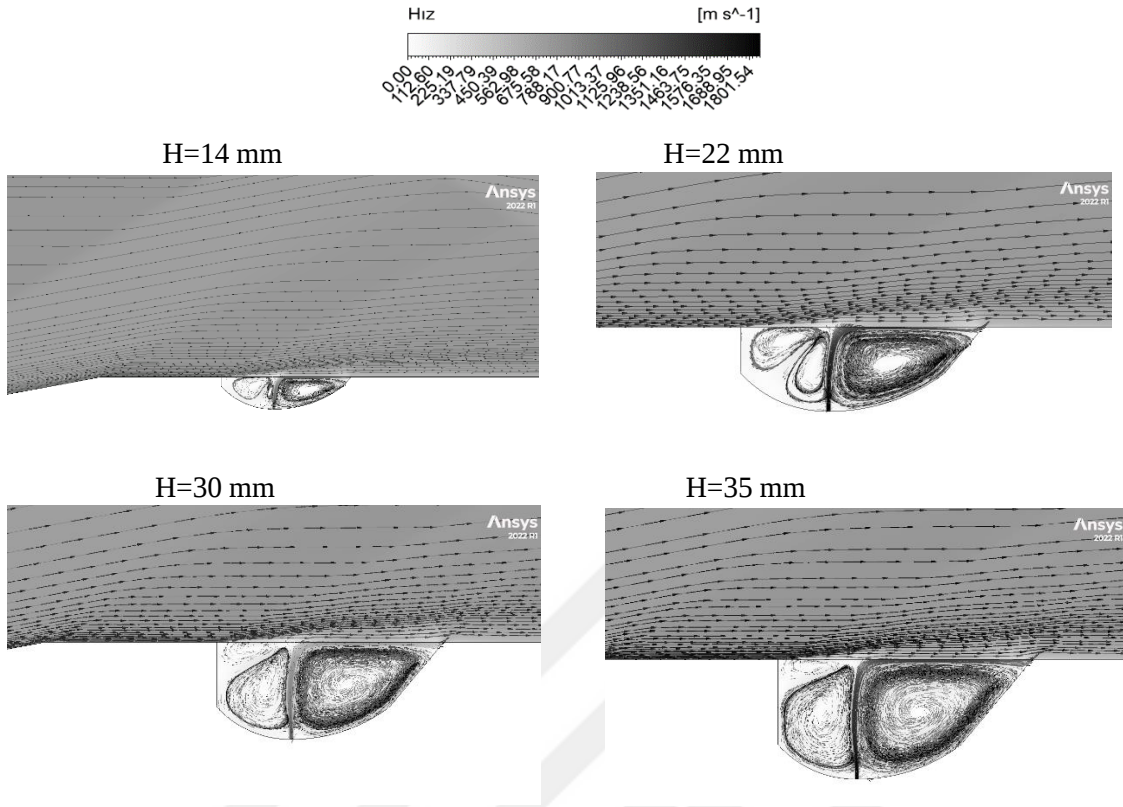
Şekil 4.14. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2.5$)



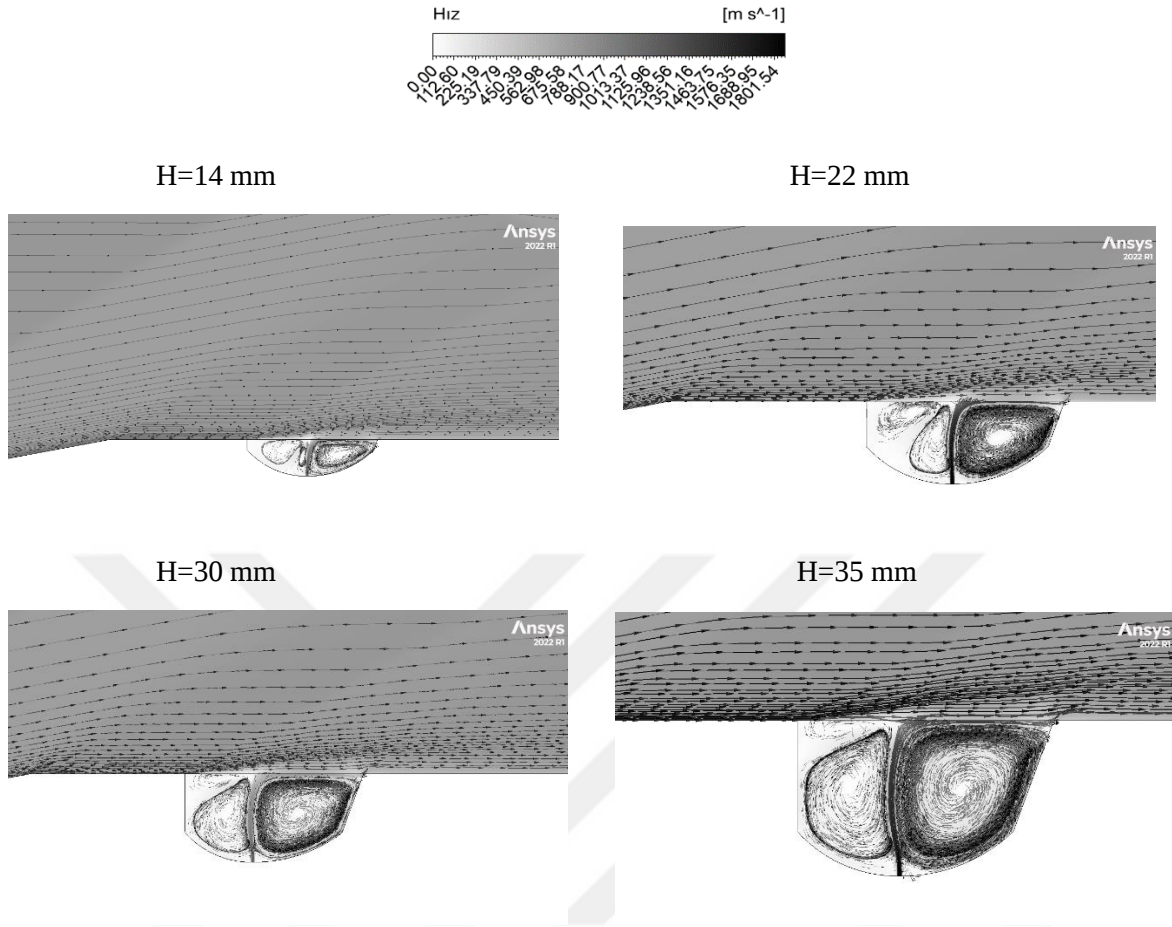
Şekil 4.15. Farklı yamuk geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

4.2.2. Yamuk+daire alev tutucu geometrisi

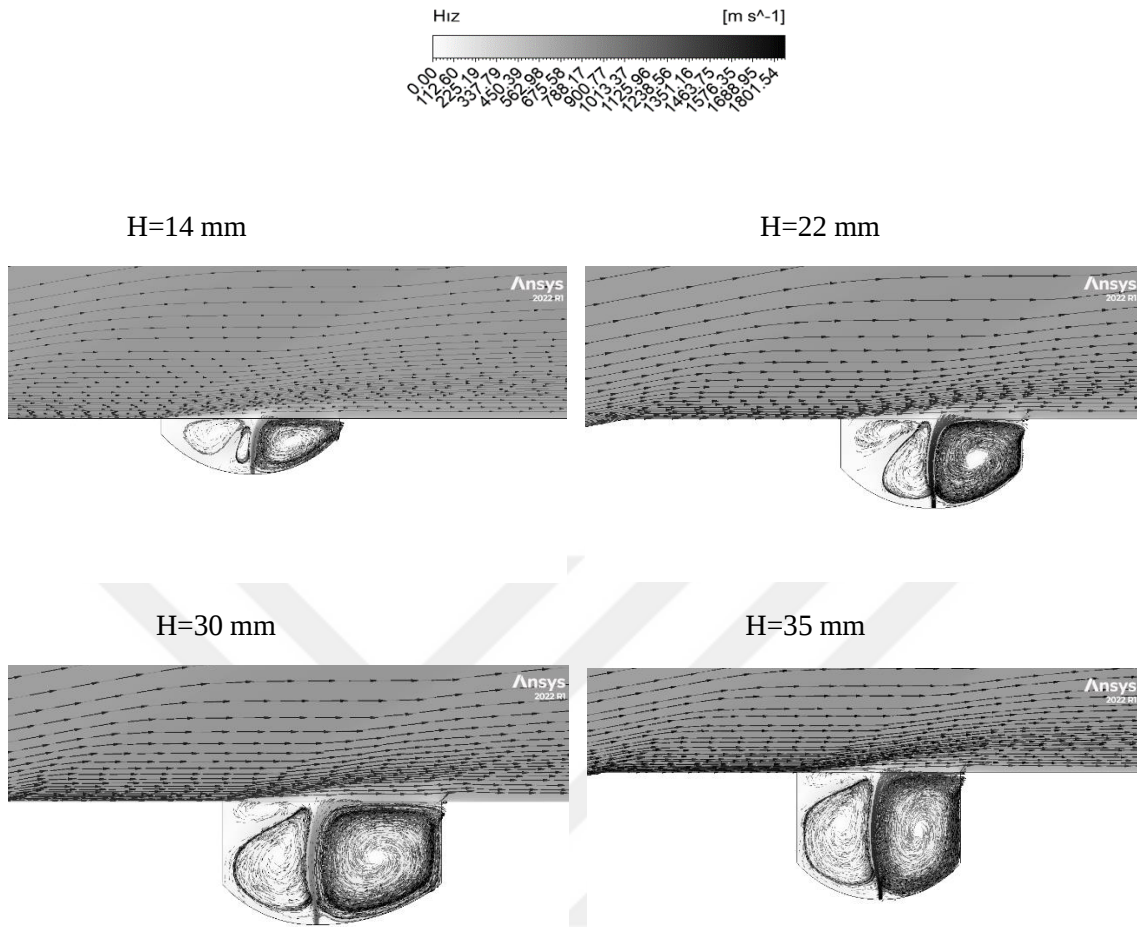
Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18’de yamuk+daire geometrik kombinasyonunda meydana gelen akım çizgileri ve hız vektörleri verilmiştir. Alt kenarın daire şekilli tasarlanması ile alev tutucu tabanındaki hava akışının yönünün değiştirilerek vorteks oluşumunun artırılması hedeflenmiştir. Yamuk geometride olduğu gibi derinliğin $H=14$ mm’den $H=35$ mm’ye çıkarılması ve arka duvar açısının $\alpha=90^\circ$ ’dan $\alpha=50^\circ$ ’ye düşürülmesi ile alev tutucu içerisinde hem daha yoğun hem de daha uniform dağılımlı vorteks oluşumu elde edilmiştir.



Şekil 4.16. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı (L=45 mm, $\alpha=50^\circ$, Ma=2,5)

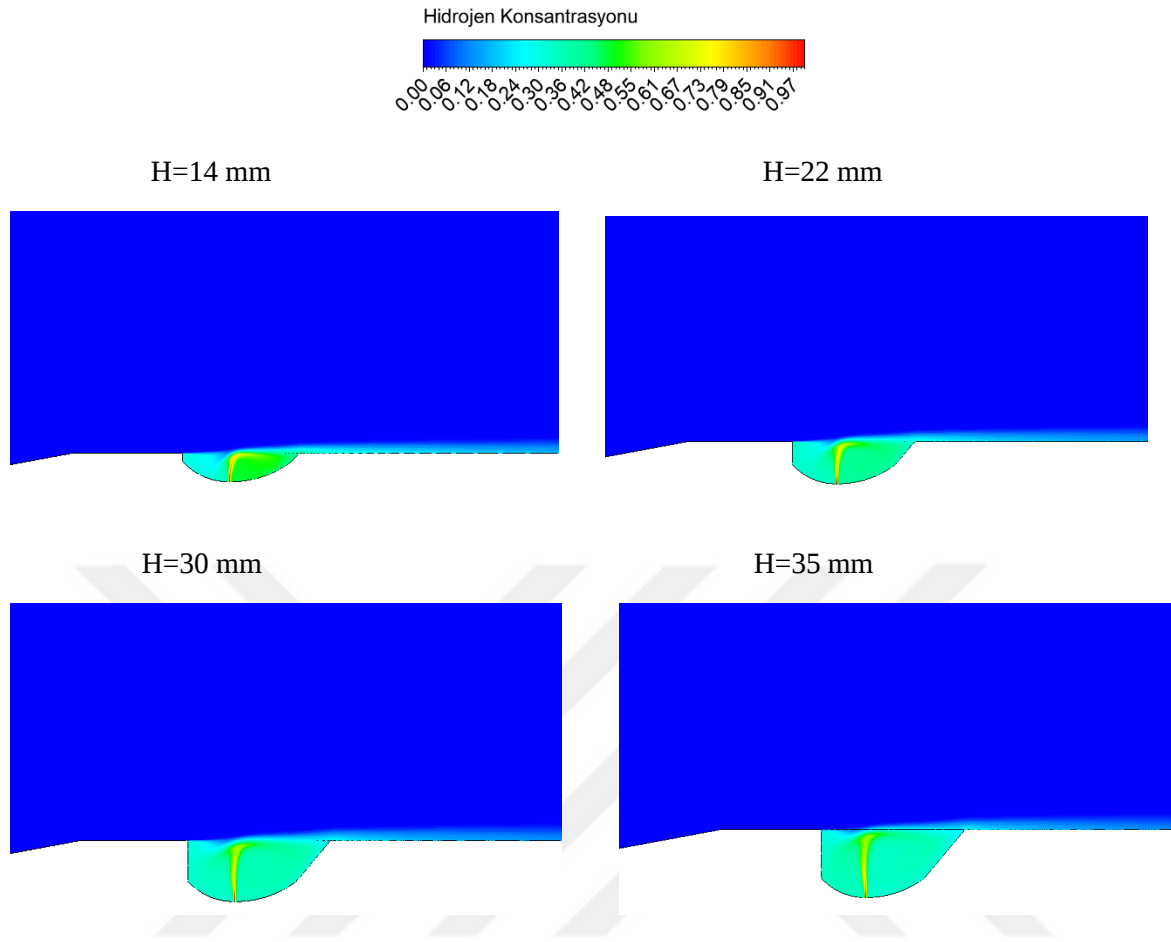


Şekil 4.17. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)

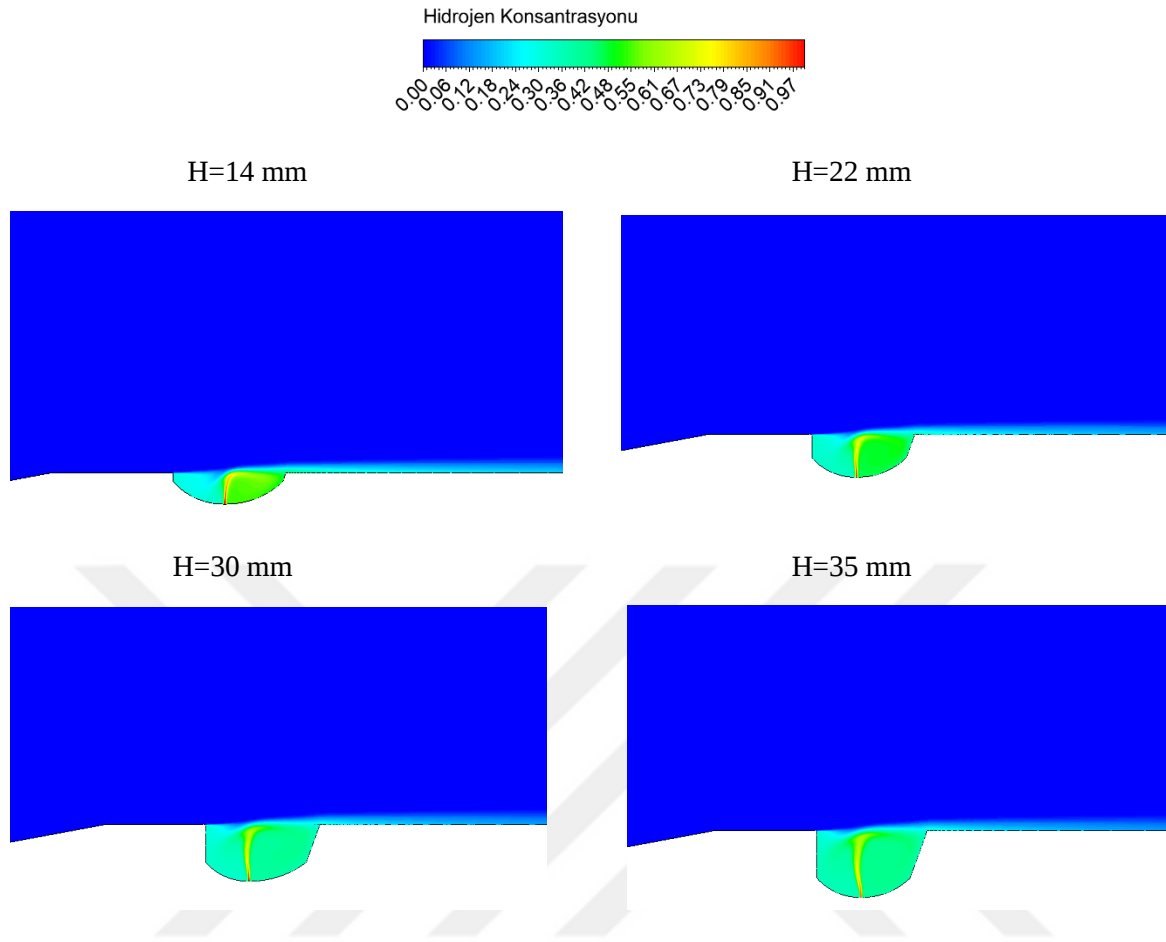


Şekil 4.18. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

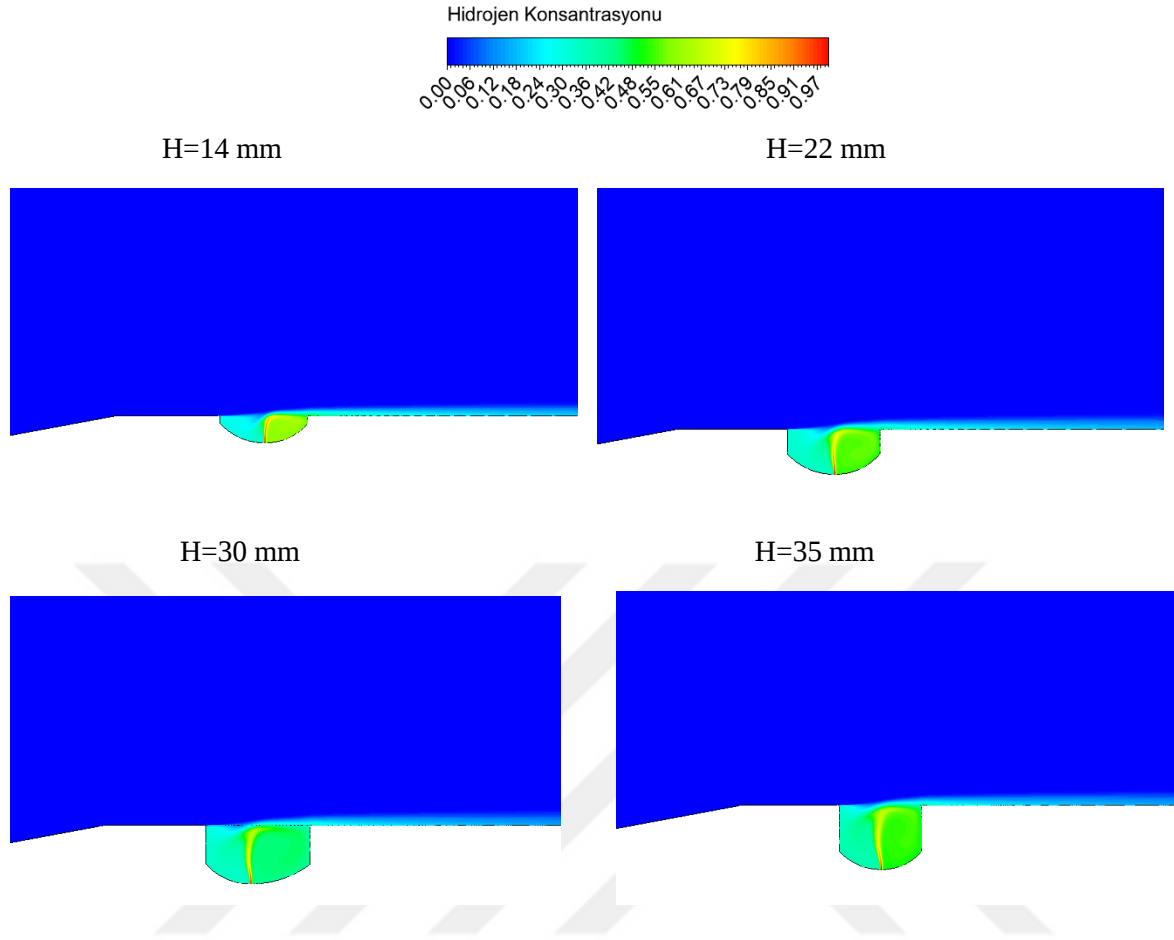
Yamuk+daire hibrit geometrisinin yamuk geometri ile karşılaştırılabilmesi için derinlik ve arka duvar açısına bağlı oluşan hidrojen kütle konsantrasyon dağılımlarının incelenmesi gereklidir (Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21). En homojen hidrojen konsantrasyonu dağılımı, en yoğun ve en homojen vorteks oluşumunun meydana geldiği $H=35$ mm ve $\alpha=50^\circ$ için elde edilmiştir. $H=35$ mm ve $\alpha=50^\circ$ değerleri için alev tutucu içerisinde hidrojen püskürtme noktasının her iki yanındaki hidrojen konsantrasyonu yaklaşık 0,38 olarak elde edilmiştir. Bu değer yamuk geometriye göre daha yüksektir.



Şekil 4.19. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)

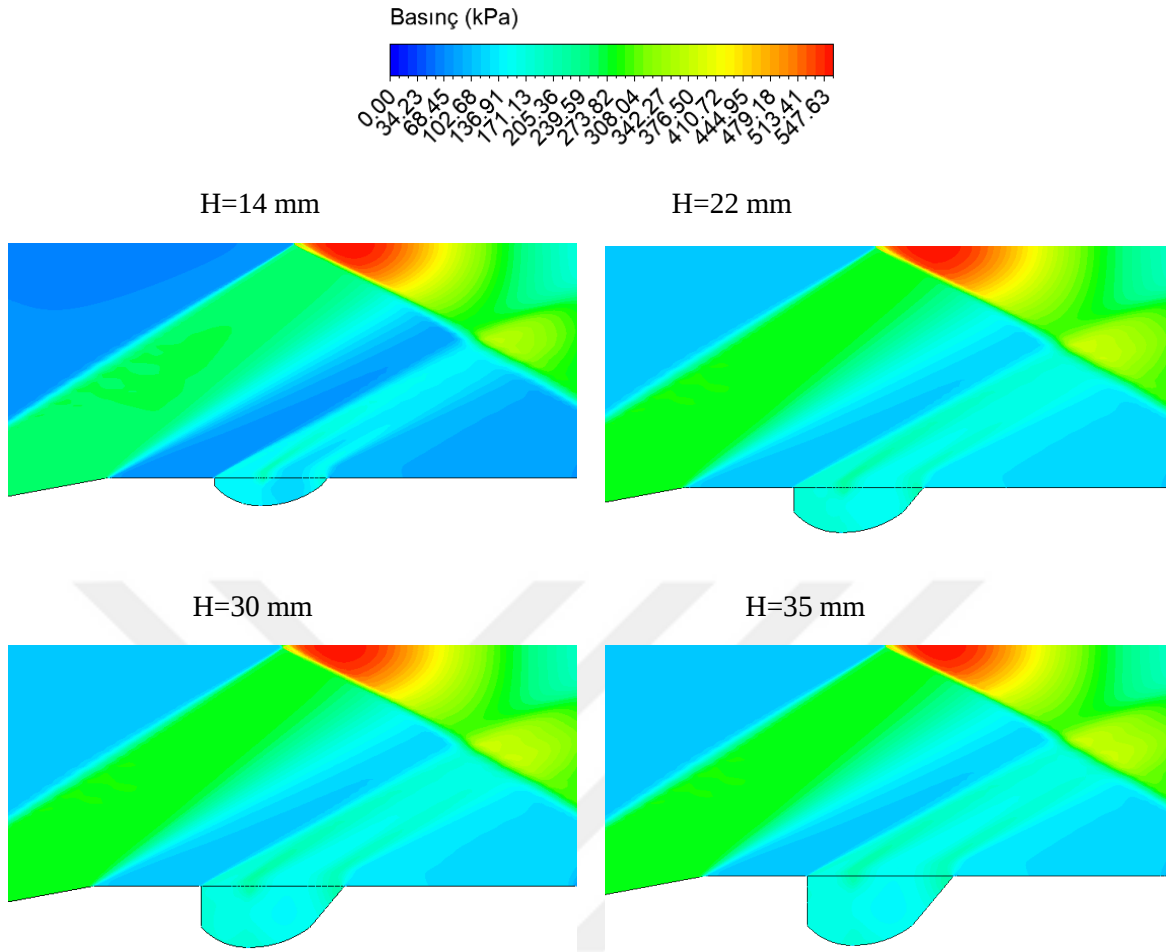


Şekil 4.20. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)

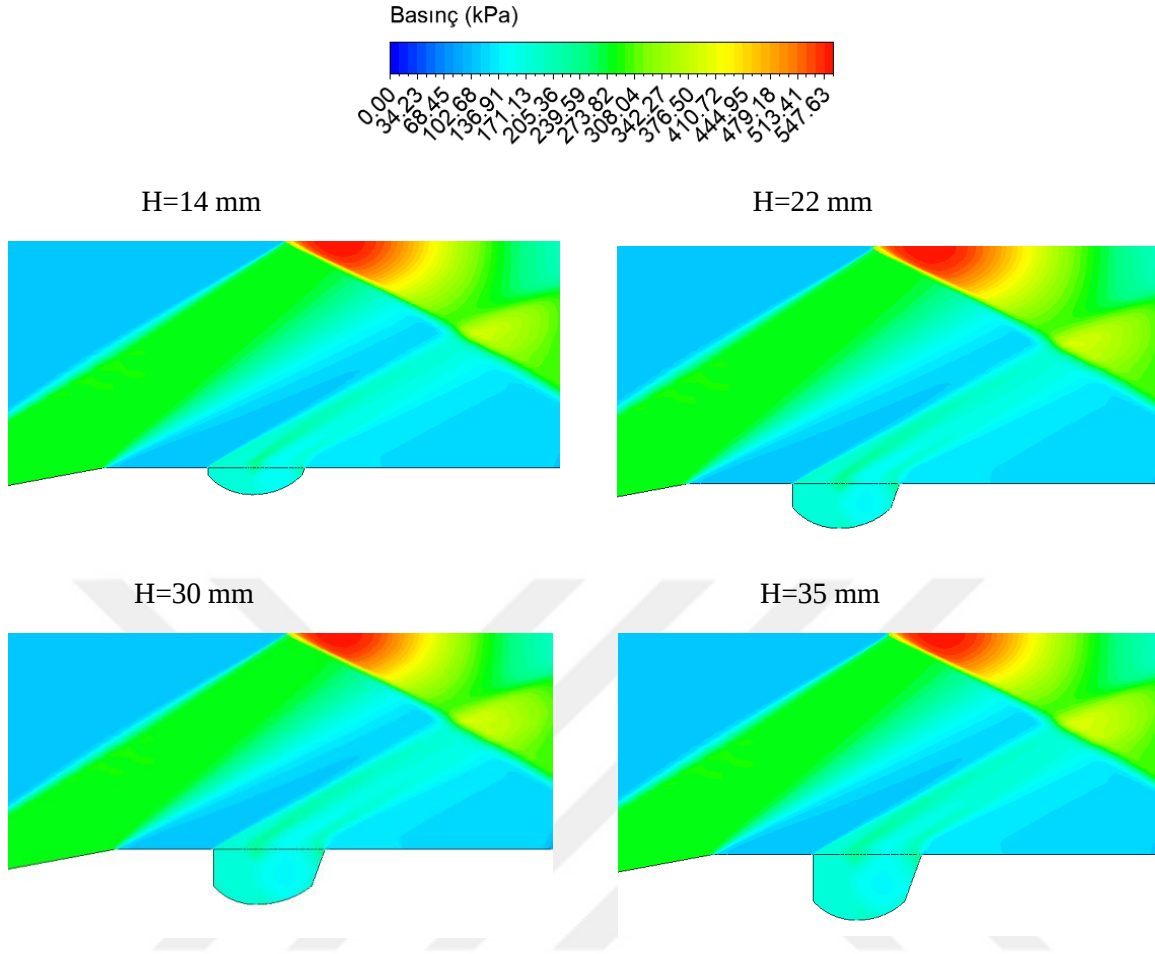


Şekil 4.21. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

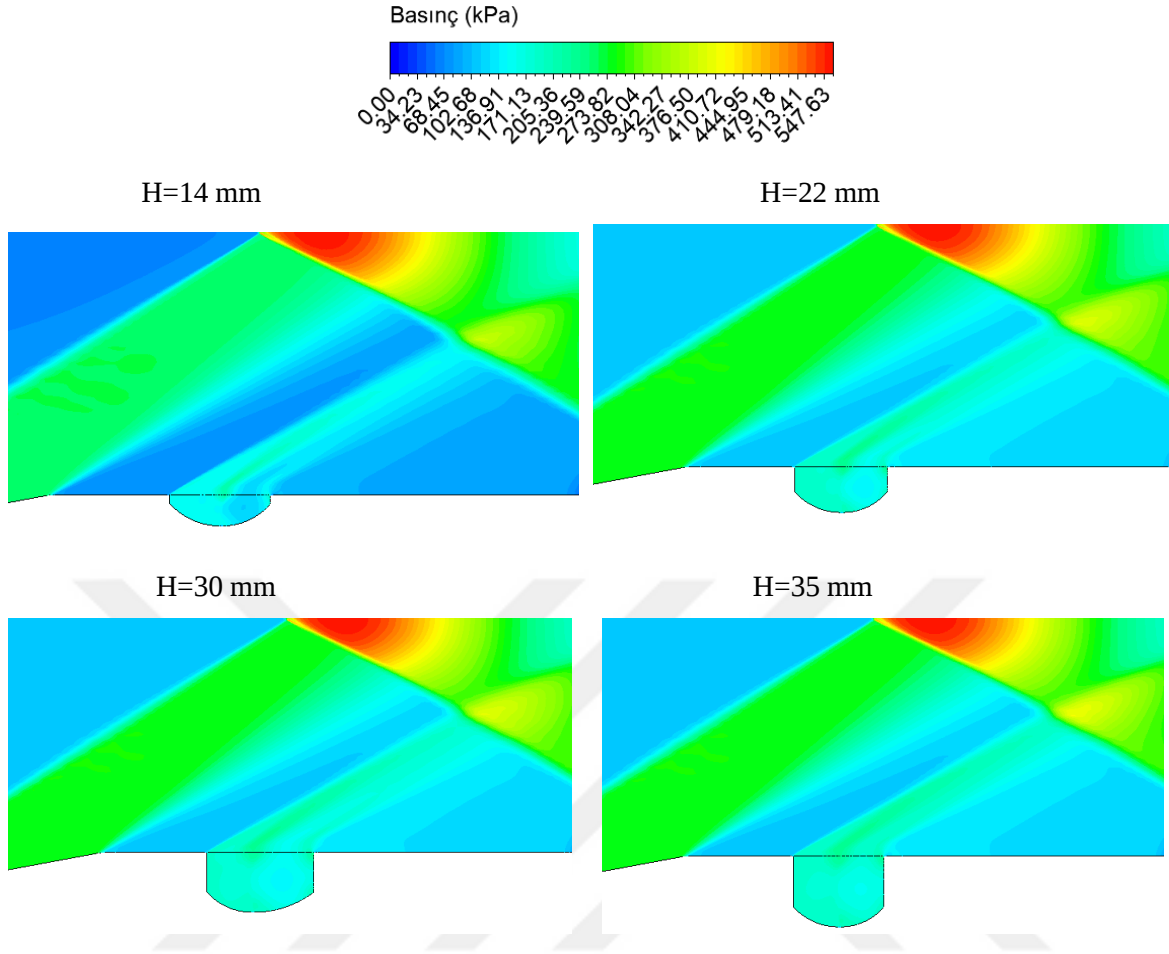
Yamuk+daire hibrit geometrisi için alev tutucudaki basınç dağılımları incelendiğinde tüm arka duvar açısı değerlerinde $H=22$ mm, $H=30$ mm ve $H=35$ mm değerleri için birbirine yakın basınç gradyanları elde edilirken $H=14$ mm değeri için daha düşük basınç değerleri oluşmuştur (Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24). Bu durumun $H=14$ mm derinlik için homojen olmayan vorteks dağılımından kaynaklandığı öngörülmektedir. Arka duvara yakın bölgelerdeki basınç ile ana akım bölgesindeki basınç arasındaki fark diğer derinliklerdekilere göre oldukça yüksek çıkmış ve bu basınç farkı nedeni ile ana akım bölgesinden gelen hava arka duvara yakın bölgede vakumlanmıştır.



Şekil 4.22. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)

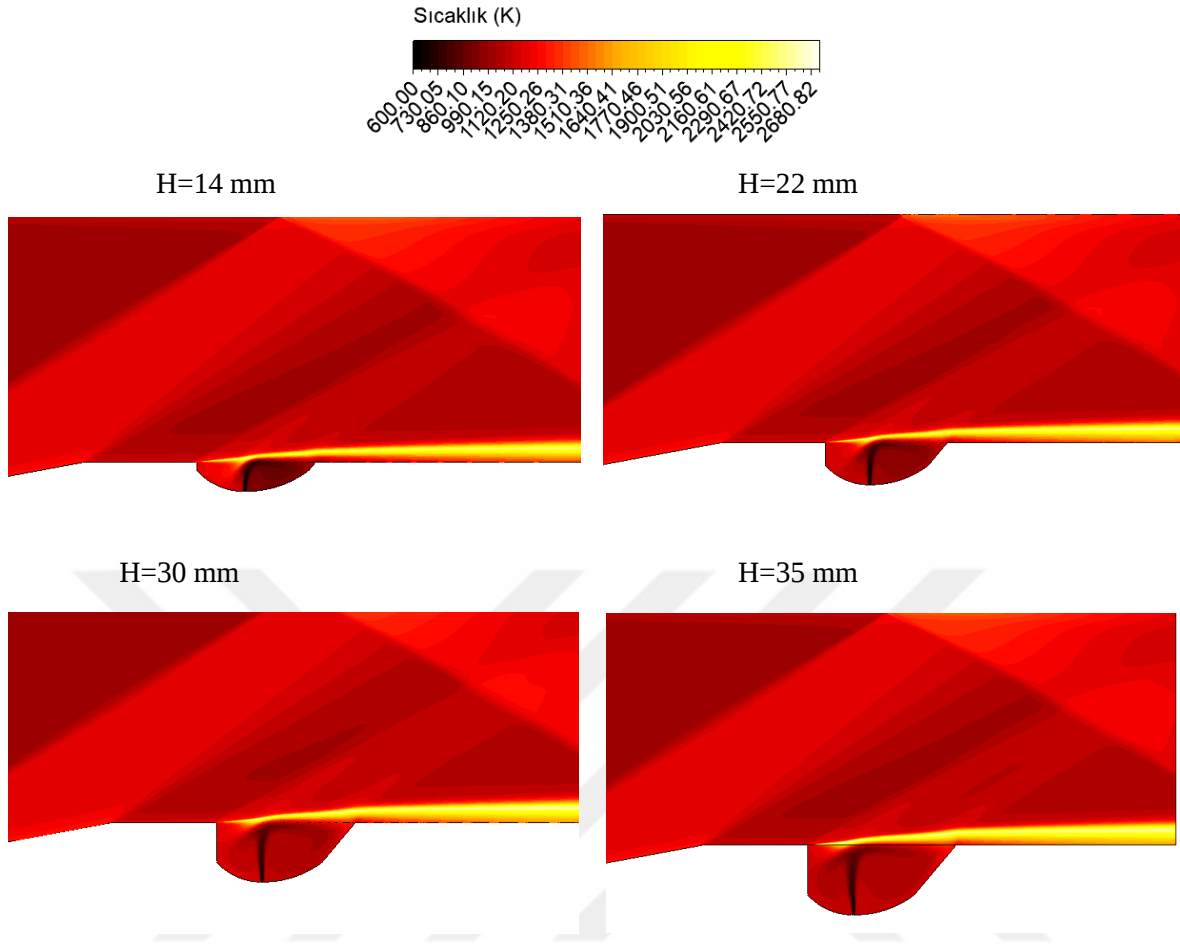


Şekil 4.23. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)

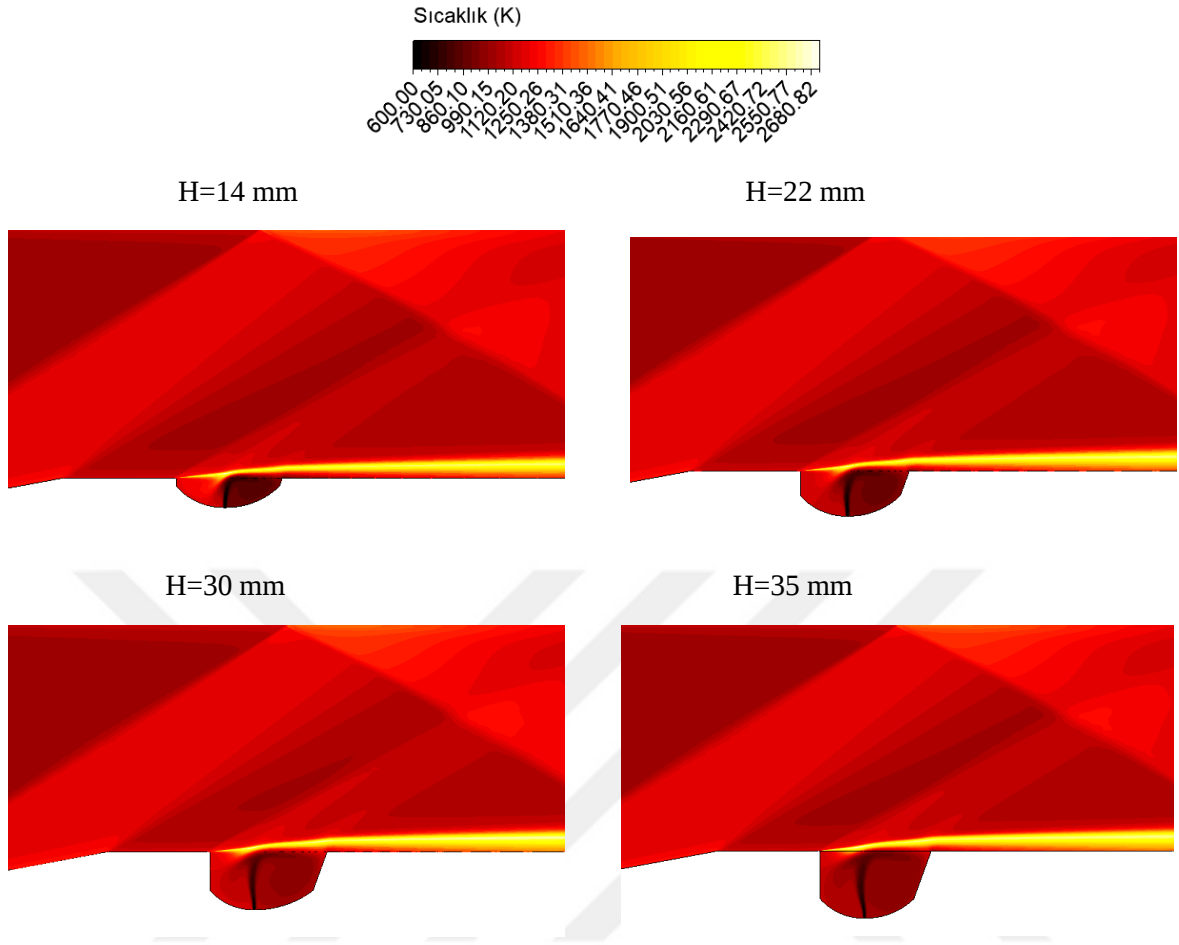


Şekil 4.24. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

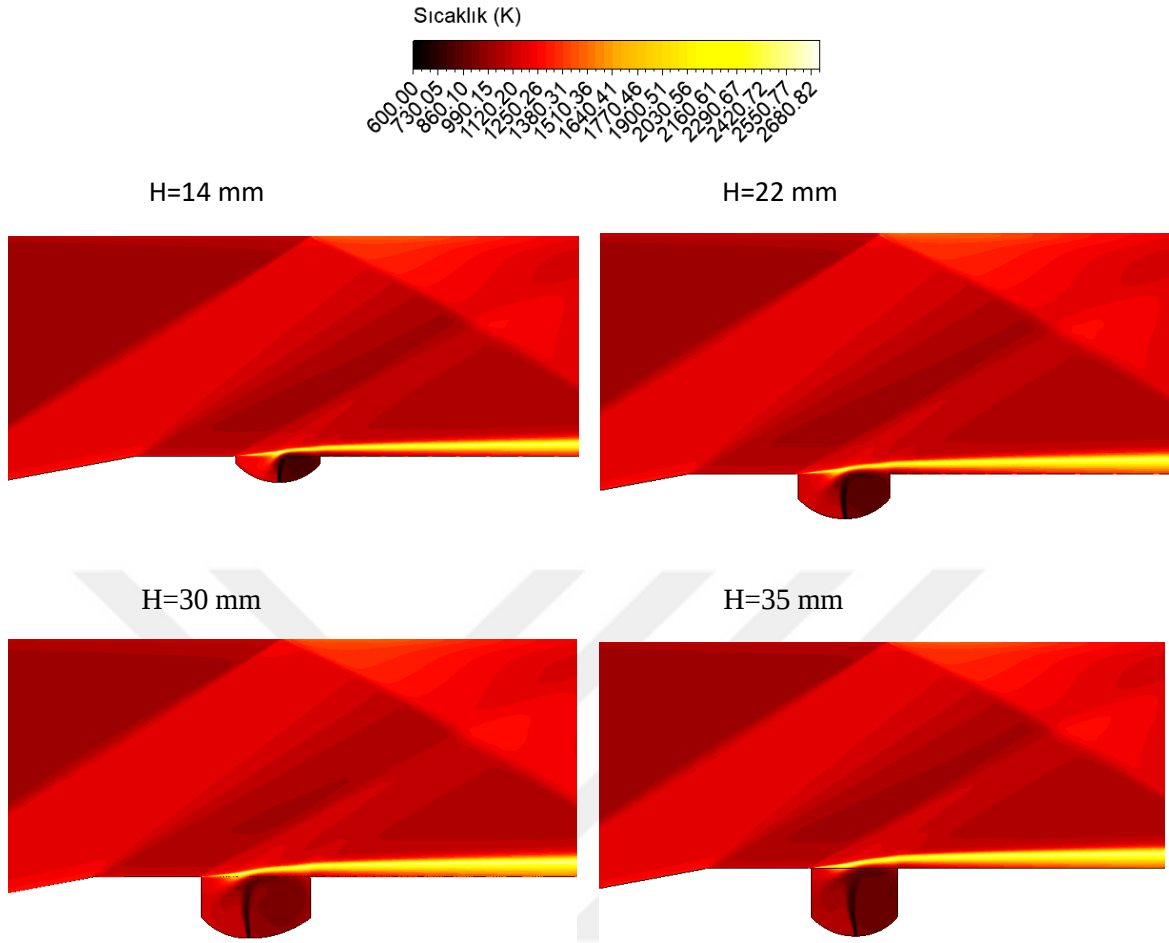
Şekil 4.25, 4.26 ve 4.27’de görüldüğü gibi yanma reaksiyonu sonucu yamuk+daire geometriye sahip alev tutuculu scramjet içerisinde oluşan maksimum sıcaklıklar yamuk geometrideki sıcaklık değerlerine oldukça yakındır. Arka yüzey açısının $\alpha=50^\circ$ değerinde derinlik artışı ile alev tutucu içerisindeki sıcaklık dağılımı daha uniform bir yapıya kavuşmuştur. Ancak, $\alpha=70^\circ$ ve $\alpha=90^\circ$ değerleri için derinlik artışıyla sıcaklık dağılımındaki homojenlik artmış olsa da $\alpha=50^\circ$ değerindeki göre uniform olmayan bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Bu durum yamuk+daire geometri için yüksek arka duvar açılarında malzemedeki sıcaklık farkından kaynaklı iç gerilmeleri ve iç gerilmeler neticesinde zamanla malzemede hasar oluşum hızını artırabilir.



Şekil 4.25. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)



Şekil 4.26. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)

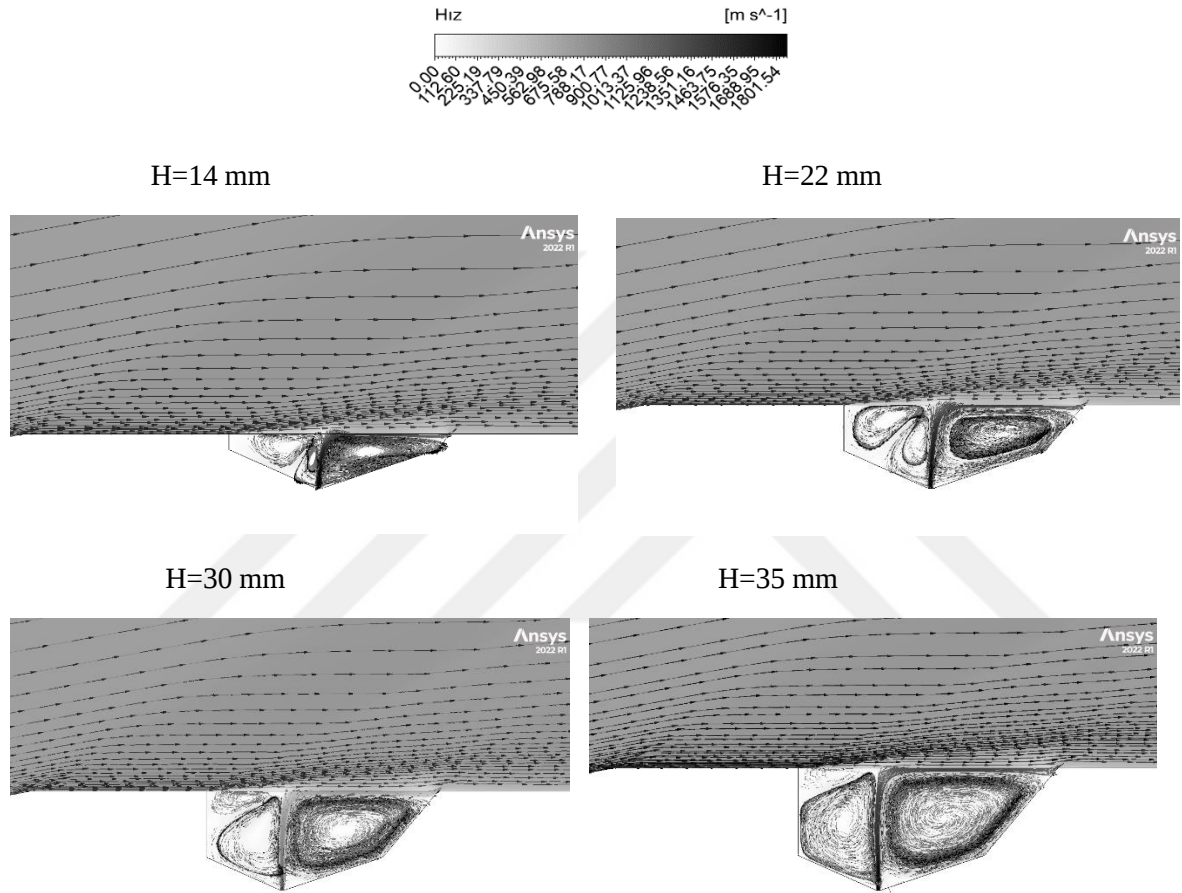


Şekil 4.27. Farklı yamuk + daire geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

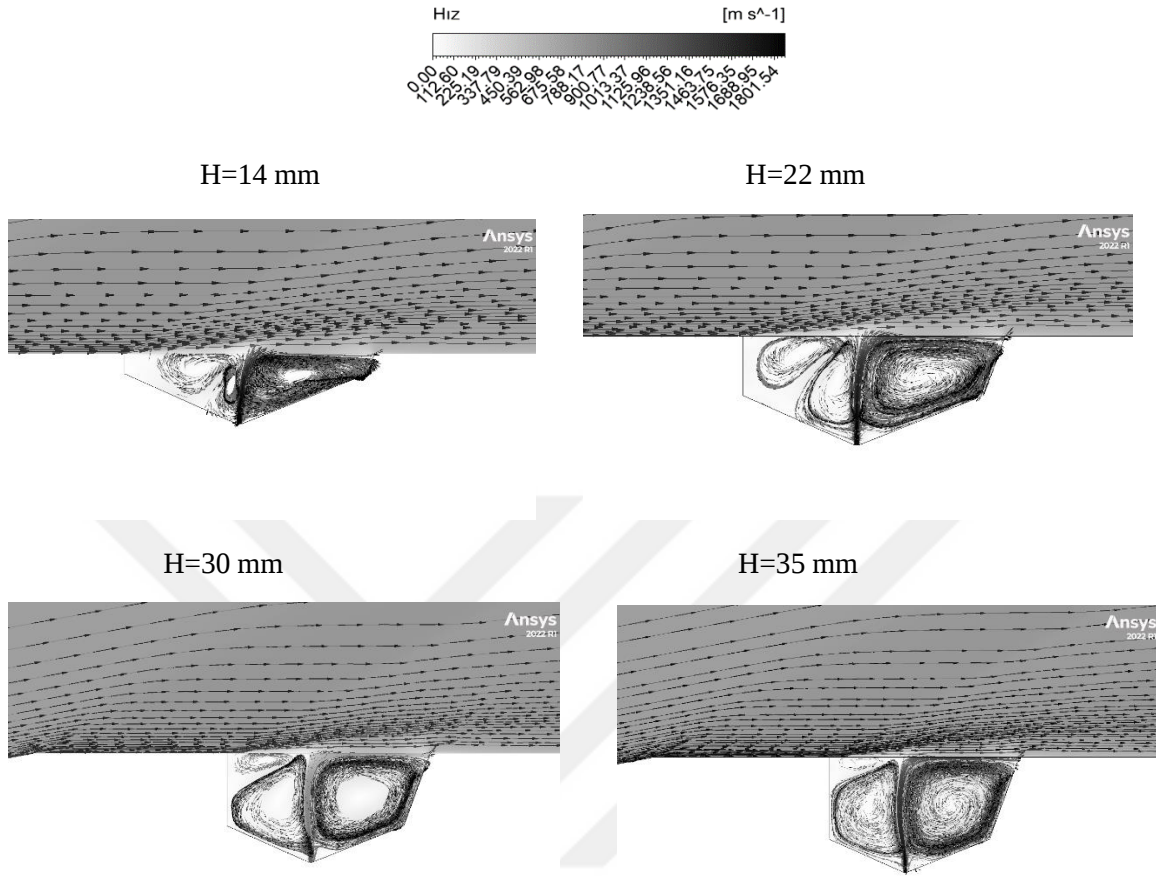
4.2.3. Yamuk+üçgen alev tutucu geometrisi

Parametrik analizlerde son olarak yamuk+üçgen hibrit geometrisinin yanma verimine etkileri incelenmiştir. Alev tutucunun taban yüzeyinin üçgen yapılması ile alev tutucuya giren havanın eğimli taban yüzeyleri sayesinde hidrojen enjeksiyonunun yapıldığı noktaya yönlendirilmesi ve hidrojen-hava karışımının artırılması hedeflenmiştir. Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30'da yamuk+üçgen geometrili alev tutucuda meydana gelen akım çizgileri ve hız vektörleri görülmektedir. Diğer alev tutucu geometrilerinde olduğu gibi derinlik artışı ve arka duvar açısının azalması vorteks oluşumlarını yoğun ve daha uniform hale getirmiştir. Hız vektörlerinden karşım homojenitesi açısından en uygun parametre değerlerinin diğer geometrilerde olduğu gibi $H=35$ mm derinlik ve $\alpha=50^\circ$ arka duvar açısı olduğu anlaşılmıştır. Üçgen taban yüzey sayesinde alev tutucu içerisinde daha çok sayıda eğimli yüzey ve keskin

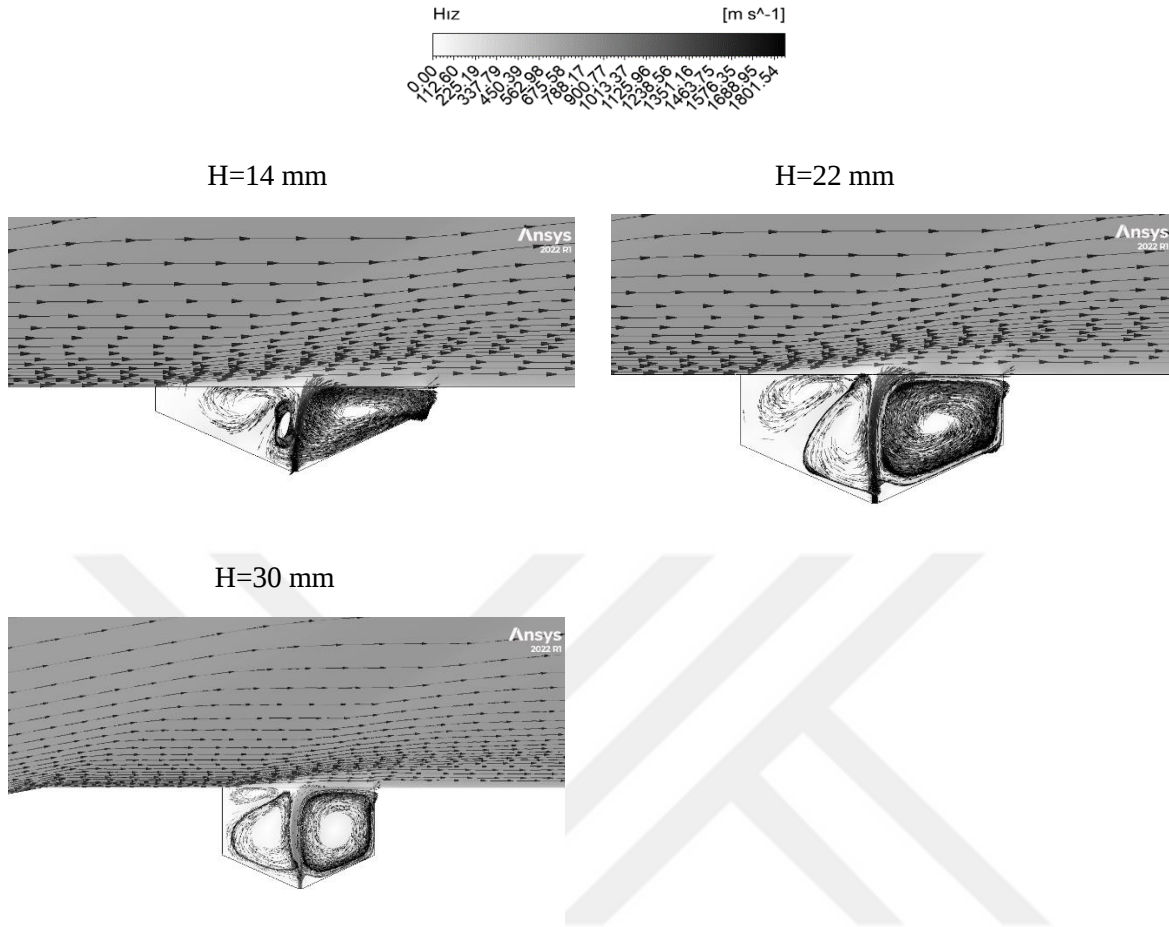
köşe oluşmuştur. Bu oluşumları içeren geometrik tasarım ile hem yamuk hem de yamuk+daire geometrilerine göre daha yoğun ve uniform vorteks oluşumu elde edilmiştir. Diğer geometrilerle arasındaki fark hidrojen kütle konsatrasyonu dağılımları incelendiğinde daha net olarak anlaşılabilmektedir.



Şekil 4.28. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45 \text{ mm}$, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)

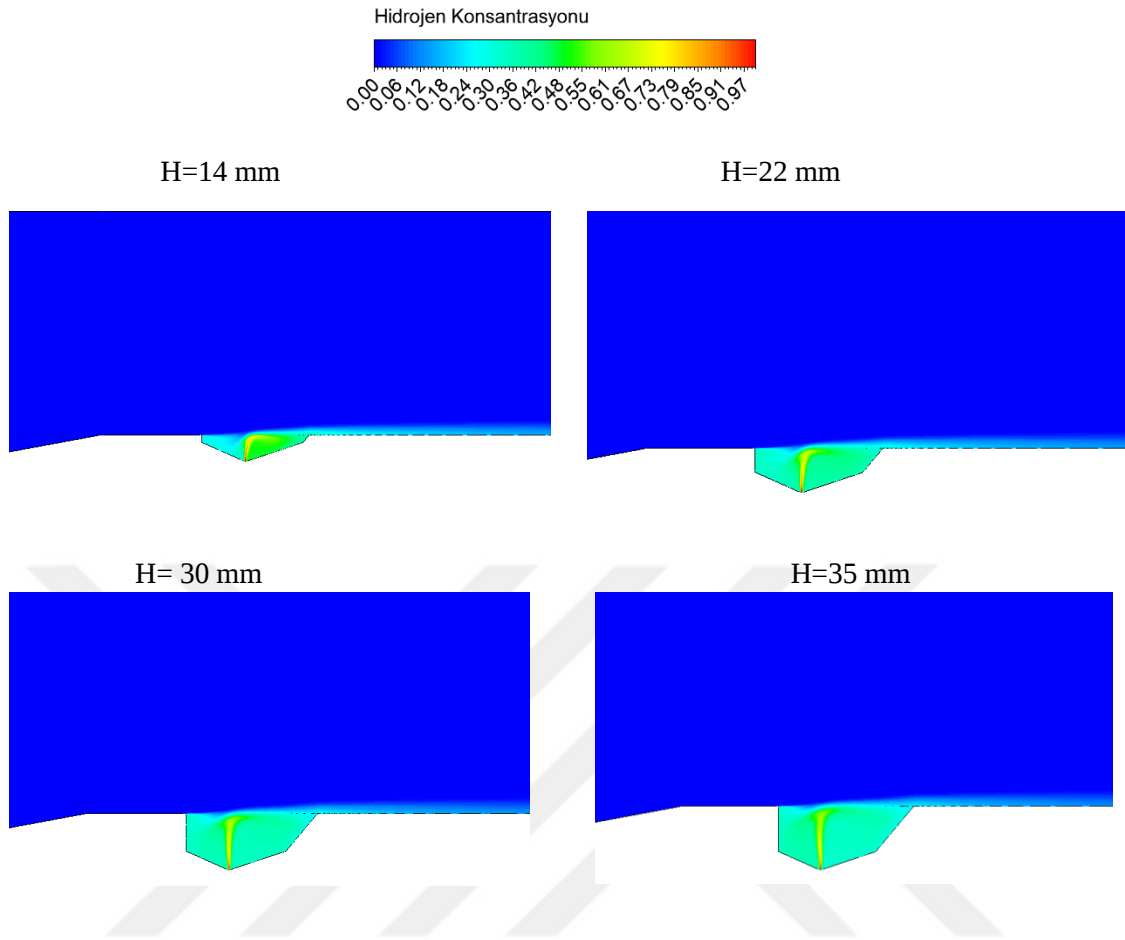


Şekil 4.29. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)

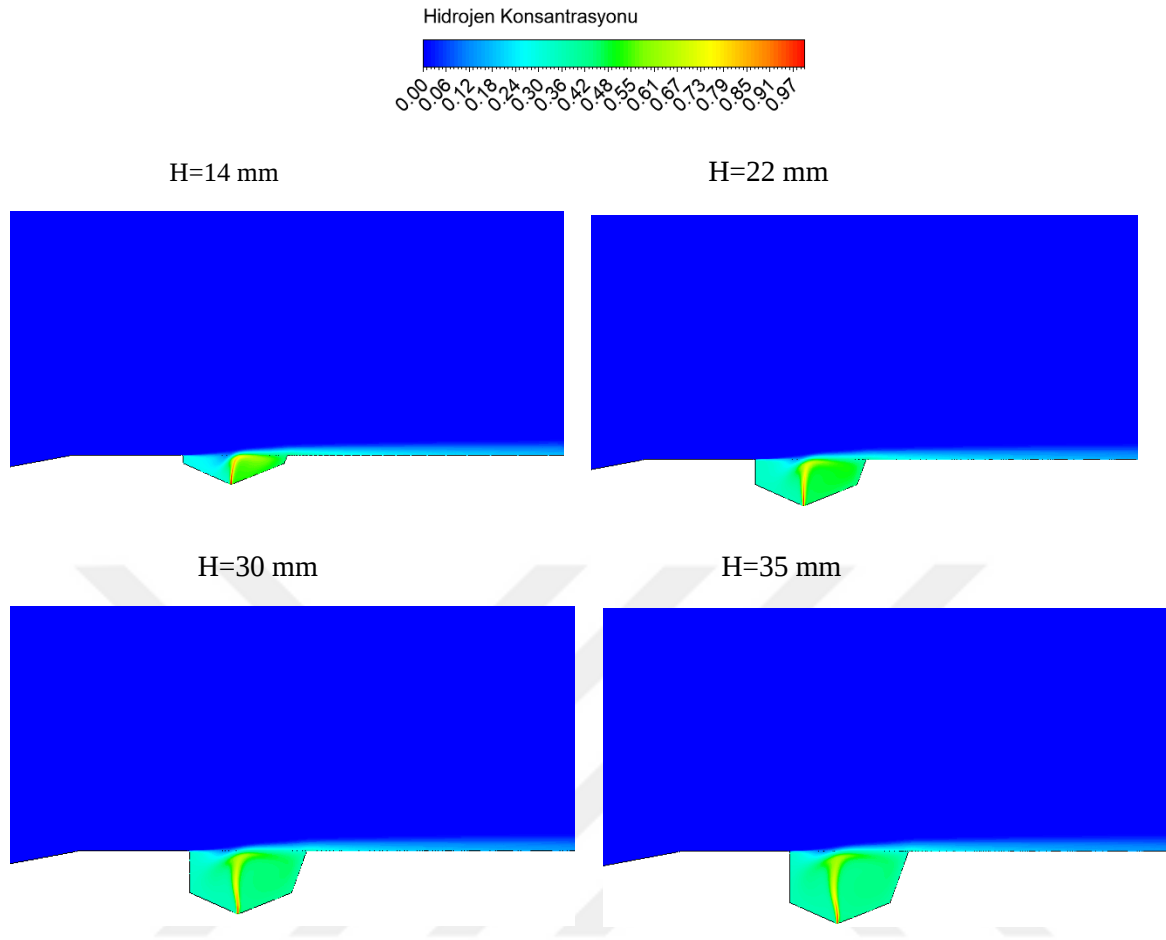


Şekil 4.30. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hız vektörü dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

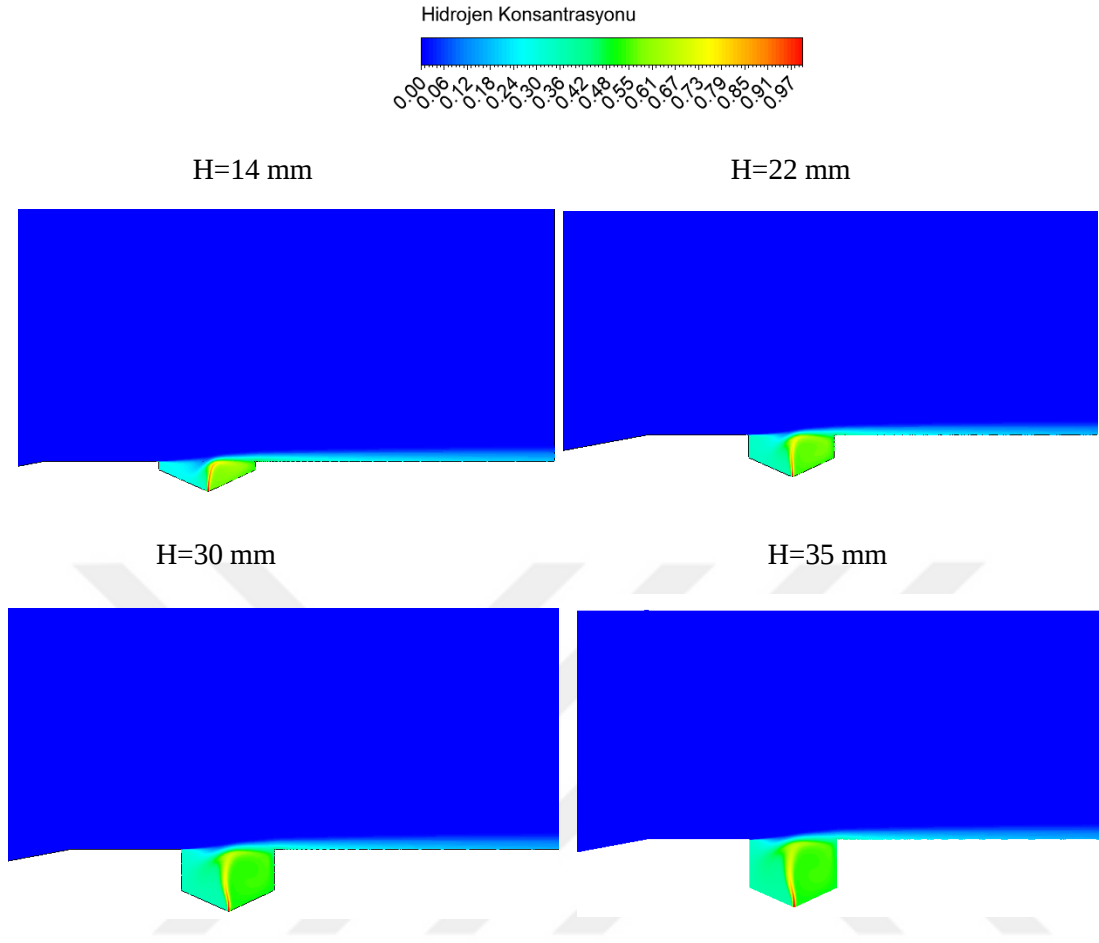
Yamuk+üçgen geomtride de $H=35$ mm ve $\alpha=50^\circ$ değerleri için en yüksek homojeniteye sahip hidrojen konsantrasyonu dağılımı elde edilmiştir (Şekil 4.31, 4.32 ve 4.33). Derinliğin artırılması ve arka duvar açısının düşürülmesi yanma verimini artırma potansiyeli olan hamlelerdir. $H=35$ mm ve $\alpha=50^\circ$ değerleri için hidrojen püskütme bölgesinin her iki tarafındaki hidrojen dağılımı dikkate alındığında yaklaşık ortalama 0,41 konsantrasyon değeri elde edilmiştir. Bu değer yamuk ve yamuk+daire geometrilerinde sırası ile 0,36 ve 0,38 olarak elde edilmişti. Bu bulgular yamuk+üçgen hibrit tasarımının diğer geometrik tasarımlara göre hava-hidrojen karışımı ve yanma verimi açısından daha uygun olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 4.31. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)

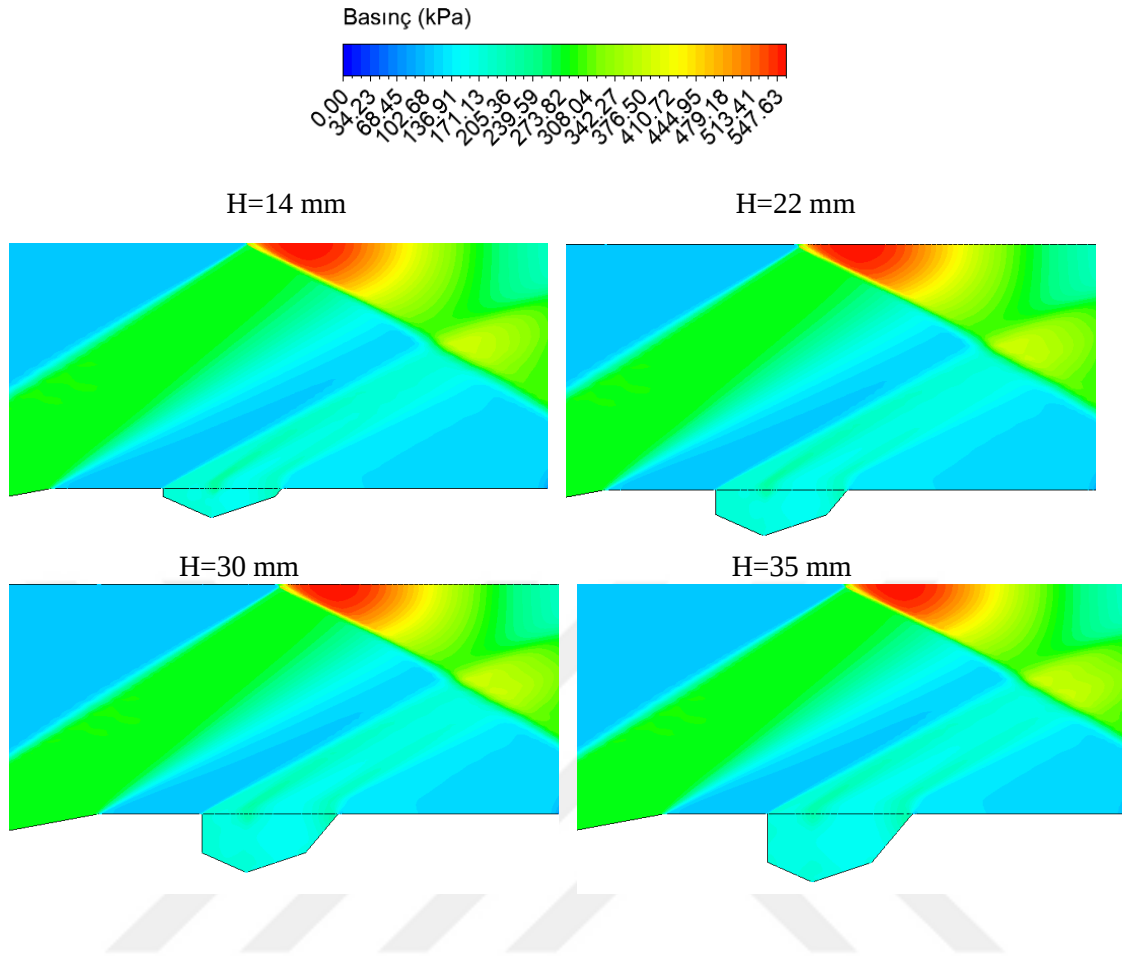


Şekil 4.32. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)

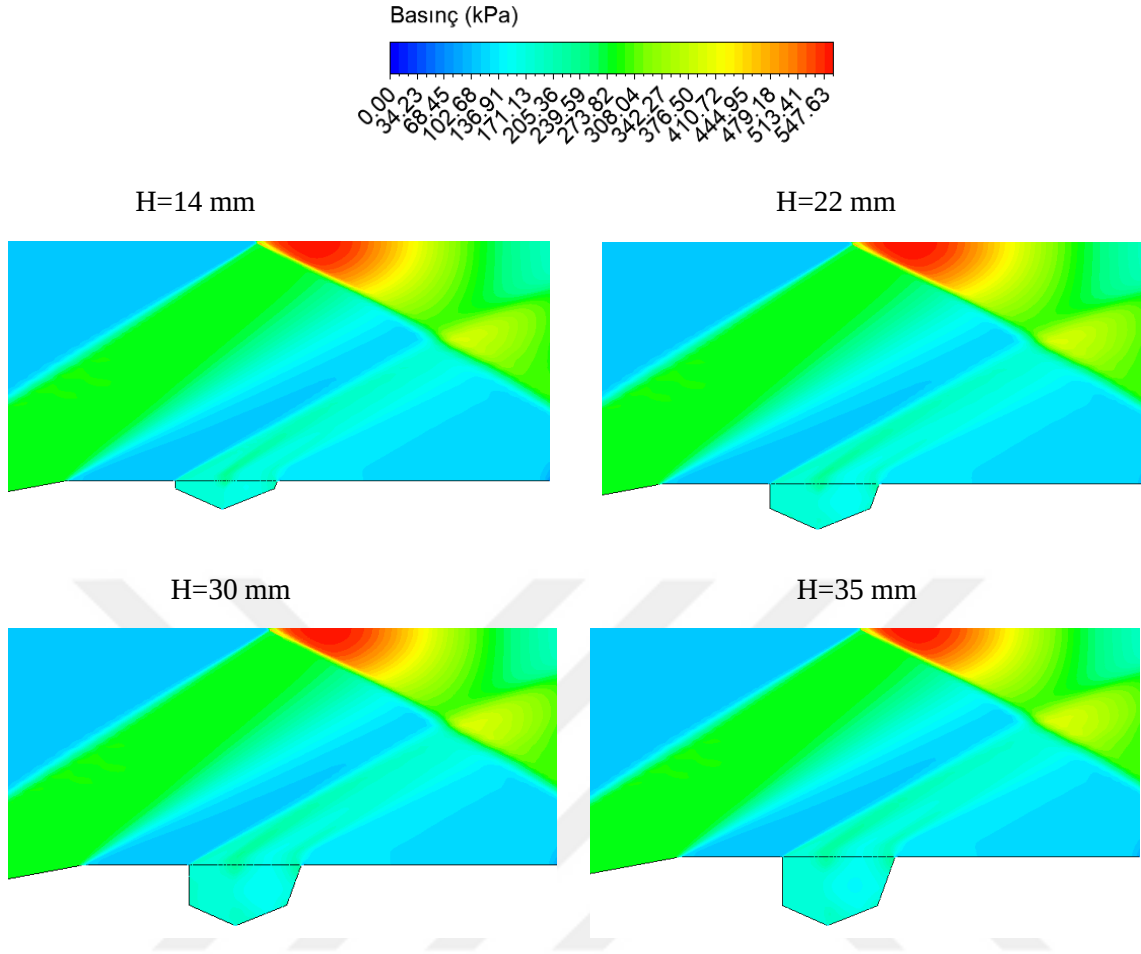


Şekil 4.33. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için hidrojen konsantrasyonu dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

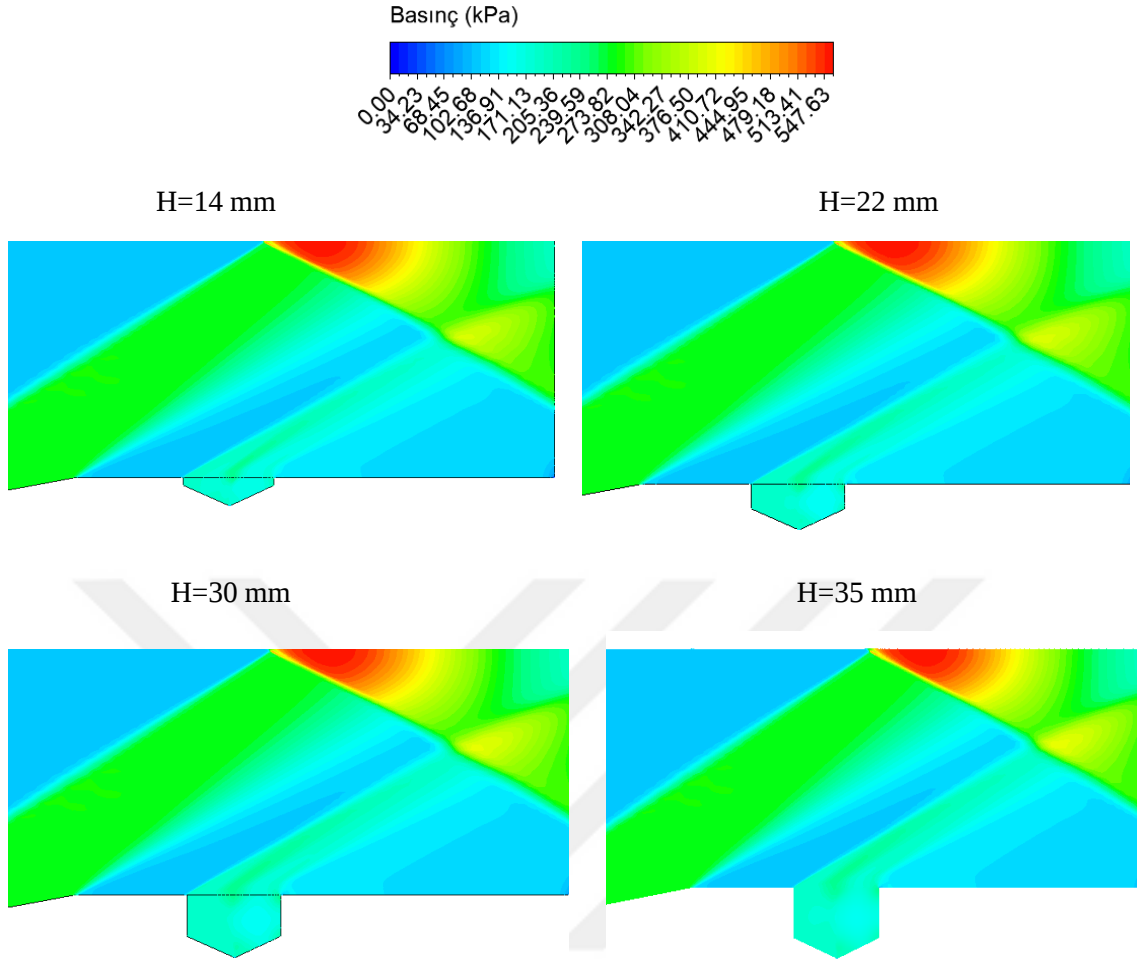
Şekil 4.34, 4.35 ve 4.36'daki basınç konturları incelendiğinde ana akım bölgesinde yansıyan şok dalgası arkasında oluşan maksimum basınç değerinin diğer geometrilerdeki ile aynı olduğu gözlenmiştir (548 kPa). Diğer yandan hem alev tutucu derinliği hem de arka duvar açısı değişimi için alev tutucudaki basınç dağılım karakteristiği ve basınç değerlerindeki (171 kPa) değişim ihmal edilebilir seviyededir. Bu bulgular yamuk+üçgen geometrili alev tutucudaki basınç değişiminin derinlik ve arka duvar açısından bağımsız olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 4.34. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)

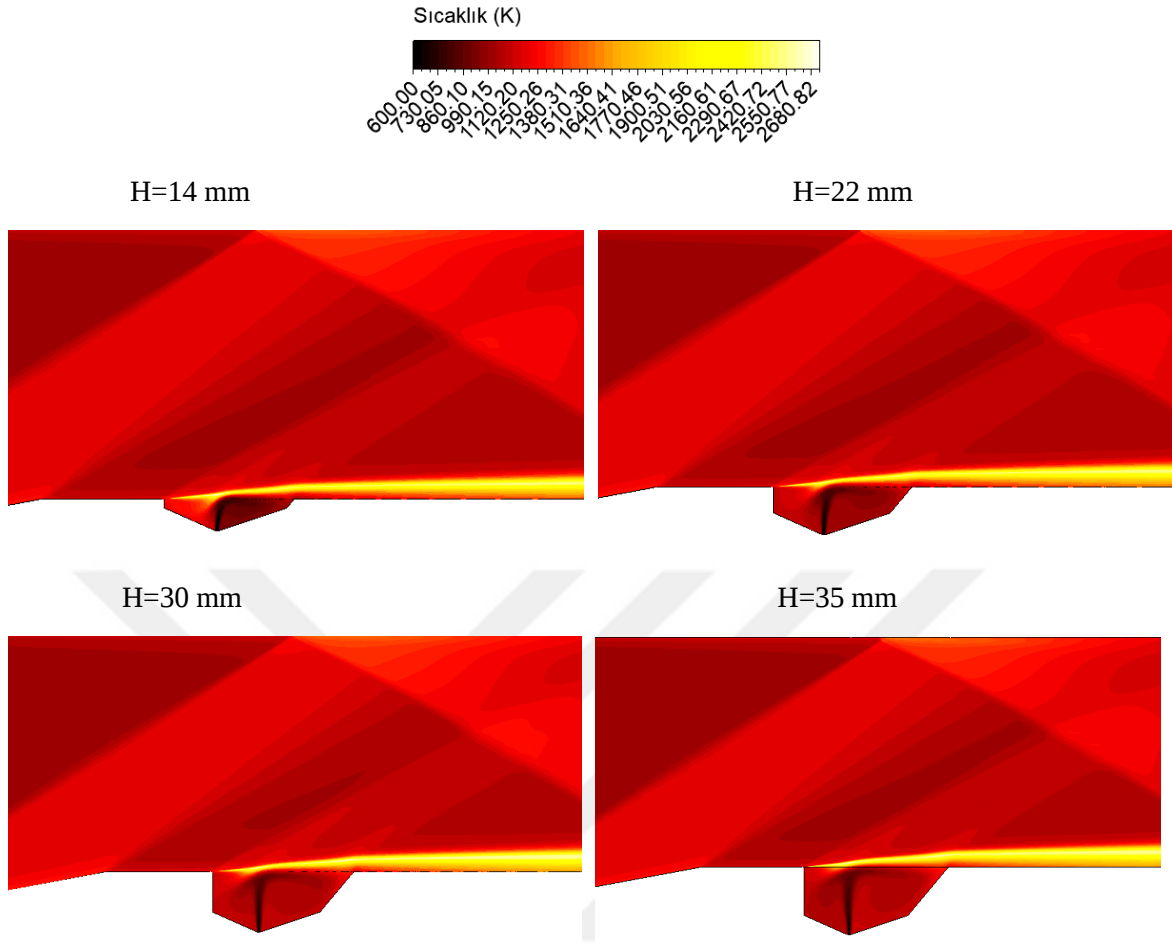


Şekil 4.35. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)

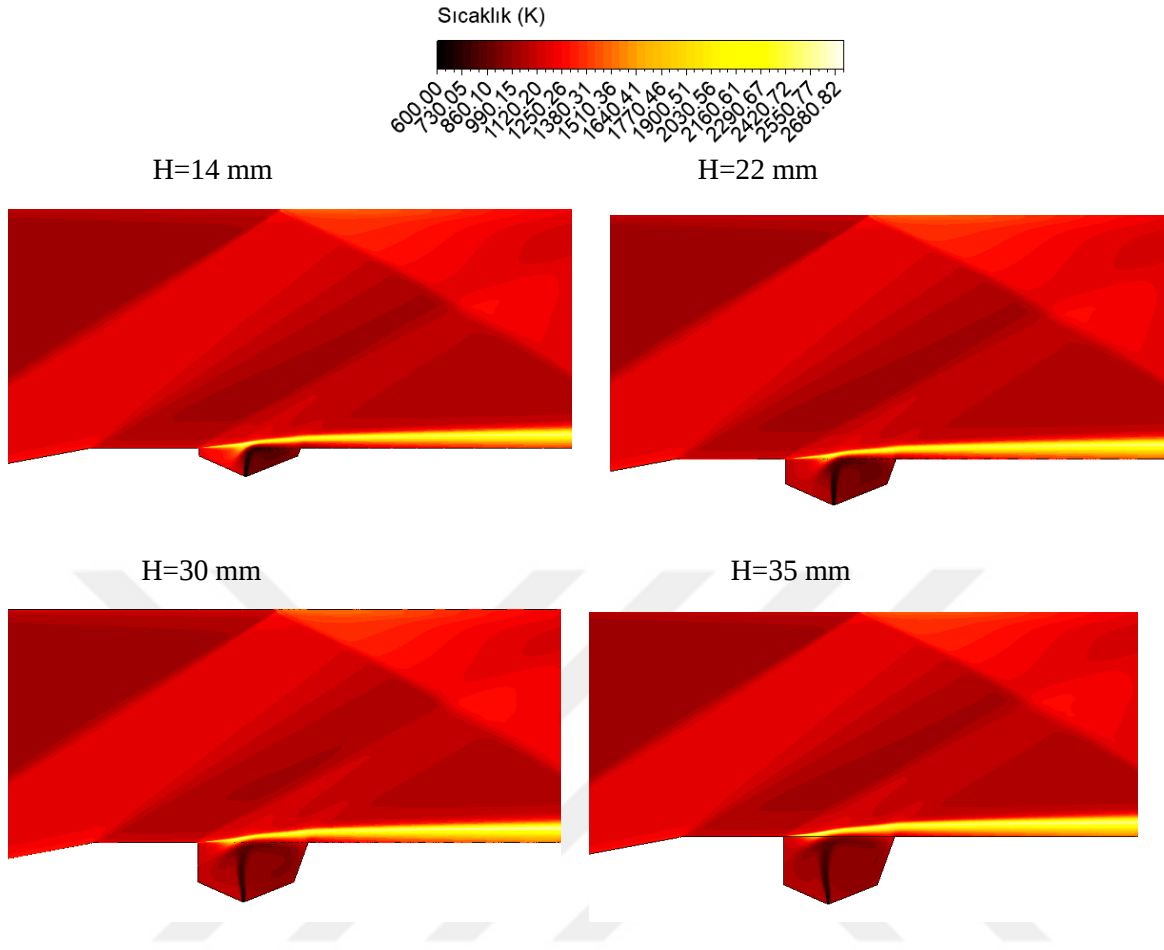


Şekil 4.36. Farklı yamuk+ üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için basınç dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

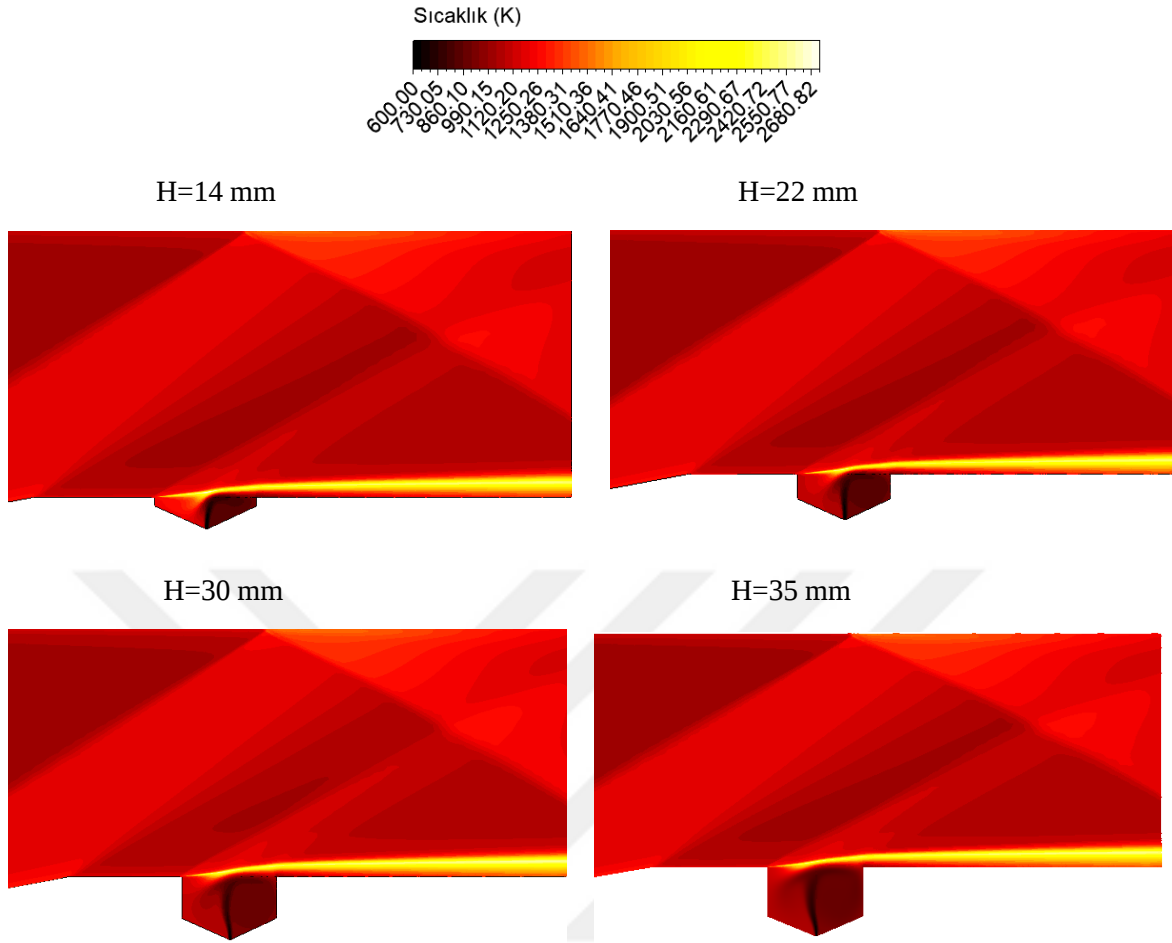
Yamuk+üçgen geometride $\alpha=50^\circ$ ve $\alpha=70^\circ$ değerleri için alev tutucu derinliğinin 22 mm'den 35 mm'ye yükselmesi neticesinde Şekil 4.37, 4.38 ve 4.39'dan görüldüğü gibi alev tutucu içerisindeki sıcaklık dağılımı farkedilir şekilde daha homojen bir karakteristiğe geçme eğilimi göstermiştir. Ancak $\alpha=90^\circ$ arka duvar açısında derinlik artışı sıcaklık dağılımındaki homojen olmayan yapıda çok düşük seviyede bir düzelme sağlayabilmiştir. Daha önceki geometriler için yapılan yorumlarda da bahsedildiği gibi alev tutucu içerisindeki sıcaklık dağılımının uniform oluşu sisteme malzeme dayanımı açısından pozitif bir katkı sağlamaktadır. Bu nedenle yamuk+üçgen geometri için de sıcaklık dağılımının daha uniform olmasında derinliğin artırılmasının ve arka duvar açısının düşürülmesinin etkili olacağı söylenebilir.



Şekil 4.37. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=50^\circ$, $Ma=2,5$)



Şekil 4.38. Farklı yamuk+ üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=70^\circ$, $Ma=2,5$)



Şekil 4.39. Farklı yamuk + üçgen geometrili alev tutucu derinlikleri için sıcaklık dağılımı ($L=45$ mm, $\alpha=90^\circ$, $Ma=2,5$)

5. SONUÇLAR

Scramjet motorlarla ilgili çalışmalarda alev tutucu geometrisinin hem hava-yakıt karışımı hem de motorun itki gücü üzerinde önemli etkileri olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca yamuk alev tutucu geometrisinin hava-yakıt karışımının verimini artıran en uygun geometrilerden birisi olduğu da aktarılmıştır. Bu tez çalışmasında ise literatür çalışmalarından farklı olarak dikdörtgen, üçgen, daire ve yamuk geometrilerin birleşiminden oluşan hibrit geometrili alev tutucu tasarımları scramjet performansı açısından değerlendirilmiştir. İlk olarak sayısal analiz sonuçlarının literatürde mevcut olan deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması neticesinde, sayısal analizlerde uygulanan matematiksel modelin, sınır şartlarının ve sayısal çözümleme metodunun uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Sonrasında hibrit alev tutucu geometrileri için parametrik analizler gerçekleştirilerek alev tutucu derinliği ve arka duvar açısının hava-yakıt karışımına, sıcaklığa ve basınca etkisi incelenmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda özet olarak sunulmuştur:

- Alev tutucu derinliğinin artırılması ve arka duvar açısının düşürülmesi tüm alev tutucu geometrileri için ana akım bölgesinden alev tutucuya giren hava miktarını artırmıştır. Böylece alev tutucu içerisinde daha yoğun ve uniform dağılımlı vorteks oluşumları meydana gelmiştir. Bu durum hava ve hidrojen karışımını da artırarak hidrojenin alev tutucu içerisinde daha homojen dağılmasını sağlamıştır. En homojen hidrojen dağılımları tüm alev tutucu geometrileri için $H=35$ mm derinlik ve $\alpha=50^\circ$ arka duvar açılarında meydana gelmiştir. Ancak aynı derinlik ve arka duvar açısı değerleri için yamuk+üçgen geometrisinde hem daha uniform hem de daha yüksek konsantrasyonda hidrojen dağılımı elde edilmiştir. Homojen hidrojen dağılımlı bölgelerde yamuk ve yamuk+daire geometrili alev tutucular için hidrojen konsantrasyonu sırasıyla ortalama 0,36 ve 0,38 elde edilirken, yamuk+üçgen geometrili alev tutucuda 0,41 olarak elde edilmiştir.
- Ana akım bölgesi ve alev tutucu bölgesi arasındaki basınç gradyanı alev tutucu içerisinde giren hava miktarını etkileyen bir unsurdur. Fakat alev tutucu derinliği ve arka duvar açısı değişimlerinin yamuk ya da yamuk+üçgen geometriler için alev tutucu içerisindeki basınca etkisi ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır. Basınç değişimine ilişkin bu bulgular tasarlanan alev tutucularda vorteks dağılımındaki

değişimde alev tutucu yüzey şekillerine göre havanın yönlendirilmesinin daha baskın rol oynadığını ortaya koymuştur. Diğer yandan yamuk+daire tasarımlı alev tutucu için düşük derinlik değerlerinde alev tutucu içerisinde giren hava miktarının ve yanmanın oldukça düşük seviyede olması nedeni ile alev tutucu duvarlarındaki basınç değerlerinde de düşüş meydana gelmiştir.

- Arka duvar açılarının $\alpha=50^\circ$ ve $\alpha=70^\circ$ değerlerinde alev tutucu derinliğinin artırılması durumunda alev tutucu içerisinde daha uniform bir hidrojen dağılımı ve dolayısıyla daha uniform bir yanma meydana gelmiştir. Böylece alev tutucu içerisindeki sıcaklık dağılımında da uniform bir yapı oluşumu gözlenmiştir. Ancak $\alpha=90^\circ$ için tüm derinlik değerlerinde uniform olmayan bir sıcaklık dağılımı ortaya çıkmıştır. Uniform olmayan sıcaklık dağılımı, alev tutucu malzemesindeki iç gerilmeleri artıran ve hasar oluşumunu tetikleyen bir olgudur. Tüm alev tutucu tasarımları dikkate alındığında alev tutucu geometrisinin değişimi ana akım bölgesindeki sıcaklık dağılımını ve değerini etkilememiş, yalnızca alev tutucu içerisindeki sıcaklık dağılımında etkili olmuştur. Tüm geometrik kombinasyonlar için scramjet motor içerisinde oluşan en yüksek sıcaklık 2700 K civarındadır.

Elde edilen tüm bulgular dikkate alındığında alev tutucunun taban yüzey geometrisinin akışı yönlendiren bir etkisinin olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca boyut ve malzeme cinsi gibi tasarım kriterlerine bağlı olarak hem alev tutucu derinliğinin hem de arka duvar açısının optimize edilmesi verimli bir yanma ve itki gücü açısından önem arz etmektedir. Bu tez çalışmadan elde edilen sonuçların hava-yakıt karışımının ve yanma veriminin iyileştirilmesi amacıyla ileride yapılacak olan daha karmaşık geometriye sahip alev tutucu tasarımları için ön değerlendirme imkânı sağlayabileceği tahmin edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Cai, Z., Sun, M., Wang, Z., & Bai, X. S. (2018). Effect of cavity geometry on fuel transport and mixing processes in a scramjet combustor. *Aerospace Science and Technology*, 80, 309-314.
- Chakravarthy, S., Randive, P. (2021). LES study on the effect of cavity configuration on combustion characteristics of a scramjet combustor with air-throttling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 22534-22553.
- Choubey, G., Solanki, M., Bhatt, T., Kshitij, G., Yuvarajan, D., & Huang, W. (2023). Numerical investigation on a typical scramjet combustor using cavity floor H₂ fuel injection strategy. *Acta Astronautica*, 202, 373-385.
- Choubey, G., Devarajan, Y., Huang, W., Mehar, K., Tiwari, M., Pandey, K. M. (2019). Recent advances in cavity-based scramjet engine- a brief review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 13895-13909.
- Dharavath, M., Manna, P., Chakraborty, D. (2014). Numerical investigation of hydrogen-fuelled scramjet combustor with cavity flame holder. *Defence Research and Development Laboratory*, 258, Hyderabad-500.
- Gruber, M. R., Baurle, R. A., Mathur, T., & Hsu, K. Y. (2001). Fundamental studies of cavity-based flameholder concepts for supersonic combustors. *Journal of Propulsion and power*, 17(1), 146-153.
- Huang, W. (2015). Investigation on the effect of strut configurations and locations on the combustion performance of a typical scramjet combustor. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29, 5485-5496.
- Huang, W., Wang, Z., Luo, S., & Liu, J. (2011). Parametric effects on the combustion flow field of a typical strut-based scramjet combustor. *Chinese science bulletin*, 56, 3871-3877.
- Kireeti, S. K., Sastry, G. R. K., Gugulothu, S. K., Deepanraj, B., Sundar, L. S., & Arthi, M. (2022). Comparison of combustion characteristics of four strut injectors with that of three strut injectors by numerically investigating doubly-dual cavity-based scramjet combustor. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102759.

- Kummitha, O. R., Pandey, K. M., & Gupta, R. (2018). CFD analysis of a scramjet combustor with cavity based flame holders. *Acta Astronautica*, 144, 244-253.
- Kummitha, O. R., Pandey, K. M., & Gupta, R. (2018). Optimization of scramjet performance with different fuel injection techniques and flame holder cavities. *Acta Astronautica*, 152, 908-919.
- Landsberg, W. O., Curran, D., & Veeraragavan, A. (2022). Experimental flameholding performance of a scramjet cavity with an inclined front wall. *Aerospace Science and Technology*, 126, 107622.
- Liu, K., Pan, Y., Al-Ansari, M. M., Al-Dahmash, N. D., Jhanani, G. K., & Sekar, M. (2024). Enhancing the mixing characteristics of multi-hydrogen jets in scramjet engines through the implementation of fuel injection strategies and vortex generator positioning. *Fuel*, 355, 129466.
- Moradi, R., Mahyari, A., Gerdroodbary, M. B., Abdollahi, A., & Amini, Y. (2018). Shape effect of cavity flameholder on mixing zone of hydrogen jet at supersonic flow. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(33), 16364-16372.
- Rajesh, A. C., Jeyakumar, S., Jayaraman, K., Karaca, M., Athithan, A. A. (2023). The implications of dual cavity locations in a strut-mounted scramjet combustor. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 145, 106855.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Mustafa YÜZÜCÜ

Lise : Karataş Anadolu Lisesi / Matematik-Fen Bölümü (2009-2013)

Üniversite : Cumhuriyet Üniversitesi / Makine Mühendisliği (2013-2017)

Staj : Gürçelik Makine / Üretim-İmalat Stajı (45 gün)

Staj : Dönmez Debriyaj / Yönetim Stajı (15 gün)

İş Deneyimi :

1-) MMS Modüler ve Mobil Sistemler / Proje Mühendisi : 12 ay

2-) Tümser Döküm A.Ş. / Üretim Sorumlusu : 18 ay

3-) Erpen/Ergsan Basınçlı Döküm A.Ş. / Üretim Sorumlusu : 8 ay

4-) Volt Motor A.Ş. / Enjeksiyon Uzman Yardımcısı : 4 ay