



T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİKME VE BOŞLUK TABANLI SCRAMJET MOTORLARDA YAKIT
ENJEKSİYON KONUMU VE AÇISININ HAVA-YAKIT KARIŞIM
SÜRECİNE ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEVLUDİYE KARABULUT

HAZİRAN

MEVLUDİYE KARABULUT	MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ	HAZİRAN 2025
---------------------	---------------------	--------------

**DİKME VE BOŞLUK TABANLI SCRAMJET MOTORLARDA YAKIT
ENJEKSİYON KONUMU VE AÇISININ HAVA-YAKIT KARIŞIM
SÜRECİNE ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZİ**

Mevludiye KARABULUT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Danışman
Doç. Dr. Burak KURŞUN**

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2025

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Mevludiye KARABULUT tarafından hazırlanan “Dikme ve Boşluk Tabanlı Scramjet Motorlarda Yakıt Enjeksiyon Konumu ve Açısının Hava-Yakıt Karışım Sürecine Etkisinin Sayısal Analizi” 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. Mahmut KAPLAN

Naci Topçuoğlu Meslek Yüksekokulu, Gaziantep Üniversitesi

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

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Korhan ÖKTEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 19.06.2025

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 dökümanları 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.

Mevludiye KARABULUT

19.06.2025

DİKME VE BOŞLUK TABANLI SCRAMJET MOTORLARDA YAKIT ENJEKSİYON KONUMU VE AÇISININ HAVA-YAKIT KARIŞIM SÜRECİNE ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mevludiye KARABULUT

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Yüksek hızlı hava taşıtlarının geliştirilmesi, itki sistemlerinde önemli teknolojik ilerlemeleri zorunlu kılmıştır. Özellikle hipersonik hızlara ulaşabilen taşıtlar için geleneksel jet motorları yetersiz kalmış ve bu nedenle ramjet ve scramjet gibi hava solumalı motor sistemleri geliştirilmeye başlanmıştır. Hava solumalı motorlarda yanma veriminin iyileştirilmesi ve itki gücünün artırılmasına yönelik çalışmalarda dikme ve boşluk tabanlı tasarımlar öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında ise, scramjet motorlarında kullanılan dikme ve boşluk tabanlı alev tutucu geometrilerinde yakıt enjeksiyonunun konumu ve açısının hava-yakıt karışımı üzerindeki etkileri sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. Parametrik analizler aracılığıyla, farklı püskürtme stratejilerinin karışım etkinliği ve yanma performansına katkıları detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, boşluk tabanlı alev tutucularda dik, eğik ve taban yüzeylerden; dikme tabanlı konfigürasyonlarda ise dikme yüzeyinin üst, orta ve alt bölgelerinden olmak üzere farklı noktalardan yakıt enjeksiyonu gerçekleştirilmiş ve her noktada $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ ve 90° püskürtme açıları uygulanmıştır. Gerçekleştirilen analizlerde; hız vektörleri, akım çizgileri, basınç ve sıcaklık dağılımları ile su buharı konsantrasyonu konturları üzerinden akış ve yanma yapıları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, püskürtme konumunun ve açısının, özellikle alev sabitlenmesi, geri akım oluşumu ve türbülans karakteristikleri üzerinde belirleyici etkiler yarattığını göstermiştir. Dikme tabanlı tasarımda 90° açılı püskürtmelerde, özellikle üst noktadan püskürtme yapıldığında, eksen boyunca düzenli, simetrik ve yoğun bir karışım oluşmuştur. Üst noktadan püskürtme sırasında %5,13 gibi en yüksek su buharı konsantrasyonu elde edilmiş ve yanma verimi artış göstermiştir. Boşluk-tabanlı alev tutucuda ise en yüksek su buharı konsantrasyonu (%13,35), 60° açısında sol yan yüzeyden yapılan püskürtmede elde edilmiştir. Sonuçlar, su buharı konsantrasyonu gibi yanma verimliliğine dair göstergelerle desteklenmiş, optimum püskürtme stratejilerinin belirlenmesinde bu parametrenin önemli bir gösterge olduğu ortaya konmuştur. Bu tez çalışmasının, scramjet motorlarında enjeksiyon stratejileri için önemli bir kaynak olabileceği öngörülmektedir.

Sayfa Adedi : 92
Anahtar Kelimeler : Alev tutucu, Boşluk-tabanlı, Dikme-tabanlı, Scramjet, Yanma
Danışman : Doç. Dr. Burak KURŞUN

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF FUEL INJECTION POSITION AND
ANGLE ON THE AIR-FUEL MIXING PROCESS IN STRUT- AND CAVITY-BASED
SCRAMJET ENGINES

(M. Sc. Thesis)

Mevludiye KARABULUT

AMASYA UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

The development of high-speed aircraft has necessitated significant technological advances in propulsion systems. Especially for vehicles that can reach hypersonic speeds, conventional jet engines have proven inadequate and therefore air-breathing engine systems such as ramjet and scramjet have begun to be developed. In studies aimed at improving combustion efficiency and increasing thrust in air-breathing engines, strut and cavity-based designs stand out. In this thesis, the effects of the position and angle of fuel injection on the air-fuel mixture in strut and cavity-based flame arrester geometries used in scramjet engines have been analyzed by numerical methods. The contributions of different spray strategies to the mixture efficiency and combustion performance have been investigated in detail through parametric analyzes. Within the scope of the study, fuel injection was carried out from different points in cavity-based flame arresters, from the vertical, inclined and bottom surfaces; and from the upper, middle and lower regions of the strut surface in strut-based configurations, and $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ and 90° spray angles were applied at each point. In the analyzes performed; velocity vectors, streamlines, pressure and temperature distributions and water vapor concentration contours were evaluated for flow and combustion structures. The findings showed that the spray position and angle have decisive effects especially on flame stabilization, backflow formation and turbulence characteristics. In the strut-based design, a regular, symmetric and dense mixture was formed along the axis in 90° angle sprays, especially when sprayed from the top point. The highest water vapor concentration of 5.13% was obtained during spraying from the top point and the combustion efficiency increased. In the cavity-based flame holder, the highest water vapor concentration (13.35%) was obtained in the spraying made from the left side surface at 60° angle. The results were supported by indicators related to combustion efficiency such as water vapor concentration, and it was revealed that this parameter is an important indicator in determining the optimum spray strategies. It is anticipated that this thesis study may be an important resource for injection strategies in scramjet engines.

Number of pages : 92
Keywords : Flame Holder, Cavity-based, Strut-based, Scramjet, Combustion
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Burak KURŞUN

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, bilimsel rehberliği kadar manevi desteğini de daima hissettiren, öğrencisi olmaktan her zaman onur ve gurur duyduğum değerli danışmanım Doç. Dr. Burak KURŞUN'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde özverisi, desteği ve sevgisiyle her daim yanımda olan, bana her koşulda güvenerek bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan kıymetli babaannem Mevludiye KARABULUT'a ve sevgili kardeşim Duran KARABULUT'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu yolculukta desteğini, inancını ve motivasyonunu hiç eksik etmeyen, her zaman yanımda olan değerli meslektaşım ve yol arkadaşım Başak METİN'e gönülden teşekkür ederim.

Bu tez, başöğretmen Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK ile vatan uğruna canlarını feda eden Türk Silahlı Kuvvetleri'nin aziz şehit ve gazilerinin hatırasına ithaf edilmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. MATERYAL VE METOD	17
3.1. Matematiksel Model	18
3.2. Sayısal Model	18
3.3. Geometrik Model	21
3.4. Sınır Koşulları ve Hesaplama Bölgesinin Hücre Yapısı	22
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	25
4.1. Sayısal Sonuçların Doğrulaması	25
4.2. Parametrik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	27
4.2.1. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisi	30
4.2.2. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisi	58
5. SONUÇLAR	86
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	92

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Jet motoru iç yapısı (Petrescu ve diğerleri, 2017)	1
Şekil 1.2. Ramjet motoru (Zhu, Peng, Xu, ve Jiang, 2018).....	2
Şekil 1.3. Scramjet motoru (Zhu, Peng, Xu, ve Jiang, 2018)	3
Şekil 1.4. Dikme-tabanlı (a) boşluk-tabanlı (b) scramjet geometrileri	3
Şekil 2.1. Şematik gösterim (Li ve arkadaşları,2024)	5
Şekil 2.2. Ark kuyruklu yarım kama ve derin ark kuyruklu yarım kama ikiz destek geometrisi (Lu ve arkadaşları, 2025)	6
Şekil 2.3. 2D paralel ve eğimli yakıt enjeksiyonlu yanma odası geometrisi (Kummitha, 2022)	6
Şekil 2.4. Yanma odalarının şematik gösterimi (a) tek destek (b) pasif destek (c) ters pasif destek (Nair ve arkadaşları, 2022)	7
Şekil 2.5. Gaz kelebeği entegre edilmiş 2D geometri (Pranaykumar ve diğerleri, 2023)	8
Şekil 2.6. Tek destek (a) iki destek alev tutucu geometrileri (Nair ve arkadaşları, 2024)	8
Şekil 2.7. Soğutma enjektörlü geometri (Wang ve arkadaşları, 2025)	9
Şekil 2.8. Eksenel scramjet motorun 2D ve dörtte bir ölçekli geometrisi (Li ve diğerleri, 2025)	9
Şekil 2.9. a) Altı boşluk tabanlı yanma odası b) Enjeksiyon konum geometrileri (Fangbin ve diğerleri, 2025)	10
Şekil 2.10. Katı yakıtla çalışan scramjet motorunun yanma odasına ait geometri (Zhou ve diğerleri, 2025)	11
Şekil 2.11. Boşluk tabanlı yukarı akış dalgalı duvar geometrisi (Wang ve Cao, 2025).....	11
Şekil 2.12. Boşluklu ve ayırıcı plakalı scramjet yanma odasına ait şematik görünüm (Choubey ve arkadaşları, 2023)	12
Şekil 2.13. Çift modlu scramjet yanma odasının geometrisi (Yan ve arkadaşları, 2018)	12
Şekil 2.14. 2D Alev tutucuların geometrileri (Rajesh ve arkadaşları, 2023)	13

Şekil	Sayfa
Şekil 2.15. Destek yerleştirilmiş boşluk tabanlı alev tutucu şematik modeli (Liu ve arkadaşları, 2020)	13
Şekil 2.16. Kendiliğinden kısma etkisine sahip dikme tabanlı scramjet yanma odası modeli (Randive ve arkadaşları, 2021)	14
Şekil 2.17. Temel dikme ve yenilikçi elmas şekilli dikme için boşluklu scramjet yanma odasının şematik gösterimi (Kireeti ve arkadaşları, 2022)	14
Şekil 2.18. Dikme ve boşluk tabanlı scramjet yanma odası şeması (Lakka ve arkadaşları, 2021)	15
Şekil 3.1. Boşluk-tabanlı ve dikme-tabanlı alev tutucu yakıt püskürtülme konumları	17
Şekil 3.2. DLR scramjet modeli (Huang,2015)	21
Şekil 3.3. Boşluk-tabanlı scramjet geometrisi (Yüzücü ve Kurşun, 2023)	22
Şekil 3.4 Hesaplama bölgelerindeki hücre yapısı (mesh) dağılımı	23
Şekil 4.1. Gruber ve arkadaşları (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya ait deneysel düzeneğin şematik gösterimi	26
Şekil 4.2. Farklı hücre sayıları için elde edilen normalleştirilmiş basınç dağılımlarının, Gruber ve arkadaşlarının (2001) deneysel verileriyle karşılaştırılması.....	26
Şekil 4.3. Dikme-tabanlı alev tutucu için hız konturu örneği (orta noktadan 90° açıyla)	28
Şekil 4.4. Yamuk alev tutucu için hız konturu örneği (alt yüzeyden 90° açıyla)	29
Şekil 4.5. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 90^\circ$)	31
Şekil 4.6. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 30^\circ$)	32
Şekil 4.7. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = -30^\circ$)	33
Şekil 4.8. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 60^\circ$)	34
Şekil 4.9. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = -60^\circ$)	35

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisinde H ₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama hız dağılımı	36
Şekil 4.11. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 90^\circ$)	38
Şekil 4.12. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 30^\circ$).....	39
Şekil 4.13. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = -30^\circ$)	40
Şekil 4.14. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 60^\circ$)	41
Şekil 4.15. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = -60^\circ$)	42
Şekil 4.16. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisinde H ₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama su buharı değer dağılımı	43
Şekil 4.17. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 90^\circ$)	45
Şekil 4.18. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 30^\circ$)	46
Şekil 4.19. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = -30^\circ$)	47
Şekil 4.20. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 60^\circ$)	48
Şekil 4.21. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = -60^\circ$)	49
Şekil 4.22. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisinde H ₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama basınç dağılımı	50
Şekil 4.23. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 90^\circ$)	52
Şekil 4.24. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 30^\circ$)	53

Şekil	Sayfa
Şekil 4.25. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = -30^\circ$)	54
Şekil 4.26. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 60^\circ$)	55
Şekil 4.27. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = -60^\circ$)	56
Şekil 4.28. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisinde H_2 yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama sıcaklık dağılımı	57
Şekil 4.29. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 90^\circ$)	59
Şekil 4.30. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 30^\circ$)	60
Şekil 4.31. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = -30^\circ$)	61
Şekil 4.32. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 60^\circ$)	62
Şekil 4.33. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = -60^\circ$)	63
Şekil 4.34. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisinde H_2 yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama hız dağılımı	64
Şekil 4.35. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 90^\circ$)	66
Şekil 4.36. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 30^\circ$)	67
Şekil 4.37. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = -30^\circ$)	68
Şekil 4.38. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 60^\circ$)	69
Şekil 4.39. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = -60^\circ$)	70

Şekil	Sayfa
Şekil 4.40. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisinde H ₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama su buharı değer dağılımı	71
Şekil 4.41. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 90^\circ$)	73
Şekil 4.42. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 30^\circ$)	74
Şekil 4.43. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = -30^\circ$)	75
Şekil 4.44. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 60^\circ$)	76
Şekil 4.45. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = -60^\circ$)	77
Şekil 4.46. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisinde H ₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama basınç dağılımı	78
Şekil 4.47. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 90^\circ$).....	80
Şekil 4.48. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 30^\circ$)	81
Şekil 4.49. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = -30^\circ$)	82
Şekil 4.50. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 60^\circ$).....	83
Şekil 4.51. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = -60^\circ$).....	84
Şekil 4.52. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisinde H ₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama sıcaklık dağılımı	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Hava ve yakıt girişlerine ait başlangıç koşulları	24
Çizelge 3.2. Yakıt püskürtme konum ve açıları	24



RESİMLER DİZİNİ**Resim****Sayfa**

Resim 3.1. Dikme ve boşluk tabanlı alev tutucu geometrileri için ağ yapısı ortogonal kalite değerleri	24
---	----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

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

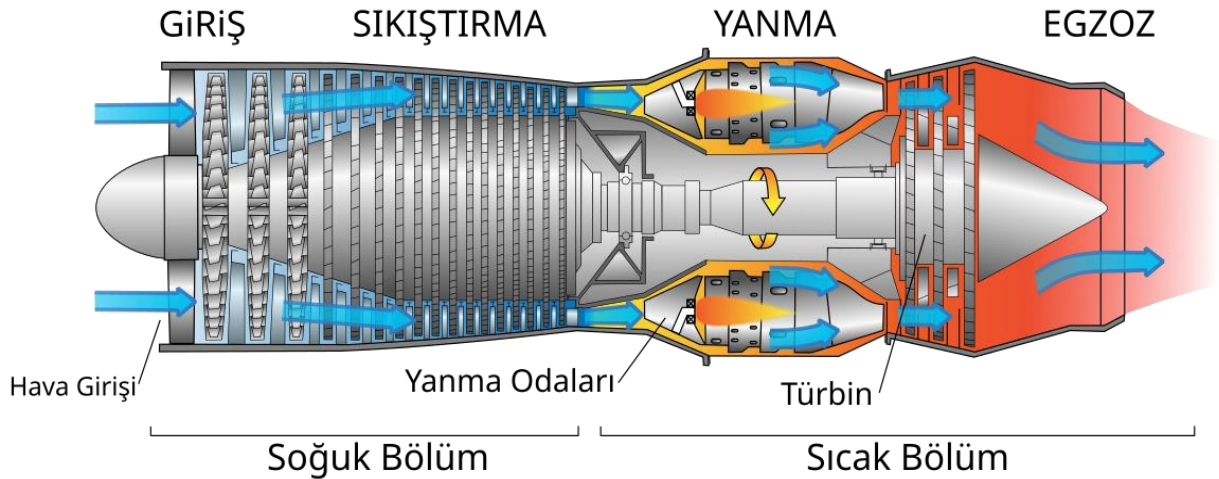
Simgeler	Açıklama
Ma	Mach Sayısı
H	Entalpi
P	Basınç
ρ	Yoğunluk
u_i	Hız Bileşenleri
k	Türbülans Kinetik Enerji
ω	Özgül Yayılma Oranı
$\widetilde{G}_k$	Türbülans Kinetik Enerji Üretimi
$\widetilde{G}_\omega$	ω Oluşum
Γ_k	k 'nın efektif difüzitesi
Γ_ω	ω 'nın efektif difüzitesi
Y_k	k 'nın yayılımı
Y_ω	ω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

Kısaltmalar	Açıklama
RANS	Reynolds-Ortalamalı Navier-Stokes

1. GİRİŞ

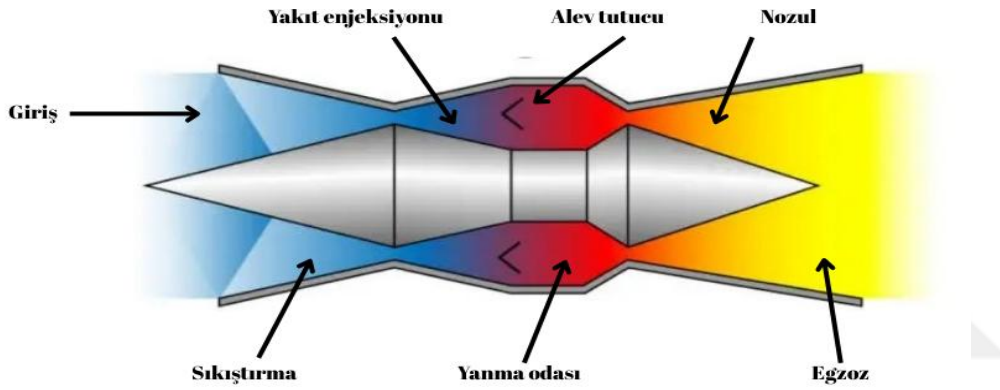
Yüksek hızlı hava taşıtlarının geliştirilmesi, itki sistemlerinde önemli teknolojik ilerlemeleri zorunlu kılmıştır. Özellikle hipersonik hızlara (Mach 5 ve üzeri) ulaşabilen taşıtlar için geleneksel jet motorları yetersiz kalmakta, bu nedenle ramjet ve scramjet gibi hava solunmalı motor sistemleri öne çıkmaktadır. Jet motorları, türbin ve kompresör gibi döner bileşenler aracılığıyla havayı sıkıştırarak çalışırken, ramjet motorları bu işlemi aracın yüksek hızı sayesinde gerçekleştirir. Scramjet motorları ise ramjet teknolojisinin bir evrimidir; ses üstü hızlarda yanmanın gerçekleştiği bir itki sistemidir. Bu motorlar sayesinde taşıtlar, atmosferin üst katmanlarında daha düşük yakıt tüketimiyle yüksek hızlara ulaşabilmektedir.

Jet motorları, günümüzde en yaygın olarak kullanılan hava solunmalı motorlardır. Bu motorlar temel olarak hava alışı, kompresör, yanma odası, türbin ve egzoz nozulu gibi bölümlerden oluşur. Hava motor girişinden alınır, kompresör tarafından sıkıştırılır, yanma odasında yakıtla karıştırılıp yakılır ve ortaya çıkan yüksek basınçlı gazlar türbinden geçerek egzozdan dışarı atılırken itki oluşturur. Türbin, kompresöre enerji sağlamak amacıyla kullanılır. Jet motorları özellikle ses altı ve düşük ses üstü (subsonik ve transonik) hızlarda verimli çalışırlar. (Saravanamuttoo ve diğerleri, 2017).



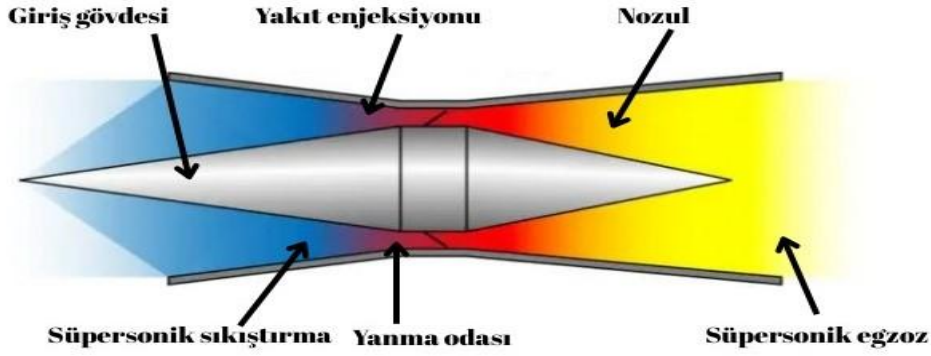
Şekil 1.1. Jet motoru içyapısı (Petrescu ve diğerleri,2017)

Ramjet motorları, jet motorlarından farklı olarak döner parçalara sahip değildir. Bu motorlar, ses üstü hızlarda hareket eden bir hava aracının sahip olduğu kinetik enerjiden faydalanarak hava girişini sıkıştırır. Hava, motorun girişinde geometrik daralma yoluyla sıkıştırılır, ardından yanma odasında yakıtla karıştırılarak yakılır ve yüksek hızlı egzoz gazlarıyla itki sağlanır. Ramjet motorlarının en önemli avantajı yapısal olarak basit olmalarıdır; ancak motorun çalışabilmesi için belirli bir hızın (genellikle Mach 3 civarı) üzerinde hareket edilmesi gereklidir. Bu nedenle dururken çalıştırılmazlar; başka bir itki sistemiyle hız kazanımı sağlanmalıdır (Walsh ve Fletcher, 2004).



Şekil 1.2. Ramjet motoru (Zhu, Peng, Xu, ve Jiang, 2018)

Scramjet motorları, ramjet motorlarının bir türevidir ve ses üstü hızlarda (özellikle Mach 5 ve üzeri) yanmanın gerçekleştirilebildiği sistemlerdir. Scramjet'te hava, motor boyunca ses üstü hızda kalmaya devam eder; bu da tasarım açısından ciddi zorluklar barındırır. Ramjet motorda olduğu gibi sıkıştırma yine kinetik enerjiye dayanır, fakat scramjet motorda yanma, hava ses üstü hızdayken gerçekleştiği için farklı bir aerotermodinamik tasarım gerektirir. Scramjet motorları uzay aracı fırlatma sistemlerinde ve hipersonik uçuş teknolojilerinde potansiyel bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Musielak, 2022).



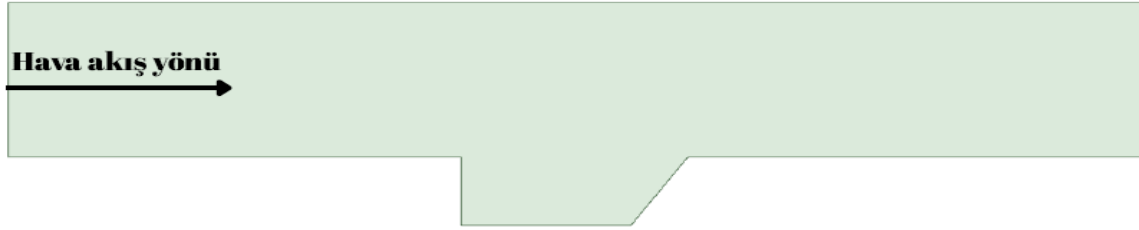
Şekil 1.3. Scramjet motoru (Zhu, Peng, Xu, ve Jiang, 2018)

Scramjet motorlarının iç akış kanalının tasarımında iki yaygın yaklaşım öne çıkmaktadır: dikme-tabanlı (strut-based) ve boşluk-tabanlı (cavity-based) konfigürasyonlar. Dikme-tabanlı scramjet sistemlerinde, yakıt genellikle motora yerleştirilen aerodinamik profilli dikmeler aracılığıyla enjekte edilir. Bu dikmeler, sadece yakıt enjekte etmekle kalmaz, aynı zamanda akışta şok dalgası ve türbülans oluşturarak karışımı artırıcı bir etki de sağlar. Öte yandan, boşluk-tabanlı tasarımlar, motorun yanma odasına entegre edilen oyuk yapılar sayesinde hava-yakıt karışımının geçici olarak tutulmasını ve karışımın geliştirilmesini hedefler. Bu boşluklar, geri akım bölgeleri oluşturarak karışımı iyileştirebilir ve alev stabilizasyonu sağlayabilir. Her iki yaklaşımın da avantajları ve sınırlamaları olmakla birlikte, farklı akış koşulları altında karışım etkinliği açısından farklı sonuçlar doğurabilmektedir.

a)



b)



Şekil 1.4. Dikme-tabanlı (a) boşluk-tabanlı (b) scramjet geometrileri

Scramjet motorlarının en büyük avantajlarından biri, harici bir oksitleyiciye ihtiyaç duymamasıdır. Roket motorlarının aksine, scramjetler atmosferik havadan doğrudan oksijen temin ederek çalıştıkları için taşıma kütlelerinde önemli ölçüde tasarruf sağlarlar. Bu durum, genel sistemin daha hafif olmasına ve enerji verimliliğinin artmasına katkıda bulunur.

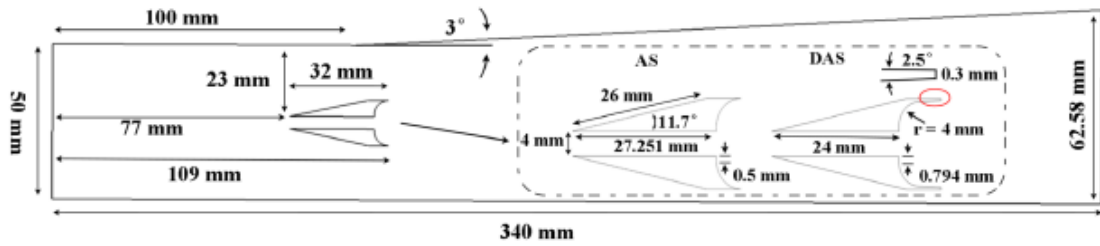
Bir diğer önemli avantaj ise motor yapısının basit olmasıdır. Geleneksel turbojet motorlarının aksine scramjetlerde hareketli parçalar, döner kompresörler veya türbinler bulunmaz. Bu durum hem üretim sürecini kolaylaştırmakta hem de bakım maliyetlerini düşürmektedir.

Scramjet motorları aynı zamanda yüksek özgül itki değerlerine sahiptir. Bu, belirli bir yakıt miktarından daha fazla momentum elde edilmesini mümkün kılar. Sonuç olarak, scramjetler enerji açısından daha verimli bir itki sistemi sunarlar.

Diğer yandan dezavantaj olarak motorların test edilmesi ve geliştirilmesi oldukça yüksek maliyetlidir. Hipersonik akışların gerçekçi bir şekilde simüle edilebilmesi için özel altyapılara, örneğin ileri düzey rüzgâr tünellerine ve fırlatma platformlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum, araştırma ve geliştirme çalışmalarının ekonomik yükünü kayda değer biçimde artırmaktadır. (Shyy & Rycroft, 2009).

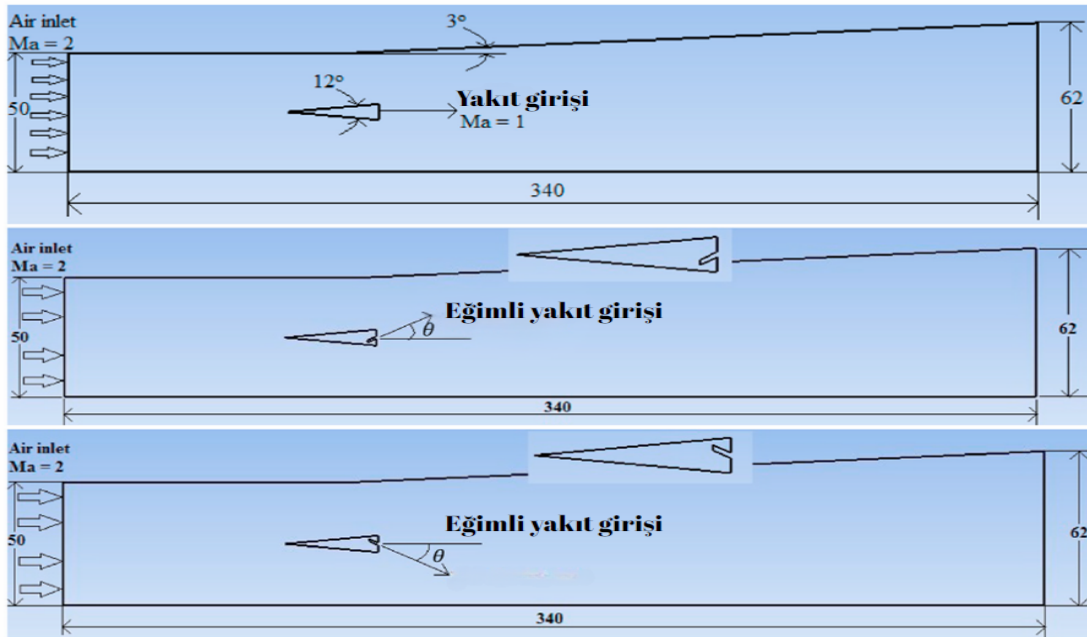
Bu tez çalışmasında, dikme ve boşluk tabanlı scramjet motorlarında yakıt enjeksiyon konumu ve açısının hava-yakıt karışımı üzerindeki etkileri sayısal akışkanlar dinamiği yöntemiyle incelenecektir. Özellikle farklı püskürtme senaryoları altında elde edilen karışım etkinliği değerlendirilecek ve optimum karışım performansını sağlayacak parametre kombinasyonları ortaya konacaktır. Bu çalışma, scramjet motorlarının verimli çalışmasına yönelik tasarım sürecine katkı sunmayı hedeflemektedir.

Lu ve arkadaşları (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yanma mesafesini sırasıyla derin ark kuyruklu yarım kama (DAS) desteğin %12,9 ve ark kuyruklu yarım kama (AS) desteğin ise %22,6 oranında azaltarak daha kısa mesafelerde etkin karışım sağladığı gözlemlenmiştir.



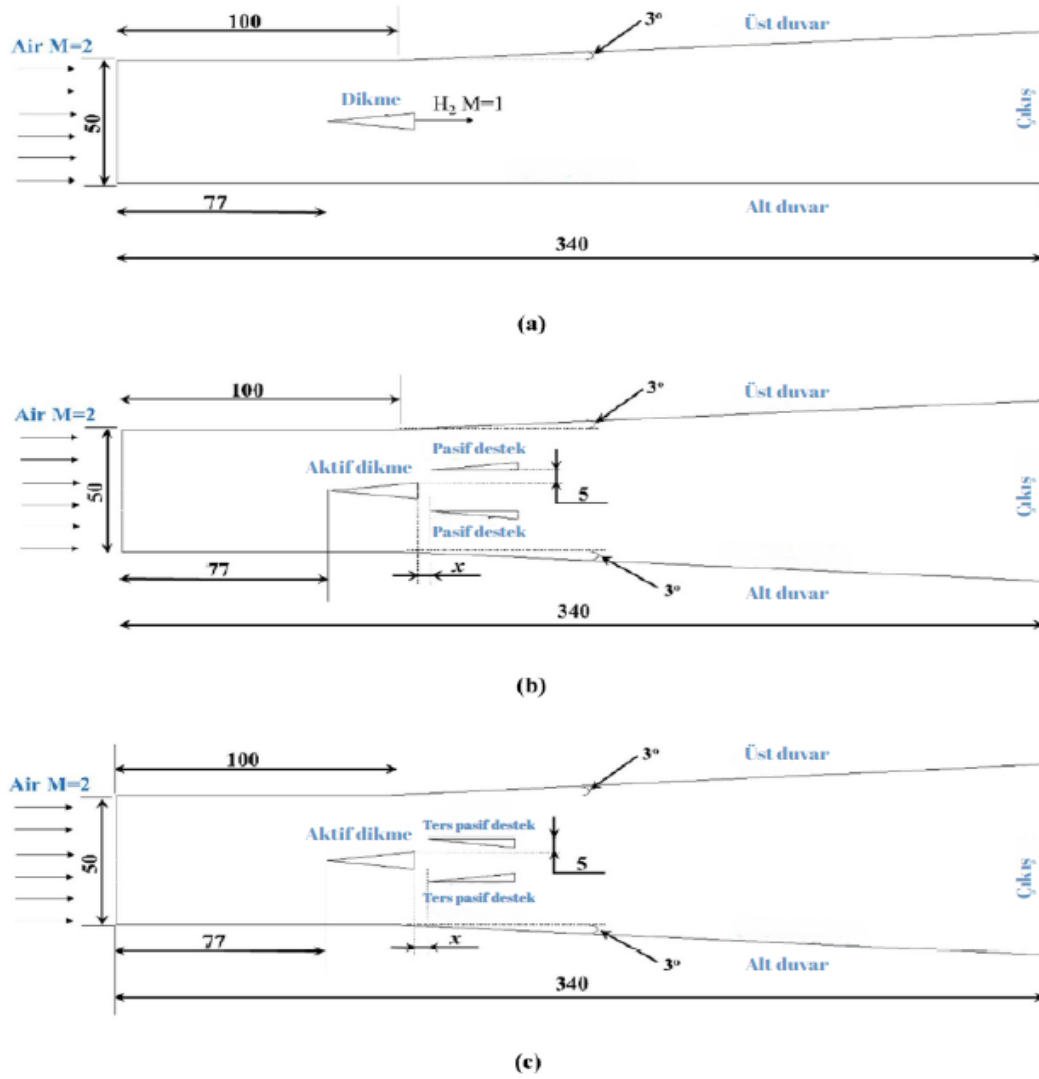
Şekil 2.2. Ark kuyruklu yarım kama ve derin ark kuyruklu yarım kama ikiz destek geometrisi (Lu ve arkadaşları, 2025)

Kummitha çalışmasında (2022), dikme tabanlı paralel ve eğimli yakıt enjeksiyonunun dikme alev tutucu bölgesine etkilerini araştırmıştır. Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda tam karışımın paralel enjeksiyon için 235 mm'den sonra, eğimli enjeksiyonda ise 175 mm mesafede gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Eğimli ve paralel enjeksiyon için sırasıyla 225 mm ve 285 mm mesafede maksimum %75 ve %62 yanma verimliliği tespit edilmiştir (Kummitha, 2022).



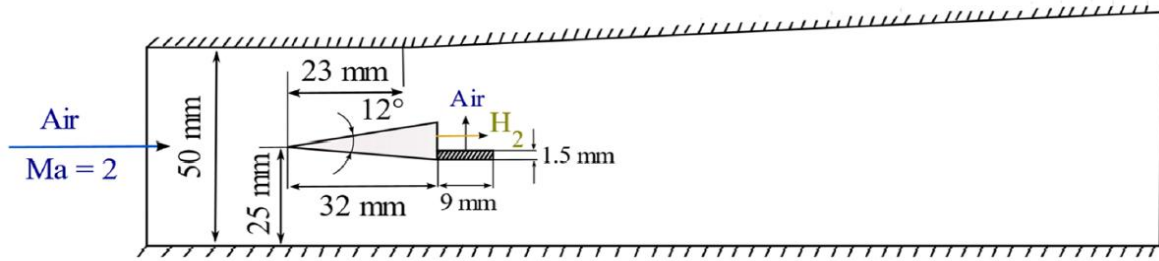
Şekil 2.3. 2D paralel ve eğimli yakıt enjeksiyonlu yanma odası geometrisi (Kummitha, 2022)

Nair ve arkadaşları (2022) tarafından, yakıt enjeksiyon bölgesinin hemen arkasına yerleştirilen iki pasif destek aracılığıyla karıştırma performansındaki değişim sayısal olarak incelenmiştir. Aktif destek (AS), pasif destekli (PS), ters pasif destekli (IPS) ve bunların çeşitli düzenlemelerini içeren bu yapıların karşılaştırmasında, özellikle ters pasif desteklerin yer aldığı konfigürasyonların daha kısa mesafelerde yüksek karışım verimliliğine ulaştığı gözlemlenmiştir.



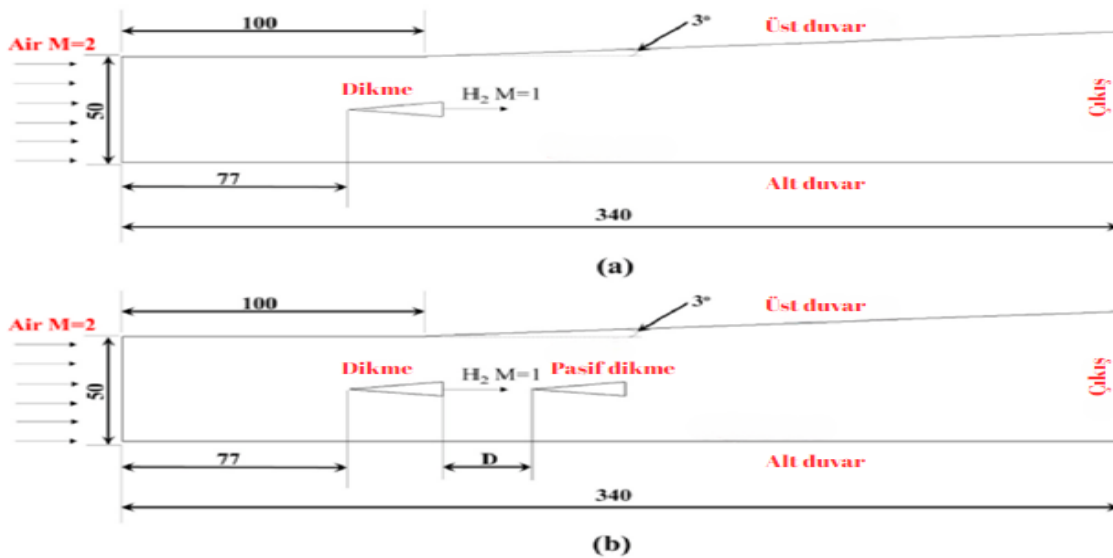
Şekil 2.4. Yanma odalarının şematik gösterimi (a) tek destek (b) pasif destek (c) ters pasif destek (Nair ve arkadaşları, 2022).

Pranaykumar ve diğerlerinin çalışmasında (2023), scramjet motoruna entegre edilen yeni bir enine hava enjeksiyon sistemi (gaz kelebeği mekanizması) incelenmiştir. Çalışmada kullanılan gaz kelebeği enjeksiyonu, hidrojen akışıyla çarpışarak karşıt yönlü dönen çift girdap yapıları oluşturmakta ve böylece karıştırma bölgesinde akış süresi ile türbülans yoğunluğunu artırdığını göstermiştir. Karıştırma verimliliğinde %48'e varan bir artış sağlanırken, ateşleme uzunluğu da %28 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (Pranaykumar ve diğerleri, 2023).



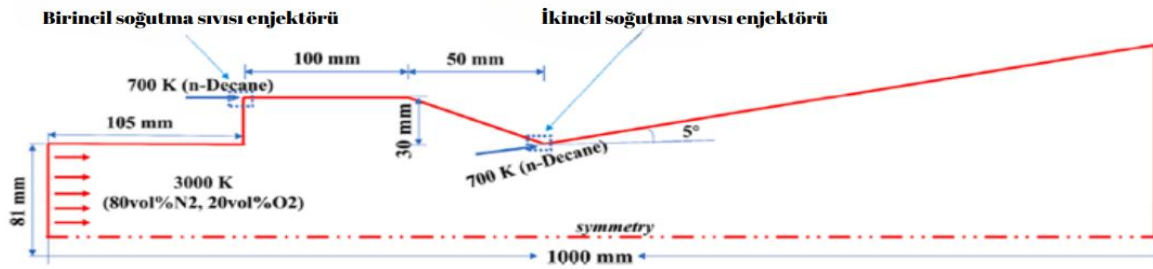
Şekil 2.5. Gaz kelebeği entegre edilmiş 2D geometri (Pranaykumar ve diğerleri, 2023)

Nair ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan çalışmada, yakıt enjeksiyon desteğinin hemen ardına yerleştirilen pasif bir desteğin etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, pasif desteğin konumu karıştırma ve yanma verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığına saptanmıştır. Pasif desteğin 30 mm mesafe ile konumlandırılması durumunda, yukarı ve aşağı akış yönünde oluşan girdapların akışı stabilize ettiği ve karıştırma etkinliğini artırdığı gözlemlenmiştir.



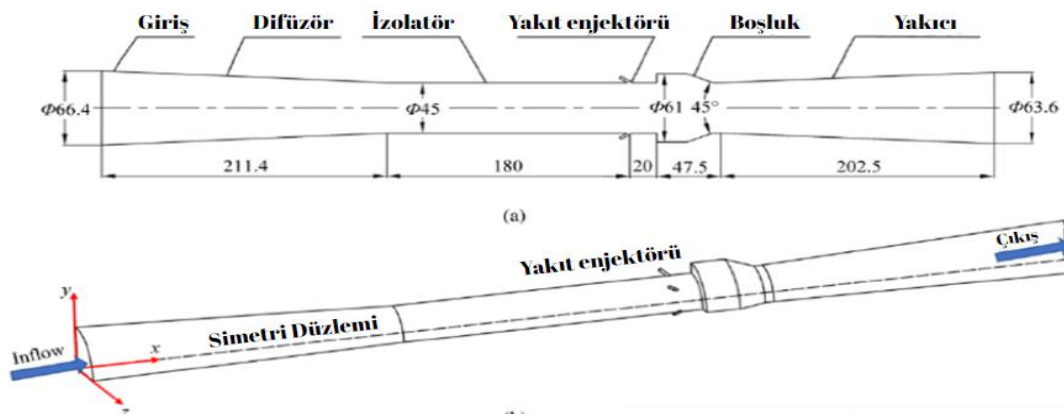
Şekil 2.6. Tek destek (a) iki destek alev tutucu geometrileri (Nair ve arkadaşları, 2024)

Wang ve arkadaşları (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada yüksek sıcaklık ortamlarında çalışan scramjet motorlarının dayanımını artırmak ve termal yükleri azaltmak amacıyla geliştirilen yeni bir soğutma yaklaşımı detaylı olarak ele alınmıştır. Soğutucu olarak n-dekan kullanılan bu yöntemle, geleneksel (tepkimesiz) gaz filmi enjeksiyonuna kıyasla daha düşük duvar sıcaklıkları ve azalmış duvar kayma gerilmesi elde edilmiştir. Özellikle çift kademeli soğutma sistemiyle, çıkış noktasındaki soğutma verimliliği %43'e kadar arttığı tespit edilmiştir.



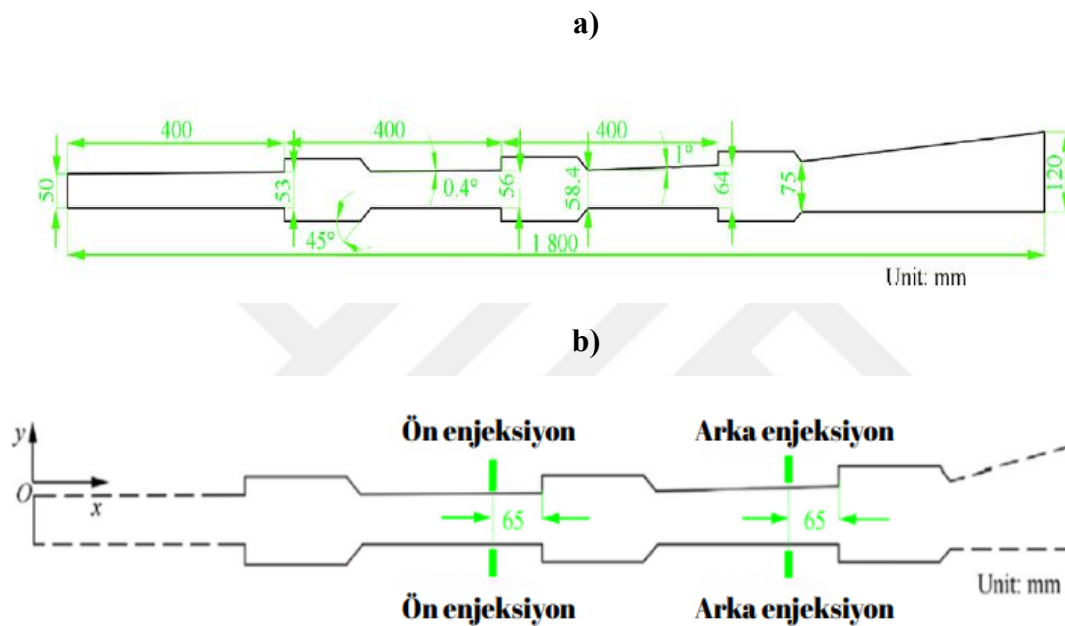
Şekil 2.7. Soğutma enjektörlü geometri (Wang ve arkadaşları, 2025)

Li ve diğerleri (2025) çalışmasında, eksenel simetrik bir scramjet motoru içerisinde etilen yakıtının yüksek Mach sayısında ($Ma = 8$) karıştırılması ve yanma davranışını analiz etmek amacıyla gerçekleştirmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, eşdeğer oran arttıkça alevin daha yoğun hale geldiği buna bağlı olarak geri basıncın yükselerek alevin yukarı akışa taşındığı tespit edilmiştir. Eşdeğer oran 0,42'den 1,08'e çıkarıldığında karıştırma verimliliğinde %35, yanma verimliliğinde ise %16'lık bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.



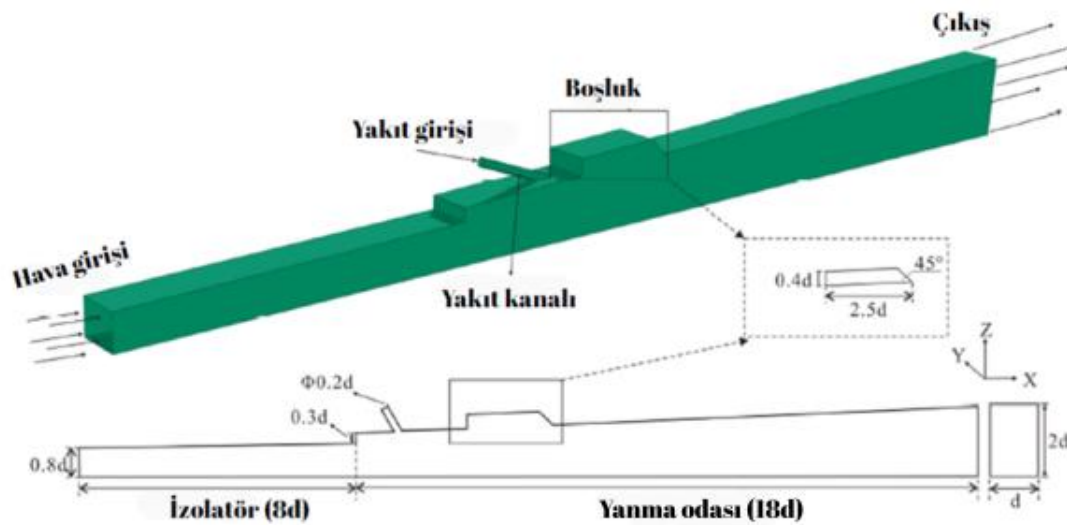
Şekil 2.8. Eksenel scramjet motorun 2D ve dörtte bir ölçekli geometrisi (Li ve diğerleri, 2025)

Fangbin ve arkadaşları (2025) tarafından, çok boşluklu scramjet yanma odalarının verimliliğini artırmaya yönelik gerçekleştirilen bu çalışmada, farklı yakıt enjeksiyon konumlarının (ön ve arka) yanma mekanizması üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen bulgulara göre ön enjeksiyon konfigürasyonları daha yüksek yanma verimliliği sağlarken, arka enjeksiyon geometrileri yakıt emme başlangıcında avantajlı olduğu saptanmıştır. Arka enjeksiyon için optimum mesafesinin, ön enjeksiyona göre yaklaşık %60 daha uzun olduğu tespit edilmiştir.



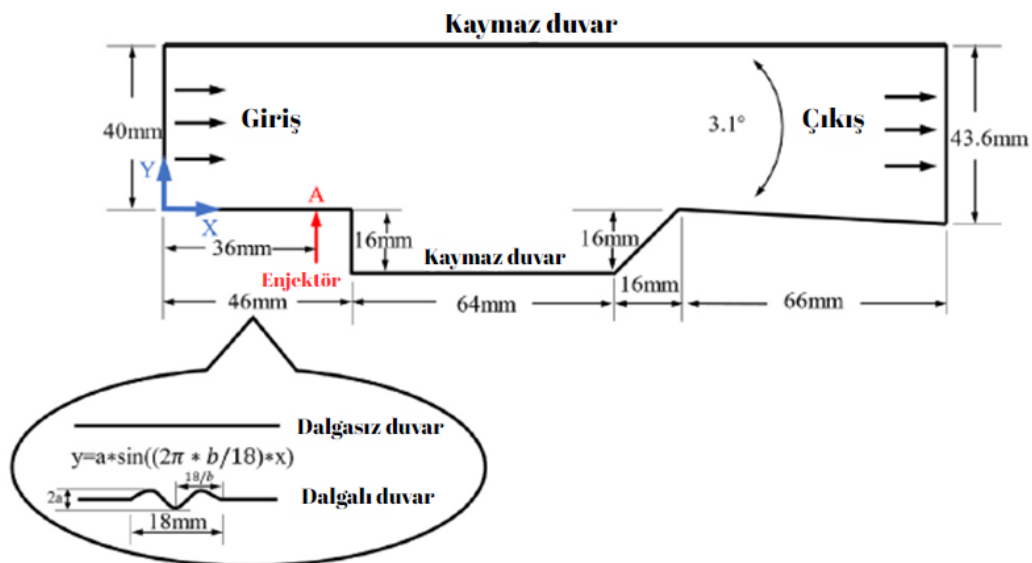
Şekil 2.9. a) Altı boşluk tabanlı yanma odası b) Enjeksiyon konum geometrileri (Fangbin ve diğerleri, 2025)

Bor katkılı jel bazlı itici gazlar, yüksek enerji yoğunlukları ve koordine edilebilir enjeksiyon nitelikleri sayesinde ramjet motorlarının performansını iyileştirme potansiyeline sahiptir. Bu durum, scramjet araçların geliştirilmesinde umut vadeden bir yaklaşım sunmaktadır (Zhou ve diğerleri, 2025). Bu çalışmada, scramjet motorunun iç akış alanı modellenerek farklı yakıt enjeksiyon açılarının yanma odasındaki verimlilik üzerindeki etkileri çözümlenmiştir. Analiz sonuçları, enjeksiyon açısı arttıkça yakıt jetinin akışa etkisini ve parçacıklar arasındaki çarpışma sıklığının düzeyini artırdığını göstermiştir.



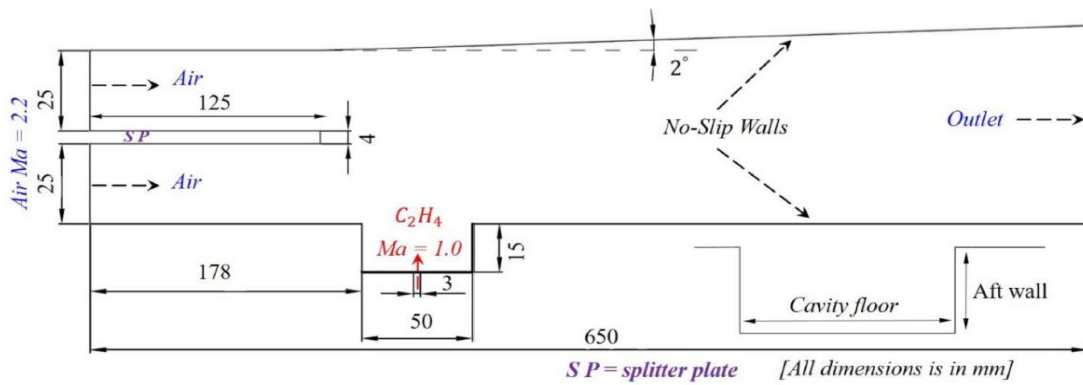
Şekil 2.10. Katı yakıtlı çalışan scramjet motorunun yanma odasına ait geometri (Zhou ve diğerleri, 2025)

Wang ve Cao (2025) yaptıkları çalışmada, yakıt ile süpersonik hızdaki hava karışımının verimliliğini artırmak amacıyla, yukarı akış yönünde dalgalı duvara sahip boşluk tabanlı yanma odası incelenmiştir. Dalgalı duvarın genliği ya da dalga sayısı arttıkça karıştırma performansının daha belirgin hale geldiği belirtilmiştir. Değerlendirmede 1, 1,5 mm genlikli ve 1, 1,5 dalga sayılarında toplam basınç kaybının sınırlı bir artışla en iyi verimliliği sağladığı keşfedilmiştir.



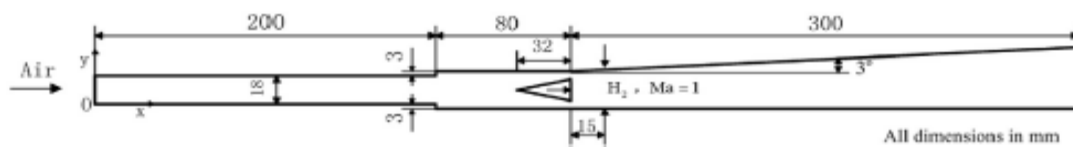
Şekil 2.11. Boşluk tabanlı yukarı akış dalgali duvar geometrisi (Wang ve Cao, 2025)

Choubey ve arkadaşları (2023) bu çalışmada, etilen yakıtı kullanılan ve ayırıcı plaka ile desteklenen boşluk tabanlı scramjet yanma odasında, geometrik parametrelerin yanma performansına etkileri incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçları doğrultusunda 120° arka açılı yamuk boşluk geometrisi, etilenin tutunmasını kolaylaştıran büyük bir yeniden dolaşım bölgesi oluşturarak daha geniş ve kararlı bir ateşleme bölgesi sağladığı belirlenmiştir. Ayırıcı plaka, yakıt dağılımı ve alev yayılımını iyileştirirken, pozitif hücum açılarında oluşan şok kaynaklı akış ayrılması alevi yukarı yönlendirerek motor performansını olumsuz etkileyebileceği tespit edilmiştir.



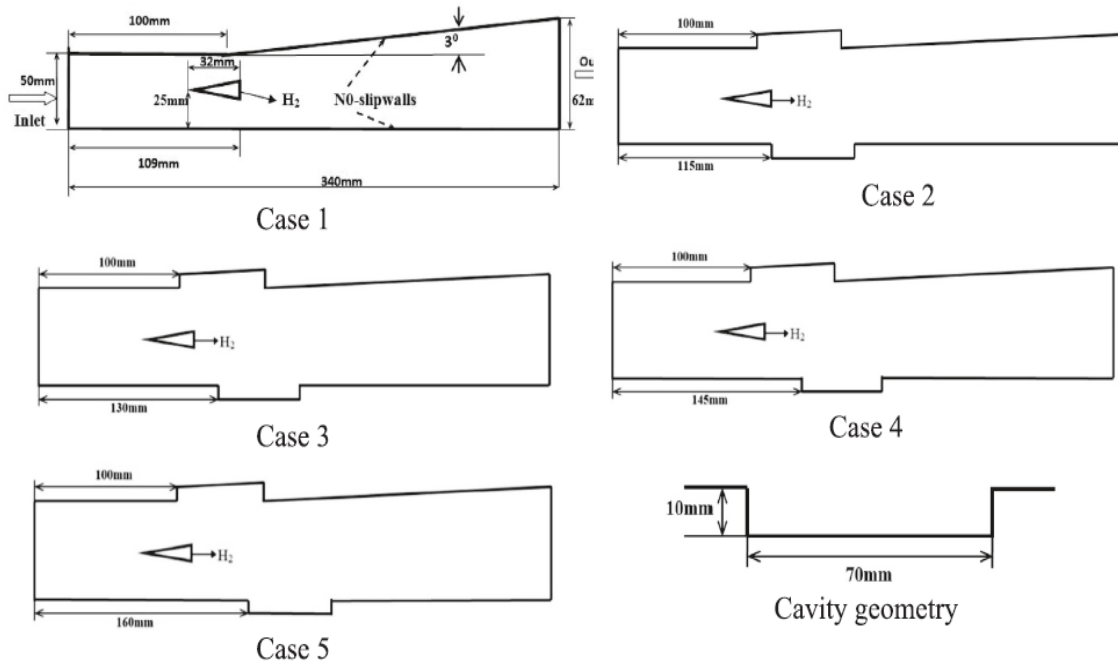
Şekil 2.12. Boşluklu ve ayırıcı plakalı scramjet yanma odasına ait şematik görünüm (Choubey ve arkadaşları, 2023)

Çift modlu scramjet motorunun daha güvenli ve dengeli çalışması için, doğrusal olmayan davranışların incelenmesi ve mod geçişlerinin kontrolü önem taşımaktadır (Yan ve arkadaşları, 2018). Yan ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında, scramjet yanma odasında mod geçiş davranışları, hem dikme destekli hem de boşluk destekli yapılandırmalar için iki boyutlu RANS denklemleri ve RNG k- ϵ türbülans modeli kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizler, mod geçişi sırasında yanma odası boyunca basınç dağılımının doğrusal olmayan bir seyir izlediğini ve bu durumun yukarı akış bölgesinde daha belirgin olduğunu göstermiştir.



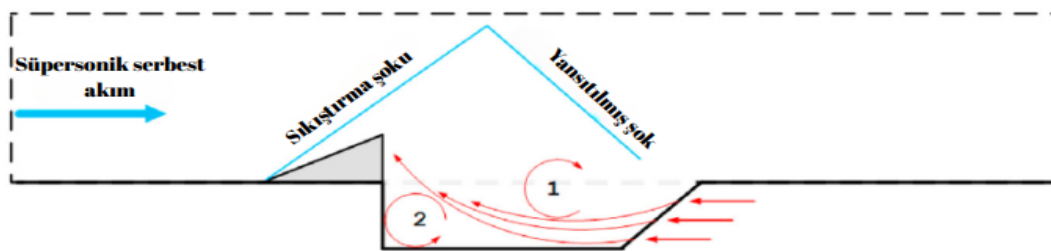
Şekil 2.13. Çift modlu scramjet yanma odasının geometrisi (Yan ve arkadaşları, 2018)

Rajesh ve arkadaşları (2023) yaptıkları çalışmada, süpersonik bir akışta, tepkime koşullarının sağlandığı durumlarda dikme tabanlı bir scramjet modeli ile çift kavite tabanlı geometrileri incelemişlerdir. Sayısal analiz sonuçları 2. ve 3. boşluk konumlarında, tam yanma %25 daha kısa yanma odası uzunluğunda elde edilebildiği ortaya konmuştur.



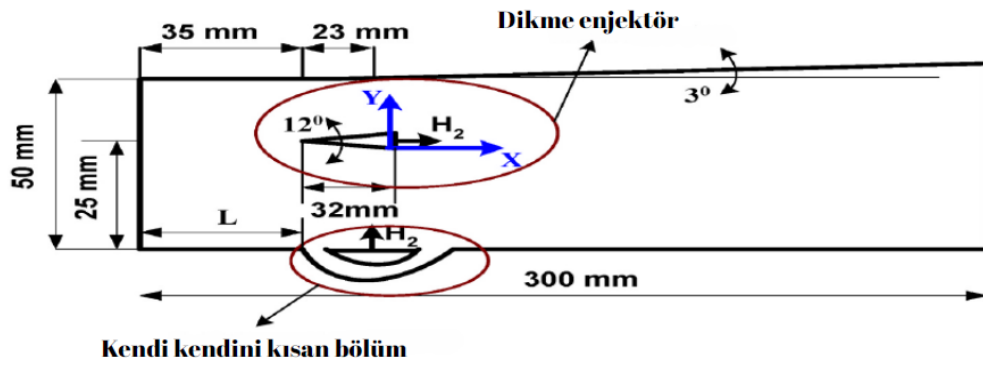
Şekil 2.14. 2D Alev tutucuların geometrileri (Rajesh ve arkadaşları, 2023)

Liu ve arkadaşları (2020) bu çalışmada, boşluk tabanlı alev tutucu içerisinde kullanılan çoklu jet enjeksiyonunun, yakıt-hava karışım performansına olan etkisini sayısal olarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, kavite önüne yerleştirilen desteğin akış yapısını belirgin şekilde etkilediğini ve arka bölgede ikincil sirkülasyon alanlarını genişlettiği belirlenmiştir.



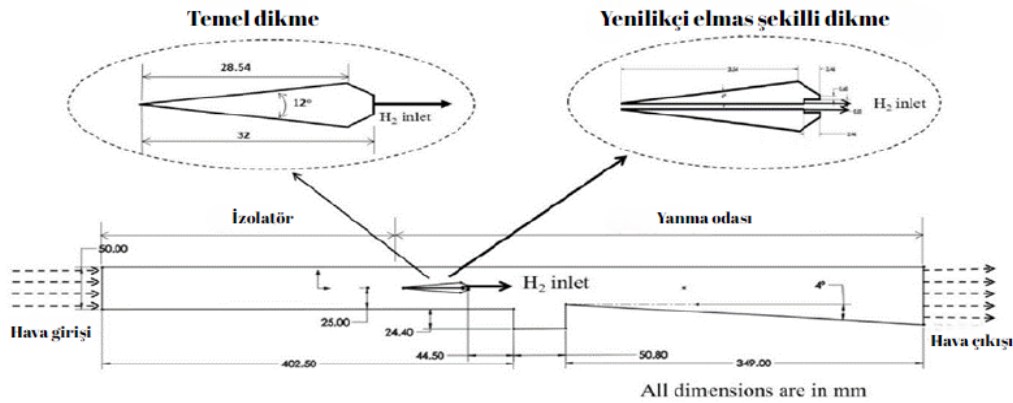
Şekil 2.15. Destek yerleştirilmiş boşluk tabanlı alev tutucu şematik modeli (Liu ve arkadaşları, 2020)

Randive ve arkadaşları (2021) tarafından dikme tabanlı scramjet yanma odası modelinde kendiliğinden kısmanın yanma performansına etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma ile, kendiliğinden kısmanın oluşum entalpisini yükselttiği ve yakıt ile havanın karışım oranını artıran güçlü şok dalgalarını meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca kendiliğinden kısma kullanımı ile yakıt-hava karışım sürecinin daha erken başladığı ve basınç kayıplarının azaldığı tespit edilmiştir.



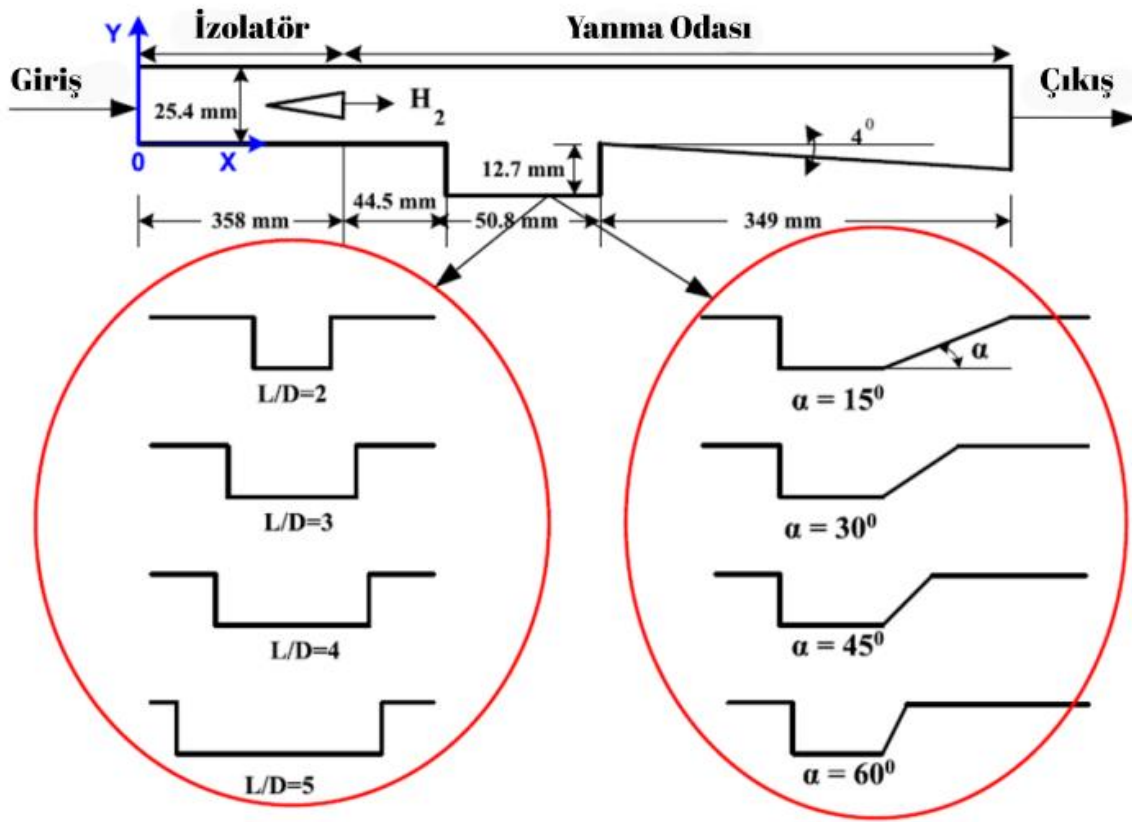
Şekil 2.16. Kendiliğinden kısma etkisine sahip dikme tabanlı scramjet yanma odası modeli (Randive ve arkadaşları, 2021)

Kireeti ve arkadaşları (2022), temel dikme geometrisi ve yenilikçi elmas şekilli dikme yapılarının scramjet yanma odası içindeki akış dinamiği, şok dalgası yapısı ve yanma karakteristikleri üzerindeki etkisini sayısal olarak incelemiştir. Sayısal analiz sonuçları, temel dikmeli yapının artan şok yansımaları sayesinde güçlü girdaplar oluşturarak yakıtın boşluk bölgesinde daha uzun süre tutulmasına olanak sağladığını göstermiştir.



Şekil 2.17. Temel dikme ve yenilikçi elmas şekilli dikme için boşluklu scramjet yanma odasının şematik gösterimi (Kireeti ve arkadaşları, 2022)

Lakka ve arkadaşlarının çalışmasında (2021), dikme tabanlı scramjet motorlarında yanma odasına entegre edilen boşluğun ve bu boşluğun geometrik özelliklerinin yanma performansına etkileri incelenmiştir. Şekil 2.18’de sayısal çalışmada kullanılan konfigürasyonlar gösterilmiştir. Boşluk kullanılan yapıdaki şok dalgalarının , boşluksuz yapıya göre daha güçlü olduğu ve bu durumun şok-kayma tabakası etkisini artırarak yoğun girdap oluşumuna ve yeniden dolaşım bölgelerini oluşturduğu gözlemlenmiştir. En uygun sonuçların $L/D=4$ ve $\alpha = 30^\circ$ değerlerinde elde edildiği ortaya konmuştur.



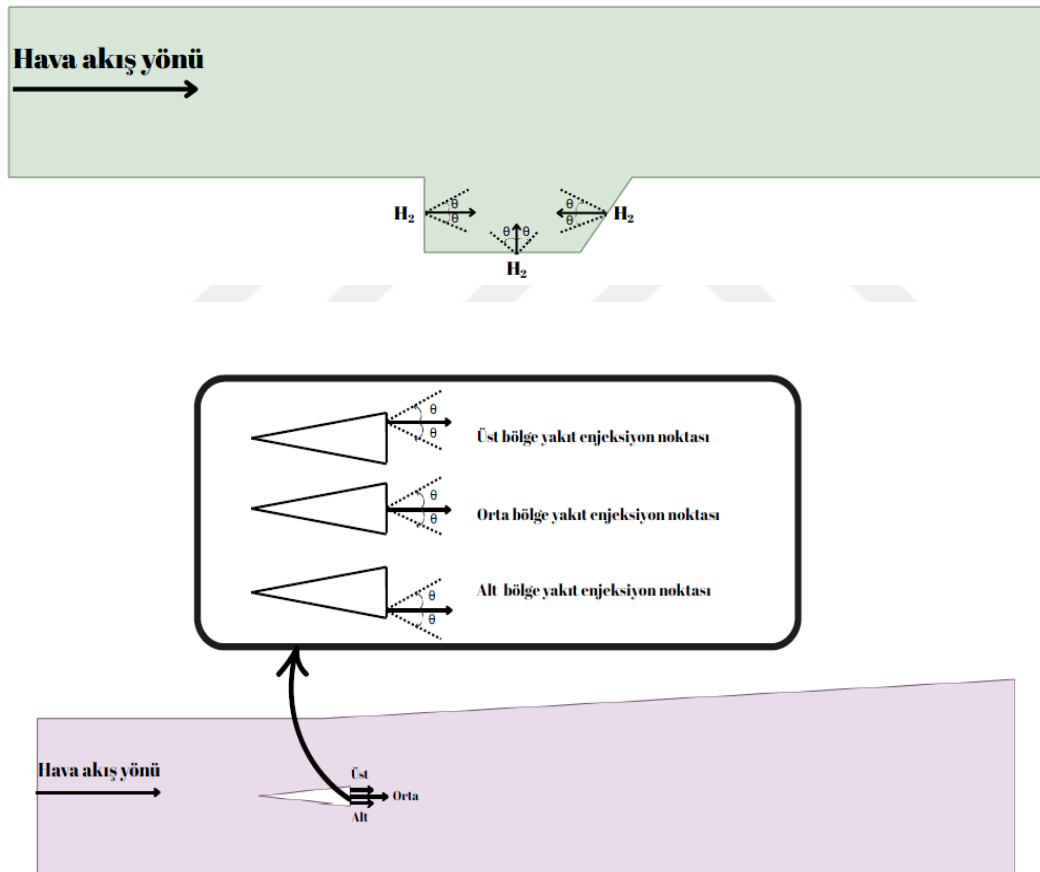
Şekil 2.18. Dikme ve boşluk tabanlı scramjet yanma odası şeması (Lakka ve arkadaşları, 2021)

Scramjet motorları üzerine yapılan araştırmalar, dikme-tabanlı alev tutucuların akış alanında oluşan gl resirkülasyon bölgeleri, gelişmiş girdap yapıları ve şok dalgası etkileşimlerinin olduğunu ortaya koymuştur. Boşluk-tabanlı alev tutucu yapıları ise akışı yavaşlatarak akışkanın bu bölgede daha uzun süre kalmasını sağlamaktadır. Böylece hava-yakıt karışımı daha homojen bir yapıya ulaşmakta ve bu durum yanma sürecinin verimini olumlu yönde etkilemektedir. Literatürde, vorteks yapılarının kuvvetlendirilmesi ve resirkülasyon bölgelerinin hacimsel olarak artırılması amacıyla çeşitli teknikler önerilmiştir. Bu teknikler arasında; yakıtın enjeksiyon yönünü ve konumunun değiştirilmesi, alternatif alev tutucu geometrilerinin kullanılması, tutucu yüzeylerinde şekil değişiklikleri yapılması, çift alev tutucu sistemlerinin tasarımı ve akışa yapay girdap kazandıran elemanların kullanımı bulunmaktadır.

Bu tez kapsamında, boşluk tabanlı alev tutucu konfigürasyonunda sol yan yüzey, alt ve sağ yan yüzey olmak üzere üç farklı konumdan; dikme tabanlı alev tutucuda ise dikme yüzeyinin st, orta ve alt bölgelerinden olmak üzere çeşitli noktalardan yakıt enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Her bir noktada $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ ve 90° olacak şekilde beş farklı püskürtme açısı uygulanarak hava-yakıt karışım özellikleri ve yanma sürecine olan etkiler sayısal olarak analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen veriler, hız vektörleri, akım çizgileri, basınç ve sıcaklık dağılımları ile su buharı konsantrasyonuna ilişkin konturlar aracılığıyla görseller sunulmuş ve detaylı şekilde yorumlanmıştır. Bu bulguların, ileri düzey alev tutucu ve dikme tabanlı tasarımlarda yanma sürecini daha verimli hle getirmek ve hava-yakıt karışımını iyi hale getirmek amacıyla yapılacak çalışmalara yön vermesi beklenmektedir.

3. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında dikme-tabanlı ve boşluk-tabanlı alev tutucu geometrileri üzerine çalışılmıştır. Şekil 3.1’ de oluşturulan alev tutucu geometrileri verilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal analizler, farklı noktalardan yapılan $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ ve 90° açılarıyla yakıt püskürtülmesi sonucu geometriler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Hava akışı 2,5 Mach hızındadır ve hidrojen yakıtı, dikme ve boşluk tabanlı alev tutucu geometrilerine 1 Mach hızında enjekte edilmiştir.



Şekil 3.1. Boşluk-tabanlı ve dikme-tabanlı alev tutucu yakıt püskürtülme konumları

3.1. Matematiksel Model

Bu çalışmada yapılan akış ve enerji analizleri, iki boyutlu, sıkıştırılabilir ve kararlı akış varsayımları altında yürütülmüştür. İlgili olarak, Denklem (1), (2) ve (3) sırasıyla kütle, momentum ve enerji korunum yasalarını göstermektedir. Burada P basıncı, H entalpiyi, u_i hızın bileşenlerini ve ρ yoğunluğu simgelemektedir.

Kütlenin korunumu

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

Momentumun korunumu

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

Enerjinin korunumu

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

3.2. Sayısal Model

Sayısal çözüm sürecinde, ortalamalı Reynolds Navier-Stokes (RANS) denklemleri temel alınmıştır. Süpersonik rejimde ortaya çıkan şok ve sınır tabaka etkileşimlerini doğru şekilde tahmin edebilmek için k - ω türbülans modeli tercih edilmiştir. k (türbülans kinetik enerjisi) ve ω (özgül yayılma oranı) büyüklüklerinin belirlenmesinde, Choubey ve diğerleri (2023) tarafından sunulan taşınım denklemleri kullanılmıştır.

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

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

Türbülans kinetik enerjisinin üretimi $\widetilde{G}_k$ ile tanımlanırken, özgül yayılma oranının üretimi $\widetilde{G}_\omega$ terimiyle ifade edilmiştir. Γ_k ve Γ_ω , sırasıyla k ve ω için etkin difüzyon katsayılarını göstermektedir. Benzer şekilde Y_k ve Y_ω terimleri k ve ω 'nın yayılım kayıplarını temsil etmektedir. S_k ve S_ω , ise kullanıcı tanımlı girişlerin bulunması durumunda devreye giren kaynak terimleridir. Çapraz-difüzyon etkisi ise D_ω terimiyle modellenmiş olup, bu ifade özgül yayılma oranı (ω) değişkeninin türbülans modeli içerisindeki difüzyon davranışını açıklamaktadır.

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

SST k - ω modelinin etkili difüzyon terimini ifade eden denklemler aşağıdaki 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 denklemleri için kullanılan türbülans Prandtl sayıları olarak tanımlanır. Türbülans viskozite terimi (μ_t) ise Denklem 9 ile ifade edilir;

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^* \alpha_1 \omega}, SF_2\right]}, \quad (9)$$

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' de 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.

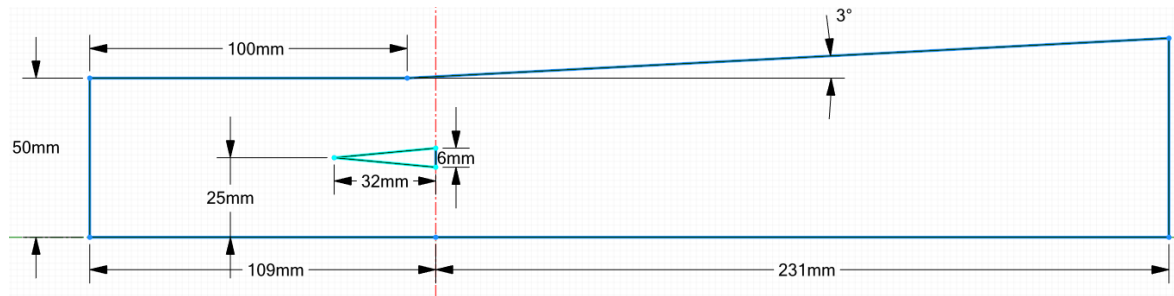
Hidrojen ve havanın yanma reaksiyonu için kütle transferi denklemi ise aşağıda verilmiştir;

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

Süpersonik rejimde gerçekleşen yanma süreçleri, türbülans etkilerinden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle, türbülans yoğunluğunun da hesaba katıldığı Eddy-Dissipation reaksiyon modeli tercih edilmiştir. Hava ile hidrojen arasındaki yanma, tek aşamalı bir kimyasal reaksiyon ($2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$) olarak modellenmiş ve bu sayede hem hesaplama süresinin kısaltılması hem de çözüm denklemlerinin sadeleştirilmesi hedeflenmiştir (Huang, 2015; Huang ve ark. 2011). Sayısal analizlerde, ANSYS Fluent 2022R1 ticari CFD yazılımı kullanılmıştır. Basınç ve hız bileşenleri arasındaki bağıntı, Coupled çözüm algoritmasıyla ele alınırken; korunum denklemlerinin ayrıklaştırılmasında ikinci mertebeden hassasiyete sahip UPWIND şeması uygulanmıştır. Yakınsama kriterleri, kütle ve momentum denklemleri için 10^{-4} , enerji denklemi için ise 10^{-6} olarak belirlenmiştir. Simülasyonlar, bu yakınsama eşiklerine ulaşıldığında sonlandırılmıştır.

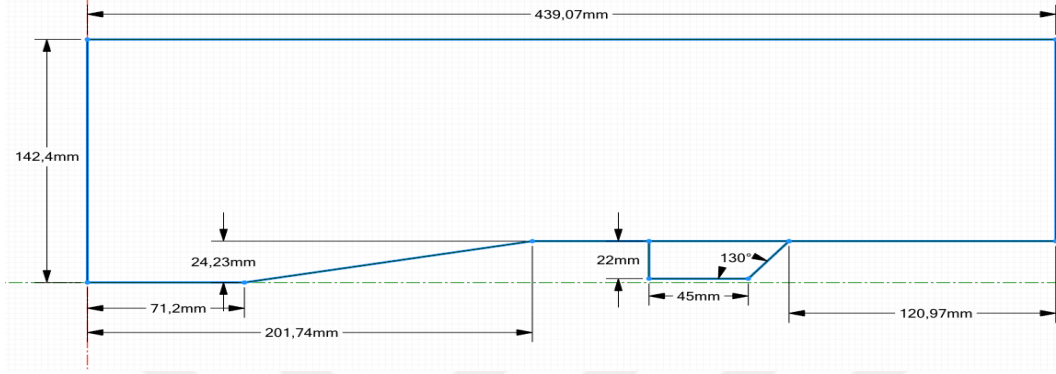
3.3. Geometrik Model

Bu çalışmada belirtildiği üzere iki boyutlu dikme-tabanlı ve boşluk-tabanlı scramjet modeli kullanılmıştır. Model olarak Alman Havacılık Merkezi'ne (DLR) ait, oldukça bilinen bir scramjet seçilmiştir. Bu model, farklı kesitlerde hız, sıcaklık ve basınç dağılımlarında sağladığı iyi performans nedeniyle tercih edilmiştir (Guerra, 1991). Şekil 3.2'de görüldüğü üzere yanma odası 340 mm uzunluğunda olup, girişteki yüksekliği 50 mm'dir. $X = -9$ mm konumundan itibaren, sınır tabakasının büyümesini dengelemek için yanma odasının üst duvarı sabit bir 3° açıyla eğimlendirilmiştir. Dikme $Y=25$ mm'e yerleştirilmiş ve enjeksiyon yuvasının genişliği 1 mm'dir (Huang,2015).



Şekil 3.2. DLR scramjet modeli (Huang,2015)

Literatürdeki birçok çalışmada, derinlik, genişlik ve arka bölge açısı gibi parametrelerin etkilerinin yaygın olarak incelendiği yamuk şekilli alev tutucular tercih edilmektedir (Yüzücü ve Kurşun, 2023). Bu çalışmada kullanılan iki boyutlu boşluk-tabanlı geometri şekil 3.3’de yer almaktadır.



Şekil 3.3. Boşluk-tabanlı scramjet geometrisi (Yüzücü ve Kurşun, 2023)

3.4. 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).

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

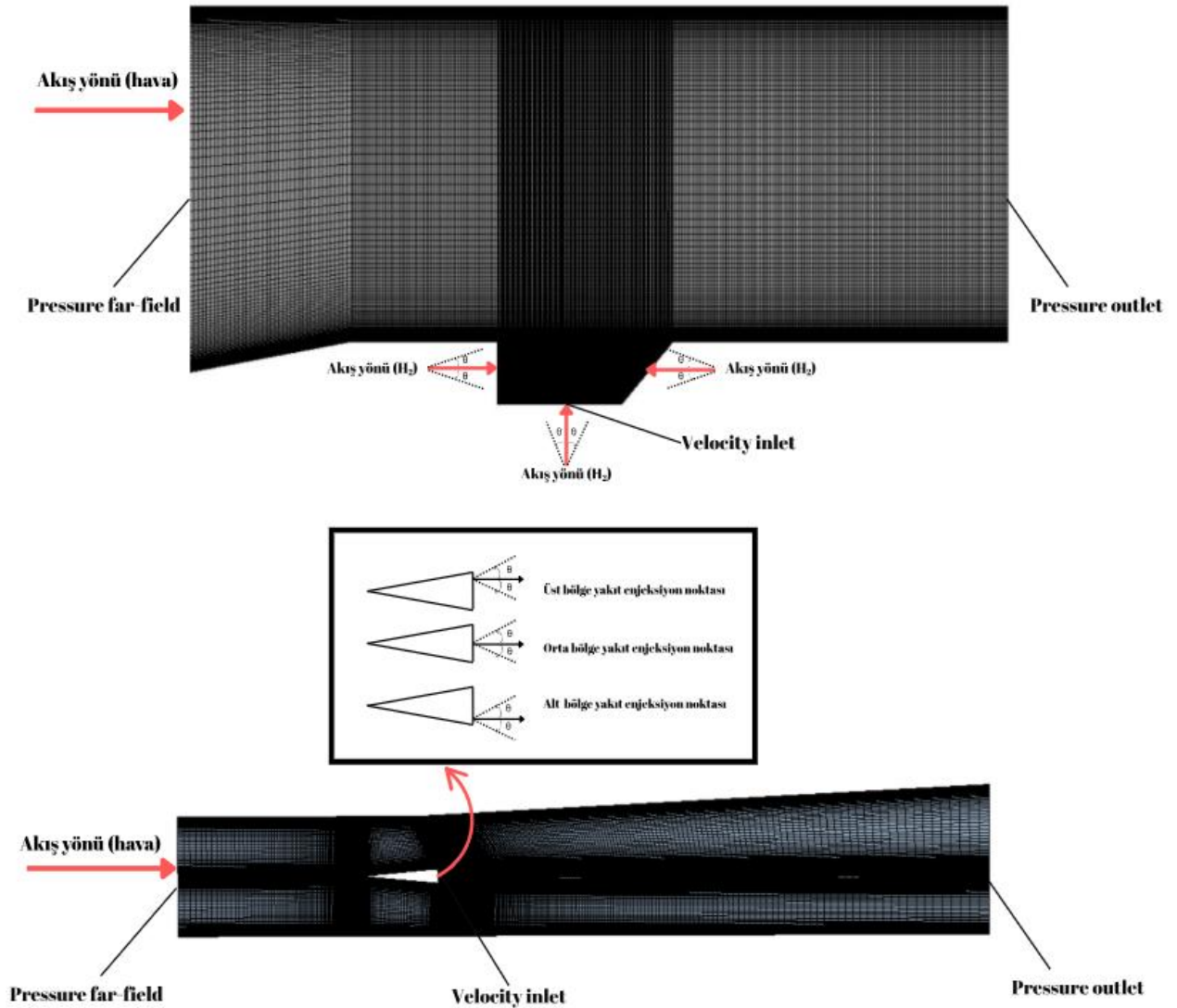
Akışkan bölgesindeki katı yüzeylerde kaymazlık sınır koşulu tanımlanmış ve değişkenlerin katı cidarlardaki değerleri aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

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

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

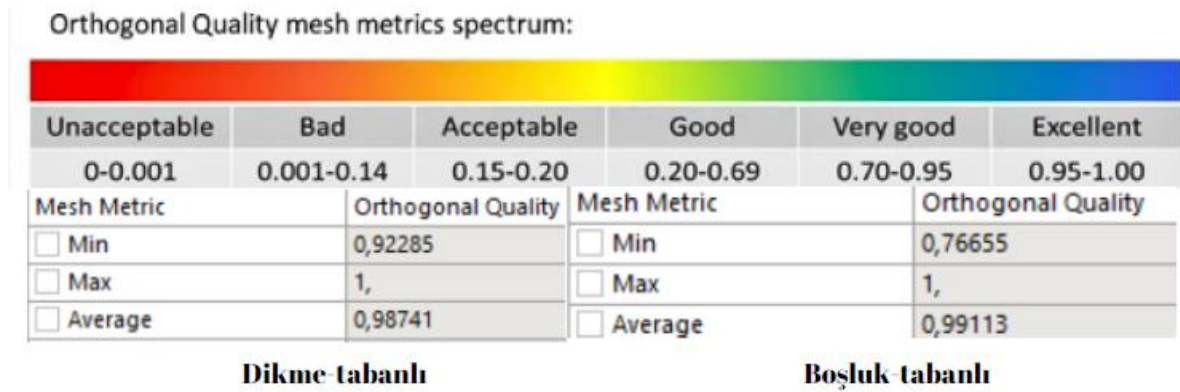
$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0, \quad (21)$$

Sayısal analizler için Şekil 3.2’ de belirtildiği üzere katı yüzeylerin yakın çevresinde daha hassas sonuçlar elde edebilmek amacıyla ağ yapısında hücre yoğunluğu artırılmıştır, dikme ve boşluk tabanlı alev tutucuya denk gelen bölgede akış özelliklerinin detaylı şekilde yakalanabilmesi için ilgili bölgelerde hücreler yoğunlaştırılarak daha ince bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisinde oluşturulan ağ yapısında 95180 düğüm ve 94400 eleman , boşluk tabanlı alev tutucu geometrisinde ise 88305 düğüm ve 87580 eleman bulunmaktadır.



Şekil 3.4. Hesaplama bölgelerindeki hücre yapısı (mesh) dağılımı

Ortogonal kalite değerleri ise Resim 3.1’de verilmiştir. En iyi değer 1 ve en kötü değer 0 olarak kabul edildiğinde, ağ sonucu en iyi değere oldukça yakındır.



Resim 3.1. Dikme ve boşluk tabanlı alev tutucu geometrileri için ağ yapısı ortogonal kalite değerleri

Çalışma parametreleri ve kullanılan akışkanların (hava ve hidrojen yakıtı) özellikleri, belirlenen koşulları şekillendirmektedir. Hava ve yakıt girişlerinde uygulanan başlangıç koşulları Tablo 3.1’de, püskürtülen yakıt konum ve açıları Tablo 3.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Hava ve yakıt girişlerine ait başlangıç koşulları

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

Çizelge 3.2. Yakıt püskürtme konum ve açıları

Alev Tutucu Tipi	Konum	Püskürtme Açısı (°)
Dikme Tabanlı	Alt Nokta	±30°, ±60°, 90°
	Orta Nokta	±30°, ±60°, 90°
	Üst Nokta	±30°, ±60°, 90°
Boşluk Tabanlı	Sol Yan Yüzey	±30°, ±60°, 90°
	Alt Yüzey	±30°, ±60°, 90°
	Sağ Yan Yüzey	±30°, ±60°, 90°

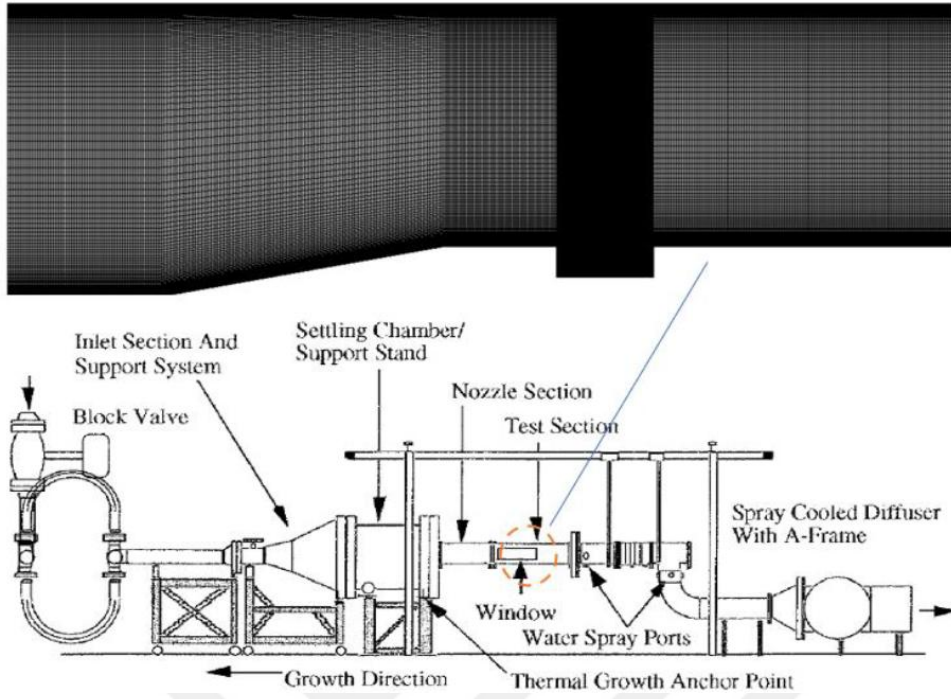
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm iki ana başlık altında ele alınmıştır. İlk bölümde, gerçekleştirilen sayısal analizlerin doğruluğu incelenmiştir. İkinci bölümde ise yapılan parametrik çalışmanın bulguları değerlendirilmiştir.

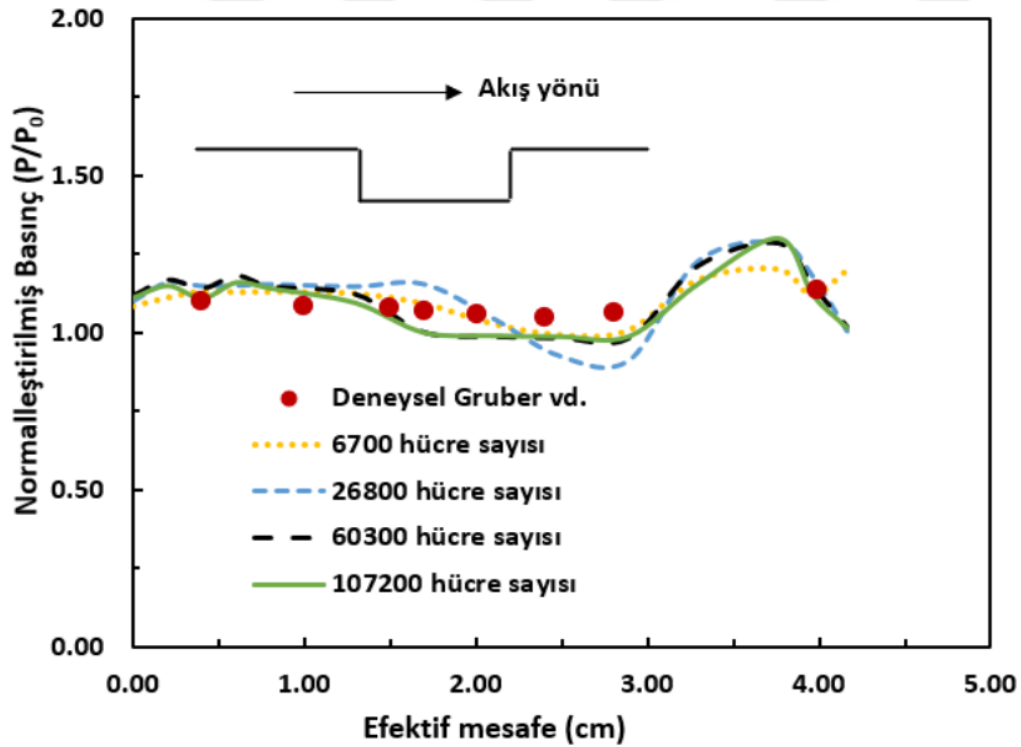
4.1. Sayısal Sonuçların Doğrulaması

Sayısal sonuçların güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla, Gruber ve arkadaşlarının 2001 yılında gerçekleştirdiği deneysel çalışmadan elde edilen veriler referans alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneğine ait şematik gösterim ile ölçümlerin gerçekleştirildiği test bölgesi Şekil 4.1’de sunulmaktadır.

Doğrulama süreci iki aşamalı olarak yürütülmüştür. İlk aşamada, ağ (mesh) bağımsızlık testi gerçekleştirilmiş ve sayısal çözümün güvenilirliği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, belirli bir hücre sayısının üzerinde elde edilen sonuçların anlamlı bir şekilde değişmediği gözlemlenerek, çözümün ağ yoğunluğundan bağımsız hale geldiği doğrulanmıştır. İkinci aşamada ise, elde edilen sayısal veriler literatürde yer alan deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Hem ağ bağımsızlığı analizine hem de deneysel verilerle yapılan karşılaştırmaya ilişkin sonuçlar Şekil 4.2.’de verilmiştir. Bu sayede model doğruluğu, iki farklı yöntemle kontrol edilmiştir.



Şekil 4.1. Gruber ve arkadaşları (2001) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya ait deneysel düzeneğin şematik gösterimi.



Şekil 4.2. Farklı hücre sayıları için elde edilen normalleştirilmiş basınç dağılımlarının, Gruber ve arkadaşlarının (2001) deneysel verileriyle karşılaştırılması

Şekil 4.2’de, farklı hücre sayılarında (6700, 26800, 60300, 107200) elde edilen normalize edilmiş basınç (P/P_0) değerlerinin, deneysel verilerle karşılaştırılması gösterilmektedir. X ekseninde efektif mesafe (cm), Y ekseninde ise normalize edilmiş basınç değerleri yer almaktadır. Grafik üzerindeki kırmızı noktalar deneysel verileri temsil ederken; farklı renk ve çizgi stilleri, çeşitli hücre sayıları ile elde edilen sayısal simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Grafik incelendiğinde, hücre sayısının 6700’den 107200’e artmasıyla birlikte simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle daha yüksek bir uyum sağladığı görülmektedir. Özellikle 60300 hücre sayısından itibaren, normalize edilmiş basınç değerlerindeki değişim %1’in altına düşmüştür. Bu durum, daha yüksek hücre sayılarında elde edilen değişimin ihmal edilebilir seviyede olduğunu ve parametrik analizler için 60300 hücre sayısının yeterli olduğunu ortaya koymaktadır. Deneysel ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırıldığında, 1,5 cm ile 3 cm mesafe aralığında en yüksek sapmanın yaklaşık % 6 olduğu belirlenmiştir. Bu sapma oranı, kullanılan sayısal yöntemin kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar sağladığını göstermektedir. Ayrıca grafikte, akış yönü bir ok ile belirtilmiş ve üstte yer alan basamaklı geometrik yapı, akış alanı üzerindeki etkilerin incelenmesi için bir referans noktası olarak kullanılmıştır.

4.2. Parametrik Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bölüm 3’te belirtilen Şekil 3.1’de dikme-tabanlı ve boşluk-tabanlı alev tutucu geometrilerinde $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ ve 90° açıları için sayısal analizler yapılmıştır.

Scramjet motorlarında, süpersonik akışın ses hızını aşması şok dalgalarının oluşumuna neden olur. Bu şok dalgaları, akışkanın şok öncesindeki hızının, şok sonrasındaki hızdan daha yüksek olmasına yol açar. Böylece, süpersonik hızla hareket eden akışkanın alev tutucu bölgesindeki kalış süresi artar ve bu durum, hidrojenin daha verimli bir şekilde yanmasını sağlar. Şok dalgaları, genel olarak iki ana kategoriye ayrılır: Normal şok dalgaları ve eğik şok dalgaları.

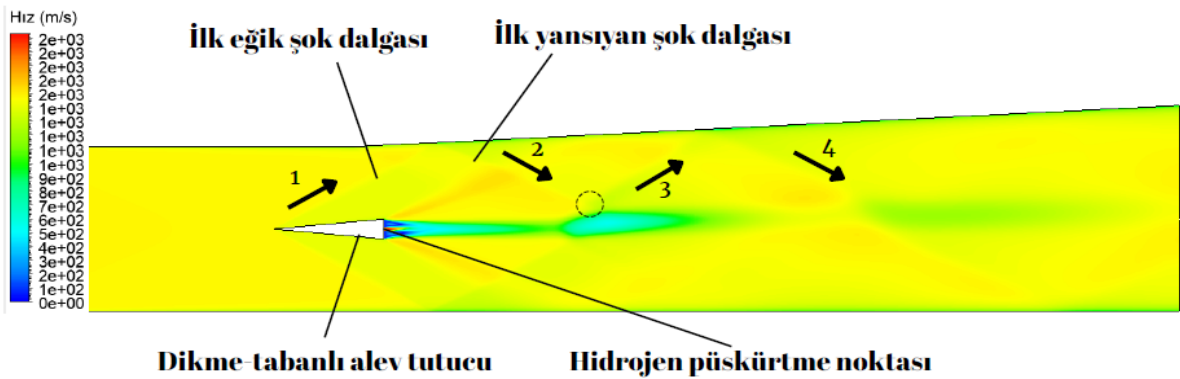
Normal Şok Dalgaları

Normal şok dalgaları, akış yönüne dik bir düzlem üzerinde oluşan şok dalgası türüdür. Bu tür şok dalgalarında, akışın giriş parametrelerinde bazı değişiklikler gözlemlenir. Yoğunluk, basınç ve sıcaklık artarken, hız ve Mach sayısı azalır.

Eğik Şok Dalgaları

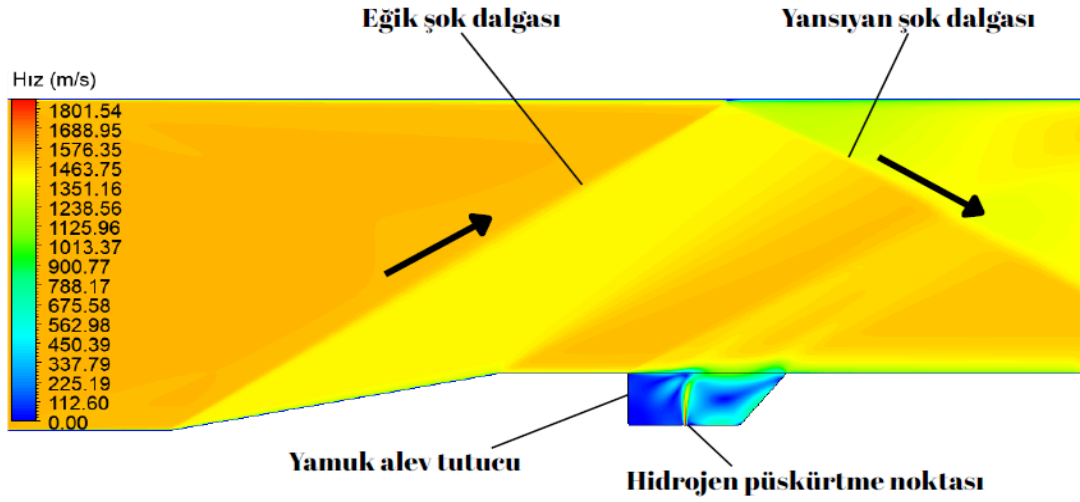
Bütün şok dalgaları, normal şok dalgaları şeklinde meydana gelmez. Akış yönüne belirli bir eğimle oluşan şok dalgalarına eğik şok dalgaları denir. Eğik şok dalgasının etkisiyle, belirli bir hızda gelen akışkan sapma açısı doğrultusunda yön değiştirir ve Mach sayısında azalma görülür. Bu süreçler, süpersonik akışın karmaşık doğasını anlamak ve scramjet motorlarının yanma süreçlerini iyi hale getirmek için kritik bir öneme sahiptir.

Şekil 4.3'te alev tutucunun ön kenarında meydana gelen ilk eğik şok dalgası (1 nolu ok), süpersonik ana akımın yapıyla etkileşmesi sonucu oluşmuştur. Bu şok dalgası, akışın yönünü ve hızını ani şekilde değiştirerek basınç artışına neden olmaktadır. Bu yapı, sıkıştırılabilecek akış koşullarında tipik olarak görülür ve özellikle yanma bölgesindeki türbülans seviyesini artırmak için önemlidir. Eğik şok dalgası üst duvara çarparak burada sınır tabaka ile etkileşime girer ve yansıyan bir şok dalgası (2 nolu ok) oluşturur. Bu yansıma, akışta yeni bir sıkıştırma bölgesi meydana getirerek, yanma öncesi bölgede basınç ve sıcaklık artışına katkıda bulunur. 3 numaralı ok ile belirtilen kısımda hidrojenin enjekte edildiği noktanın hemen arkasında, düşük hızlı bir geri akış bölgesi oluşmuştur. Karışım sürecinin uzamasına ve daha homojen bir yanma sağlanmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 4.3. Dikme-tabanlı alev tutucu için hız konturu örneği (orta noktadan 90° açıyla)

Şekil 4.4'te, rampa yapısının neden olduğu ilk eğik şok dalgası ve bu şokun üst duvardan yansıması sonucu oluşan yansıyan şok dalgası oklarla gösterilmiştir. Yamuk alev tutucunun oluşturduğu eğik şok dalgası, süpersonik akış içerisinde üst duvara yönelmekte ve burada sınır tabaka ile etkileşime girerek yansıyan bir şok dalgası meydana getirmektedir.

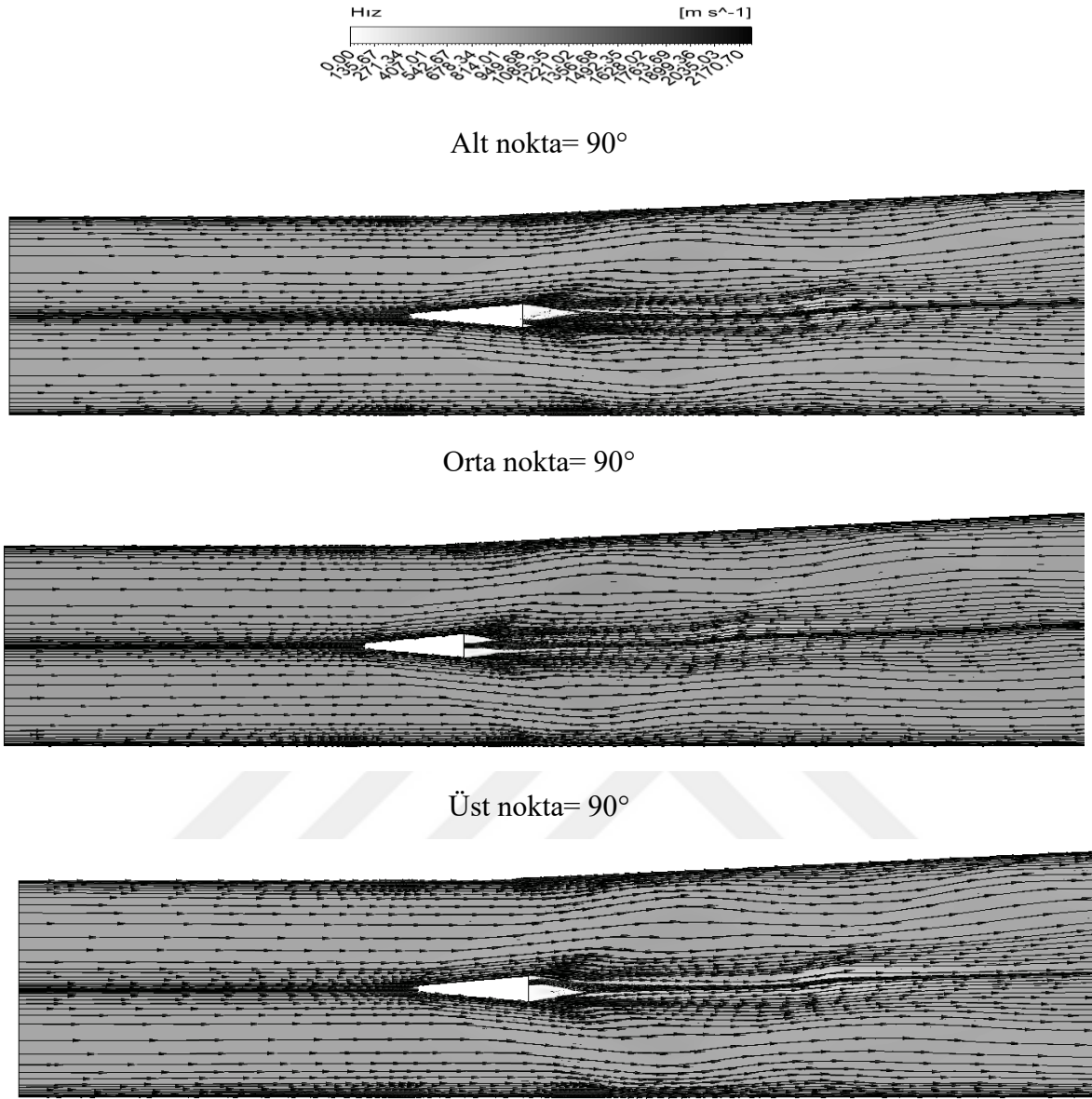


Şekil 4.4. Yamuk alev tutucu için hız konturu örneği (alt yüzeyden 90° açıyla)

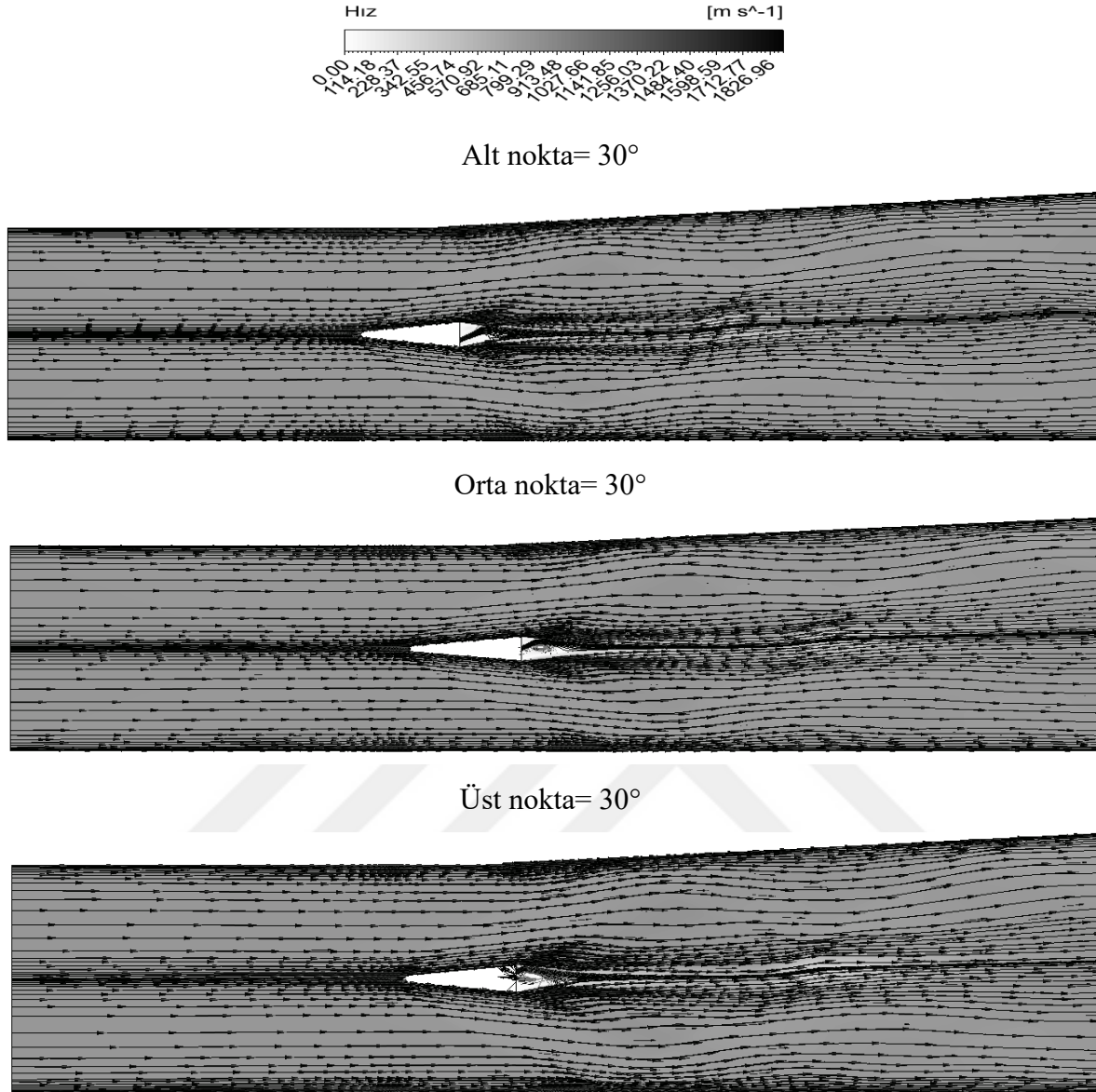
Bu çalışmanın temel hedefi, alev tutucu geometrisi yardımıyla hava akışının hidrojenin püskürtüldüğü bölgede daha uzun süre kalmasını sağlamak ve böylece hidrojen-hava karışımının daha homojen hale gelmesini mümkün kılarak yanma etkinliğini artırmaktır. Hidrojenin daha fazla miktarda ve daha dengeli bir şekilde yanmasını sağlamak, doğrudan alev tutucunun geometrik yapısıyla ilişkilidir. Bu tez çalışmasında dikme-tabanlı ve boşluk-tabanlı alev tutucu geometrilerinde farklı konumlardan beş farklı açıyla hidrojen yakıtı püskürtülmesi sonucu elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

4.2.1. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisi

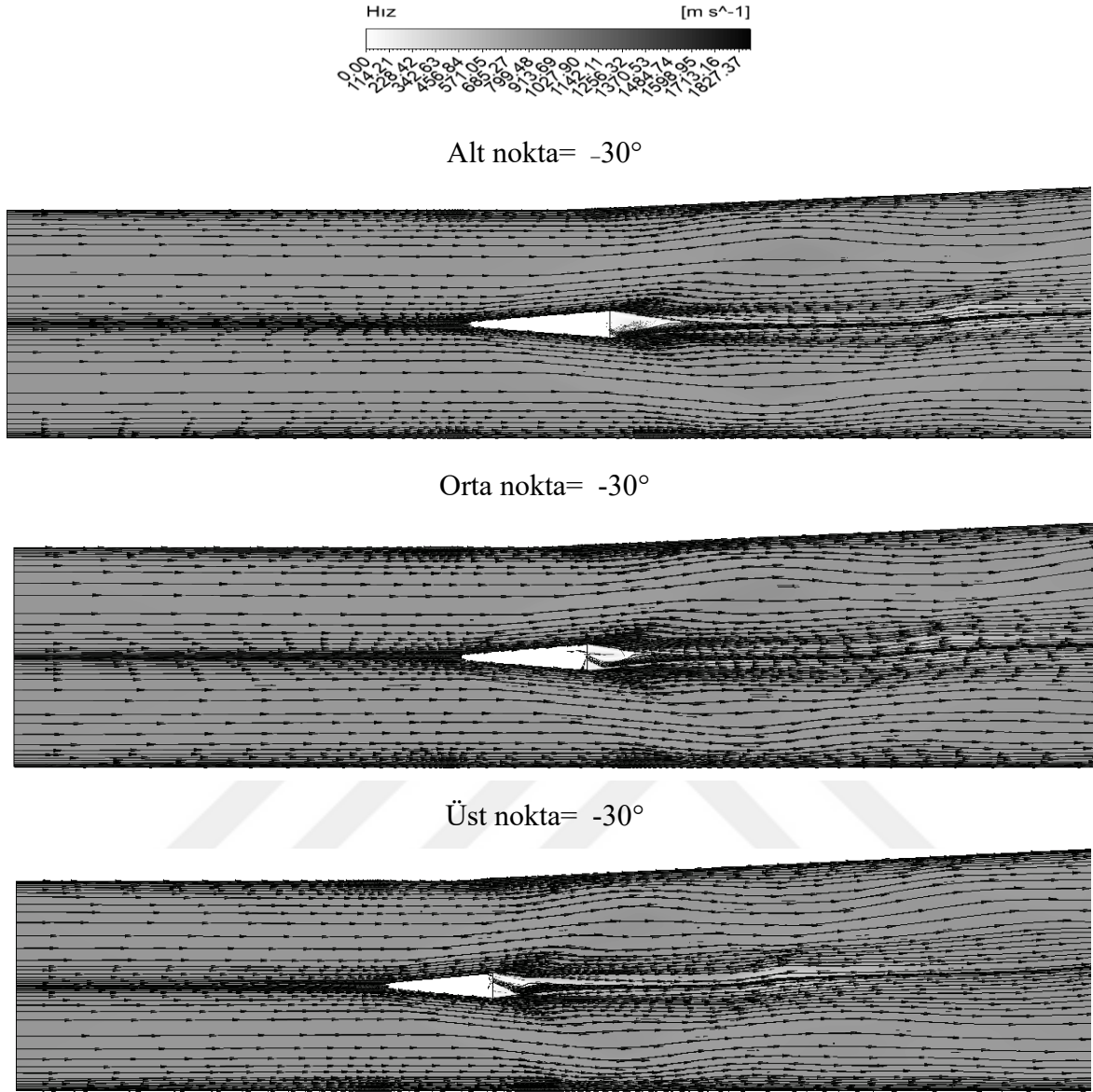
Bu bölümde, dikme-tabanlı alev tutucudan farklı açılarla ve üç farklı konumdan (alt, orta ve üst noktalar) yapılan yakıt püskürtmesi sonucunda oluşan akım çizgileri ve hız vektörlerine yer verilmiştir. Analiz sonuçları, püskürtme parametrelerinin (açı ve konum) akış alanındaki momentum aktarımı, geri akım oluşumu ve jet yayılımı gibi unsurları doğrudan etkilediğini ortaya koymuştur. Şekil 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 ve 4.9’da sırasıyla $\theta = 90^\circ$, 30° , -30° , 60° ve -60° için elde edilen sonuçlar sunulmuştur. 90° püskürtme açısı için tüm konumlarda (alt, orta ve üst noktalar) akış simetrik bir yapı sergilemektedir. Özellikle orta noktadan yapılan püskürtmede, hava-yakıt karışımı simetrik şekilde her iki yöne yayılmakta ve karışım bölgesi daha dengeli oluşmaktadır. Bu yapı, alev tutucunun etkili bir şekilde geri tepme önlemesi açısından önemlidir. 30° gibi daha yatay bir açıyla yapılan püskürtme senaryolarında ise akış çizgilerinde asimetrik bir yapı oluşturmaktadır. Özellikle üst noktadan yapılan püskürtmelerde jet akışı üst bölgeye doğru sapmakta, bu da karışımın homojenliğini azaltmaktadır. Orta noktadaki püskürtme daha dengeli bir dağılım sağlasa da, 90° ’lik duruma kıyasla geri akım bölgesi daha dar ve daha kısa yapıda gözlenmektedir. -30° açılı püskürtmelerde, akış yönü aşağıya doğru sapmaktadır. Alt noktadan yapılan püskürtmedeki akış duvara daha yakın seyretmekte ve bu durum sınır tabaka gelişimini doğrudan etkilemektedir. Orta noktadaki püskürtmede ise akışın merkez hattına göre aşağı yönde sapma eğiliminde olduğu, dolayısıyla geri akım bölgesinin şekil ve büyüklüğünde önemli değişikliklere yol açtığı gözlemlenmiştir. 60° püskürtme açısı, nispeten daha dik bir akış yönelimi sağlamak ve özellikle orta noktadan püskürtmede akışın daha homojen bir şekilde merkez eksen etrafında dağıldığı görülmektedir. Alt ve üst noktalarda ise akım çizgilerinin saptması artmakta, bu da düşük hızlı bölgelerin yer değişimine neden olmaktadır. Hız vektörlerinin yoğunluğu, karışım bölgesinin daha aktif ve türbülanslı olduğunu göstermektedir. -60° püskürtme açısı durumunda, akış belirgin şekilde alt bölgeye sapmaktadır. Bu durum özellikle üst noktadan püskürtmede akışın dikmenin alt tarafına yönlenmesine ve dolayısıyla simetrik olmayan bir karışım oluşmasına neden olmaktadır. Hız vektörlerinin dağılımı, alt bölgede yüksek hız gradyanları oluştururken, üst bölgede akışın zayıfladığı gözlenmektedir. Bulgular, püskürtme açısı ve konumunun yanma verimi, geri tepme önleme ve karışım dengesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle 90° orta noktadan püskürtmenin, daha istikrarlı bir akış yapısı oluşturduğu gözlemlenmiştir.



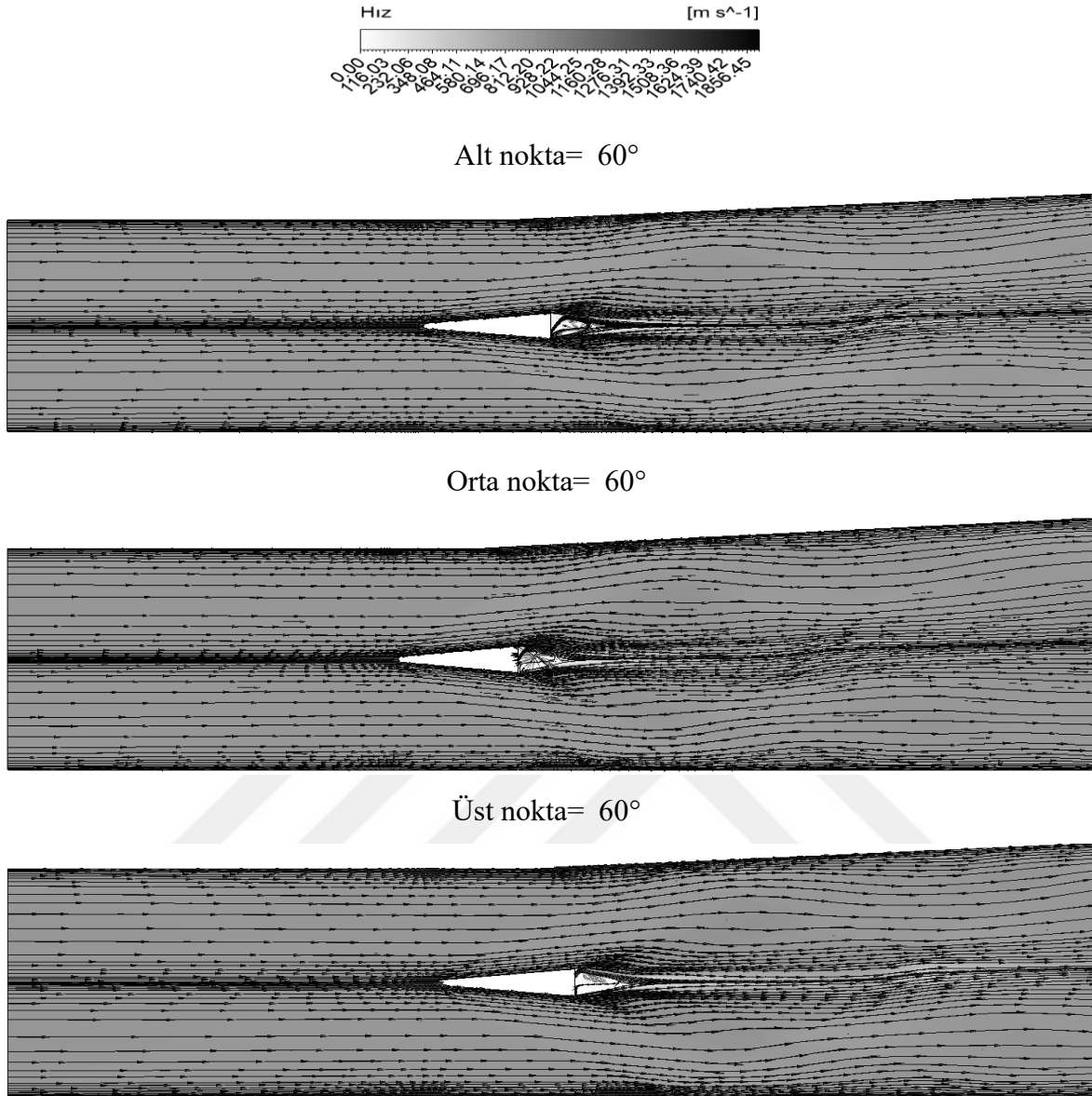
Şekil 4.5. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 90^\circ$)



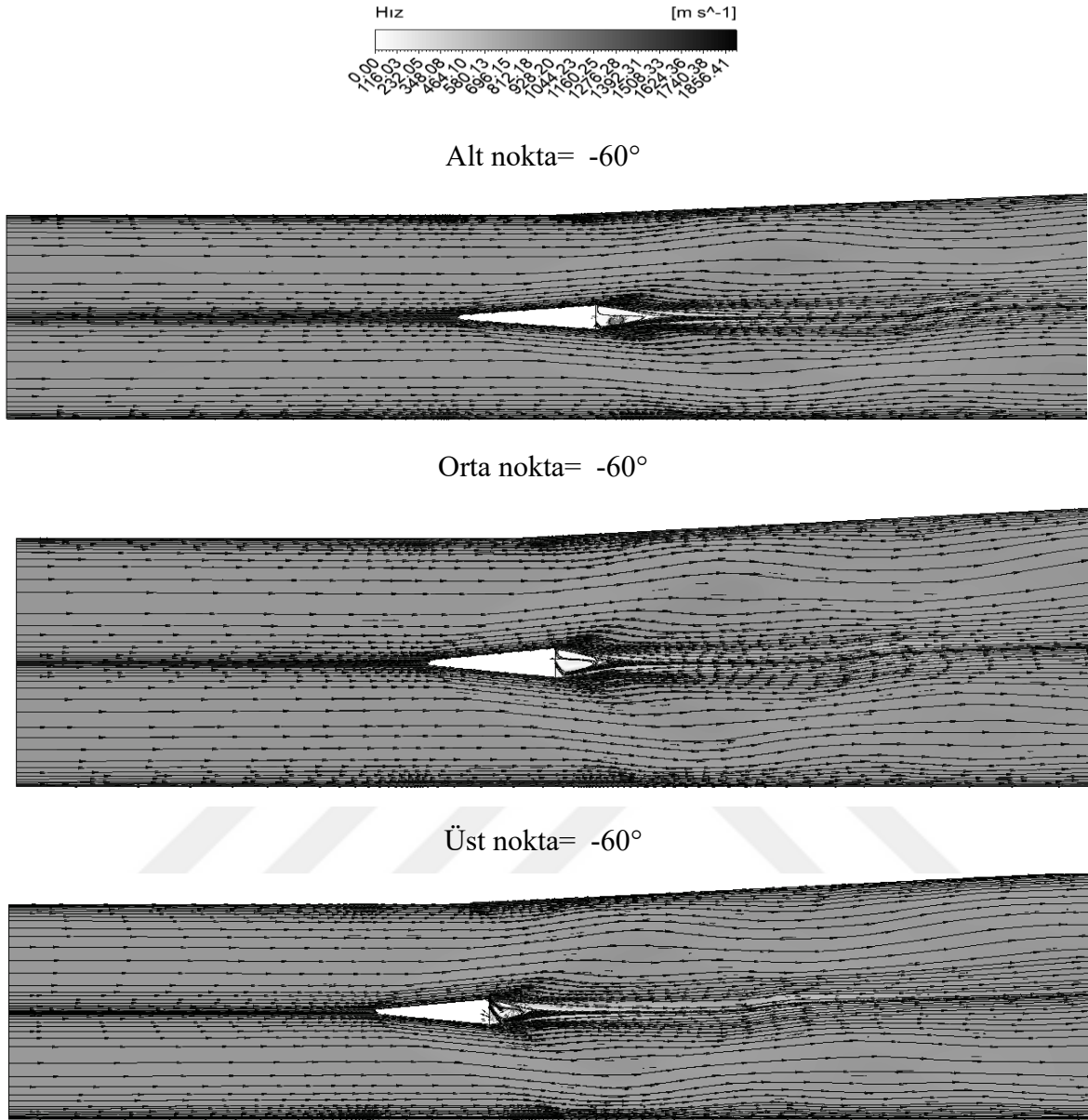
Şekil 4.6. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 30^\circ$)



Şekil 4.7. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = -30^\circ$)

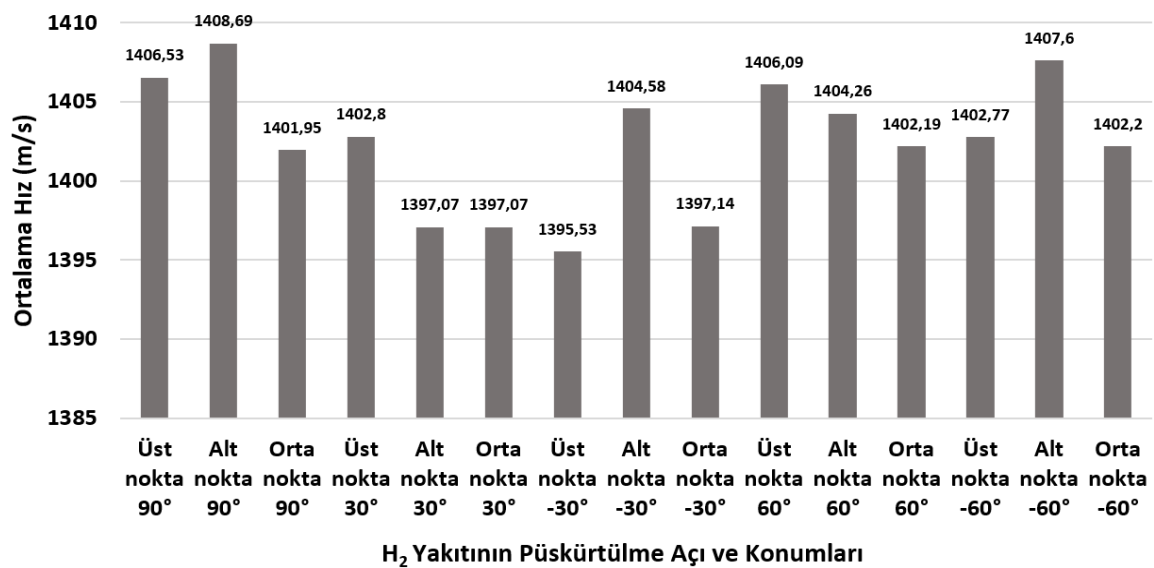


Şekil 4.8. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 60^\circ$)



Şekil 4.9. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = -60^\circ$)

Şekil 4.10'da, farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre elde edilen ortalama hız değerleri grafiksel olarak sunulmuştur. 90° püskürtme açısında, özellikle alt noktadan yapılan püskürtme sonucunda en yüksek ortalama hız değeri olan 1408,69 m/s elde edilmiştir. Aynı açıyla üst noktadan yapılan püskürtmeyle elde edilen 1406,53 m/s değeri de oldukça yüksektir. Bu sonuçlar, 90°'lik açıyla yapılan püskürtmelerin genel olarak daha yüksek enerji aktarımı sağladığını ve dolayısıyla karışımı güçlendirdiğini göstermektedir. 30° ve -30° açıları, genel olarak daha düşük hızlar üretmiştir. Bunun sebebi, akışın akım yönüne fazla paralel olması nedeniyle ana akışa etkisinin sınırlı kalmasından kaynaklanmaktadır. 60° açıyla yapılan püskürtmelerde üst ve orta noktalarda sırasıyla 1406,09 m/s ve 1402,19 m/s gibi yüksek hız değerleri üretmiştir. Bu açıda akış akıma yakın bir yönle ilerlediğinden, akım çizgileriyle uyumlu bir yapı oluşturarak etkili karışım sağladığı gözlemlenmiştir. -60° püskürtmelerde ise en yüksek değer 1407,6 m/s ile alt noktada elde edilmiştir. Bu sonuç dikkat çekicidir; çünkü ters yönlü jetin alt bölgeye etki ederek belirgin bir hızlanma sağladığını ortaya koymaktadır. Ortalama hız dağılımı incelendiğinde, özellikle 90° ve 60° gibi yüksek açılarla üst ve alt konumlardan yapılan püskürtmelerin, yüksek hız bölgeleri oluşturarak karışımı artırdığı ve alev tutucunun verimli çalışmasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, 30° ve -30° gibi düşük açılar sınırlı hız artışı sunmakta ve karışım açısından belirgin bir avantaj sağlamamaktadır. Ayrıca, alt noktadan yapılan püskürtmelerde hızın daha yüksek olması, bu bölgede oluşan hız çekirdeğiyle ilişkilendirilebilir.



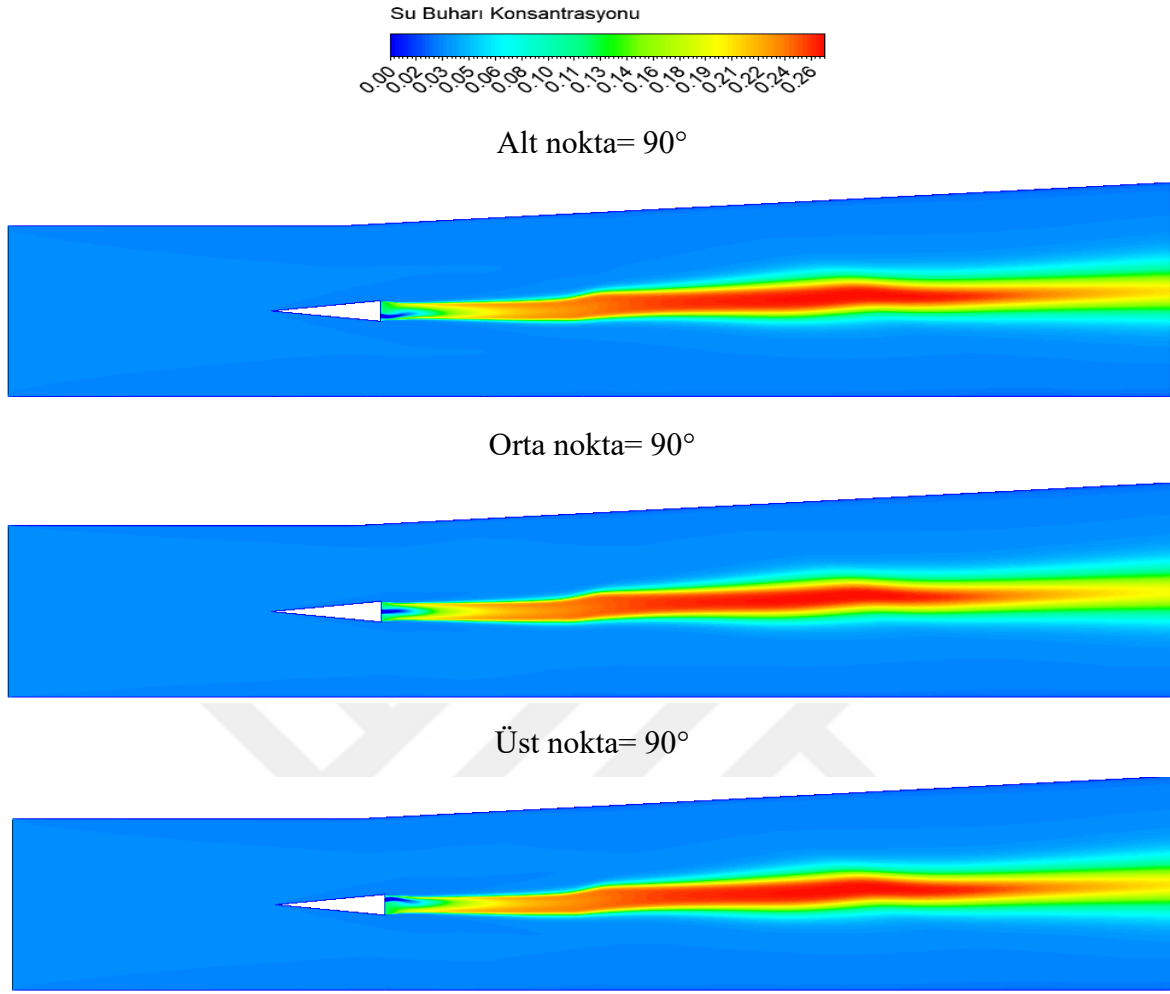
Şekil 4.10. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisinde H₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama hız dağılımı

Şekil 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15’de su buharı konsantrasyon dağılımlarına yer verilmiştir. Su buharı konsantrasyon dağılımı renk skalası mavi renk (düşük konsantrasyon) ve kırmızı renk (yüksek konsantrasyon) arasında değişmektedir. Dik açıyla yapılan püskürtmelerde tüm konumlarda kararlı ve simetrik bir konsantrasyon profili elde edilmiştir. Şekil 4.11’de görüldüğü üzere, dik açıyla yapılan püskürtmelerde üst nokta püskürtmesi %5,13 ortalama su buharı konsantrasyon değeri ile en belirgin kırmızı bölgeye sahiptir ve bu bölge eksen boyunca simetrik olarak uzanır.

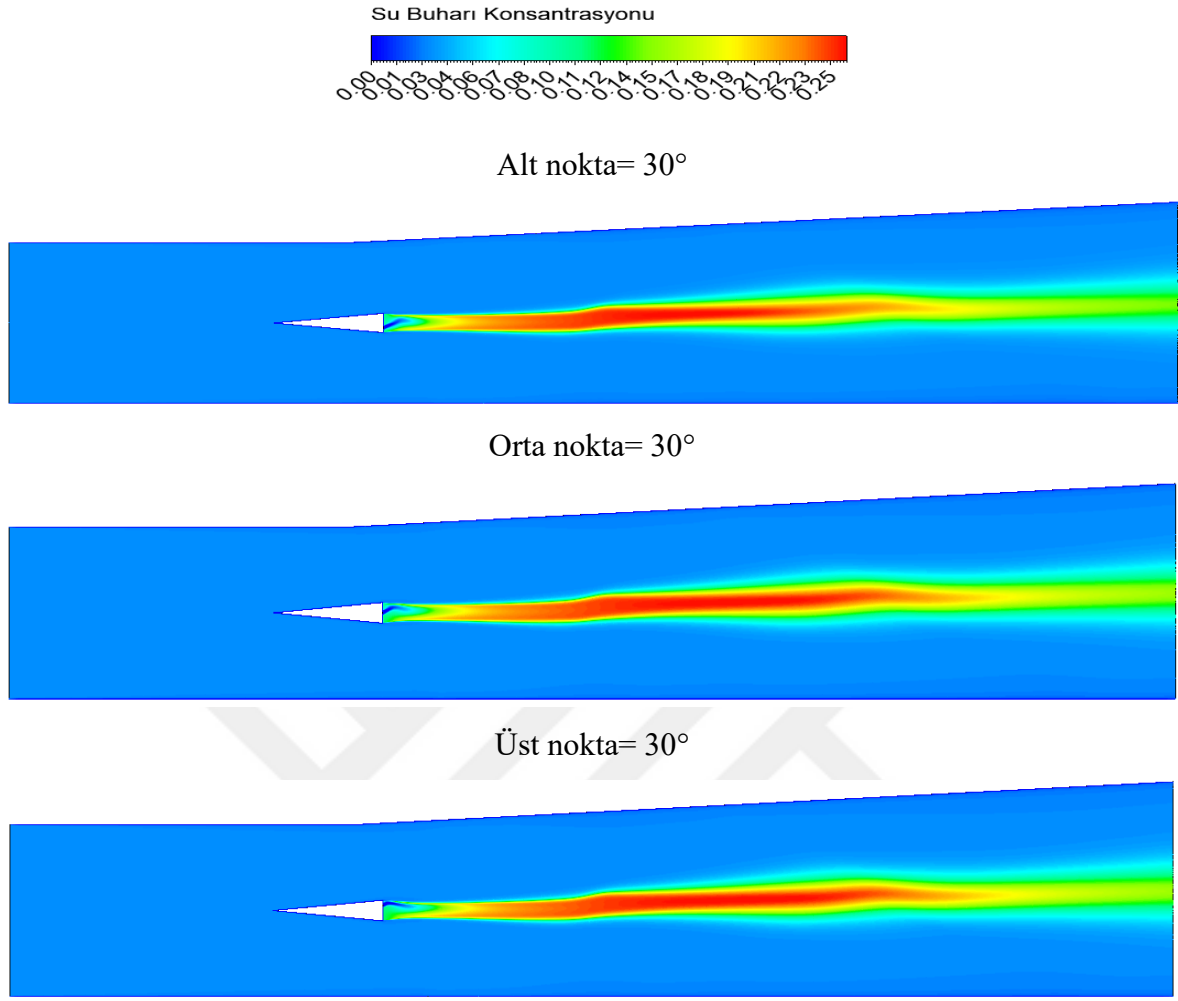
30° açı için renk skalasına bakılacak olursa püskürtmelerde karışımın yönü değişmiş, buhar yoğunluğu eksen dışına sapmıştır. 30° açılı püskürtmelerde, akışın yukarı eğimli olması nedeniyle özellikle üst noktadan püskürtmelerde konsantrasyon alanı yukarı sapmaktadır. Orta noktadan yapılan püskürtmede daha merkezlenmiş ve homojen bir dağılım elde edilmiştir. -30° açıda ise akış aşağıya doğru yönelmiş ve özellikle alt noktadan yapılan püskürtmelerde su buharı konsantrasyonu alt duvara yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır.

60°’de tüm konumlarda kırmızı bölge daha kısa mesafede sona ermektedir, bu da karışımın daha az yayılabildiğini ve akışın hızla sönümlendiğini gösterir. Püskürtme sonuçlarına göre, akış daha dik bir yönelime sahiptir ve bu durum su buharı konsantrasyonunun daha kısa mesafede yayılıp sonra zayıflamasına neden olmuştur.

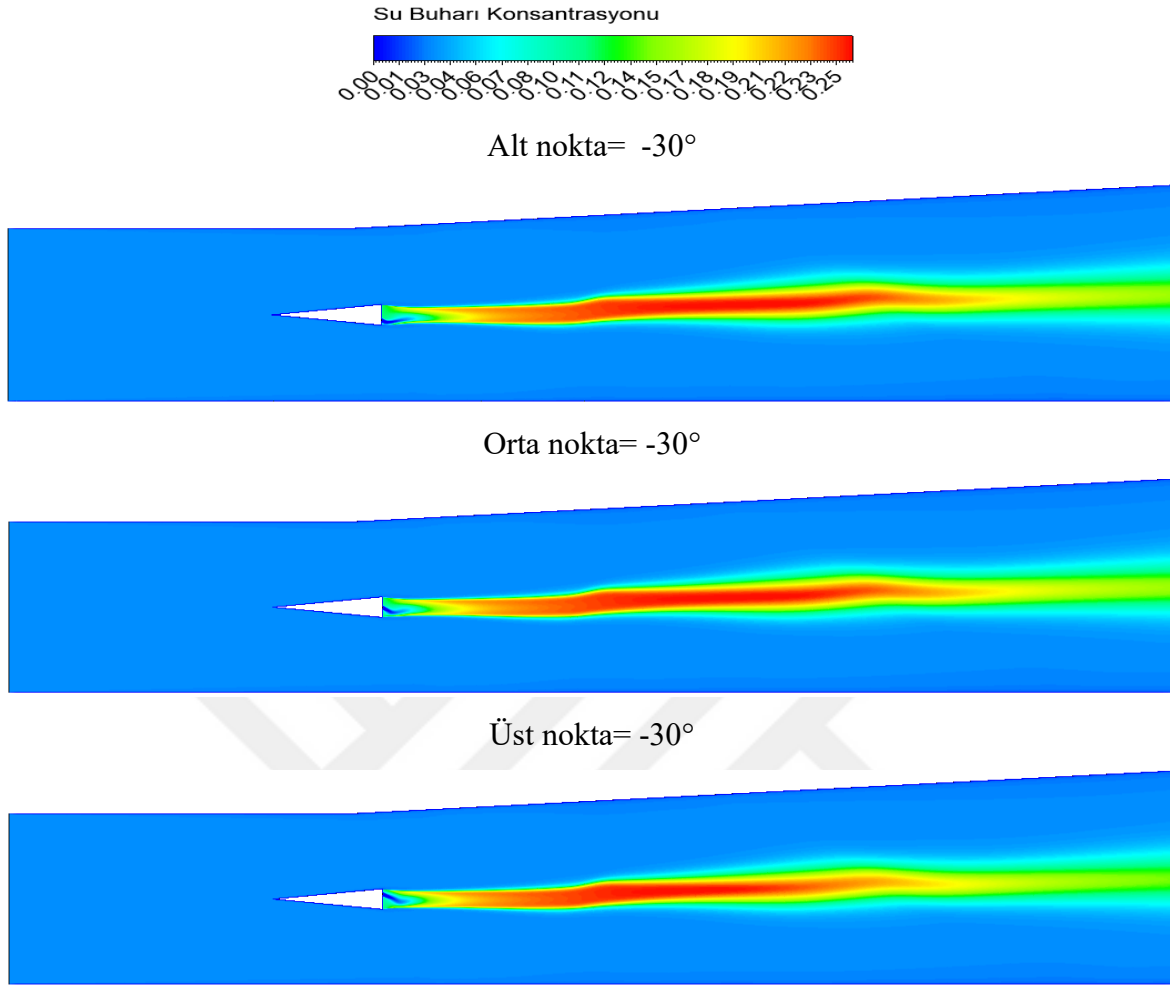
Şekil 4.15’de -60° durumunda, üst noktadan püskürtmede kırmızı alan belirgin şekilde alt tarafa sapmıştır, yoğunluk alt bölgeye yönelmiştir. Böylece elde edilen sonuçların daha önce elde edilen hız vektörü dağılımlarıyla örtüşmekte olup, akışın simetrik karakterde geliştiğini ve karışımın düzgün yayıldığını göstermektedir. Ayrıca 90° üst noktadan püskürtmede en yüksek su buharı değeri elde edilmiş olsa da orta noktadan püskürtmenin en homojen ve yönlendirilmiş dağılımı sağladığı gözlemlenmiştir.



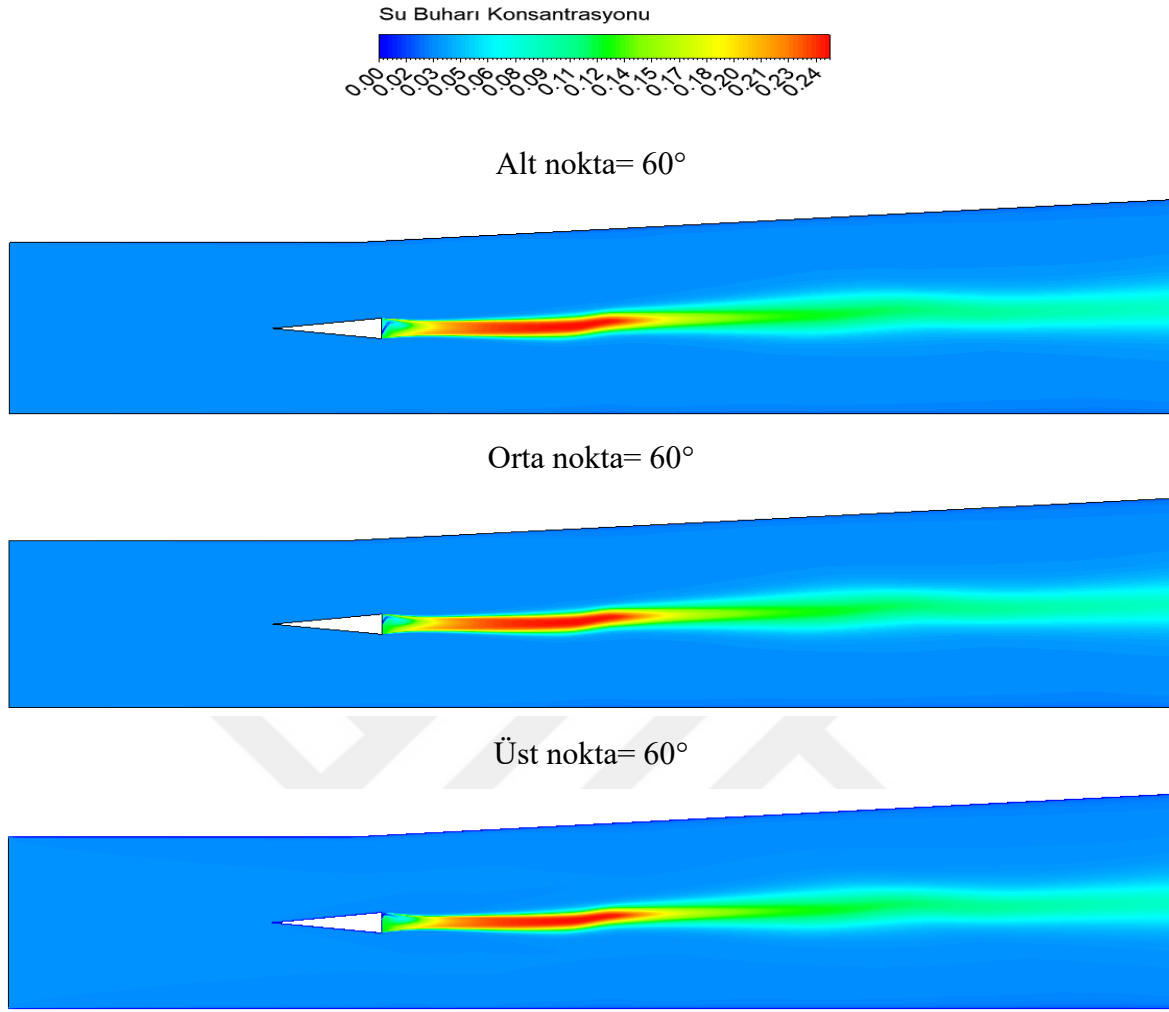
Şekil 4.11. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 90^\circ$)



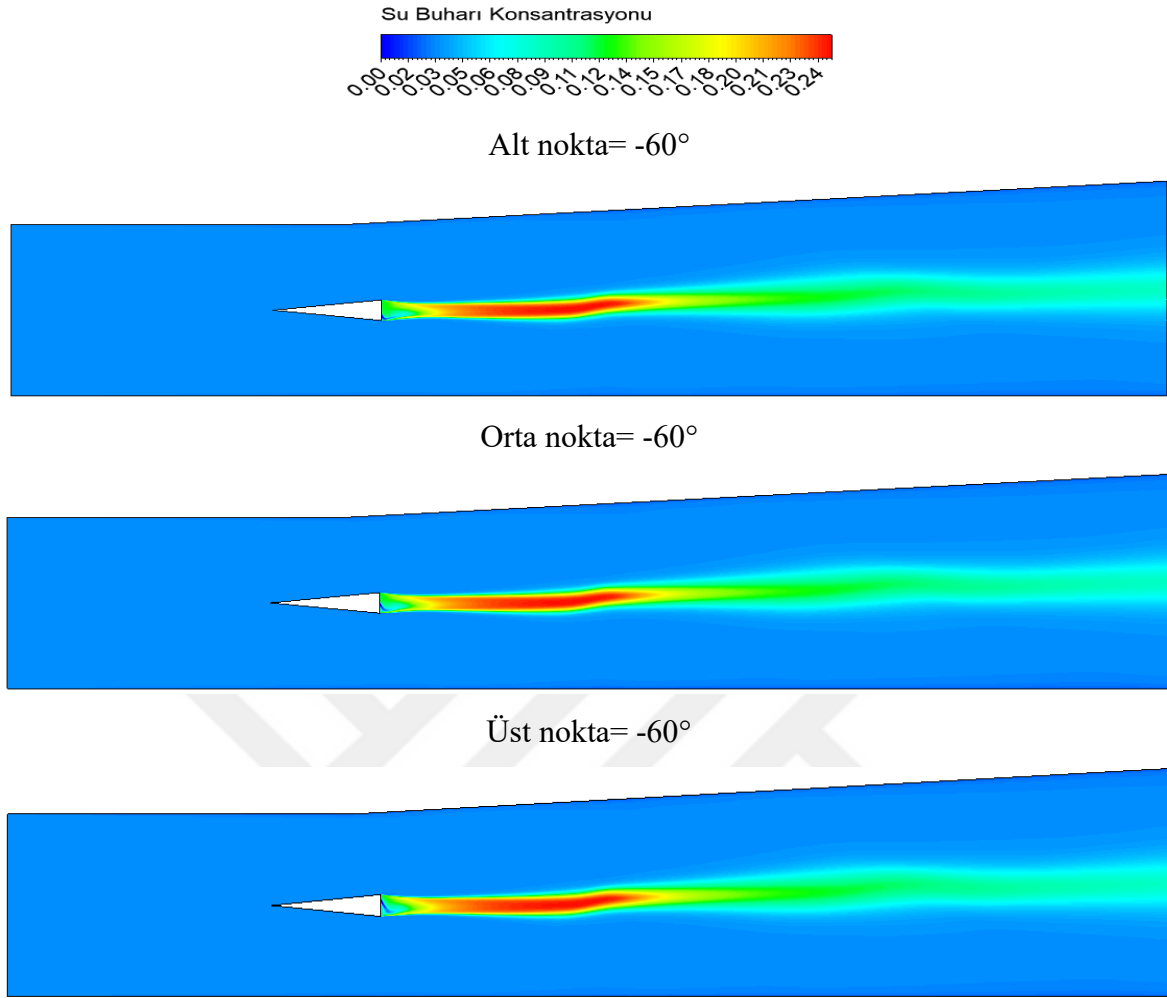
Şekil 4.12. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 30^\circ$)



Şekil 4.13. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = -30^\circ$)

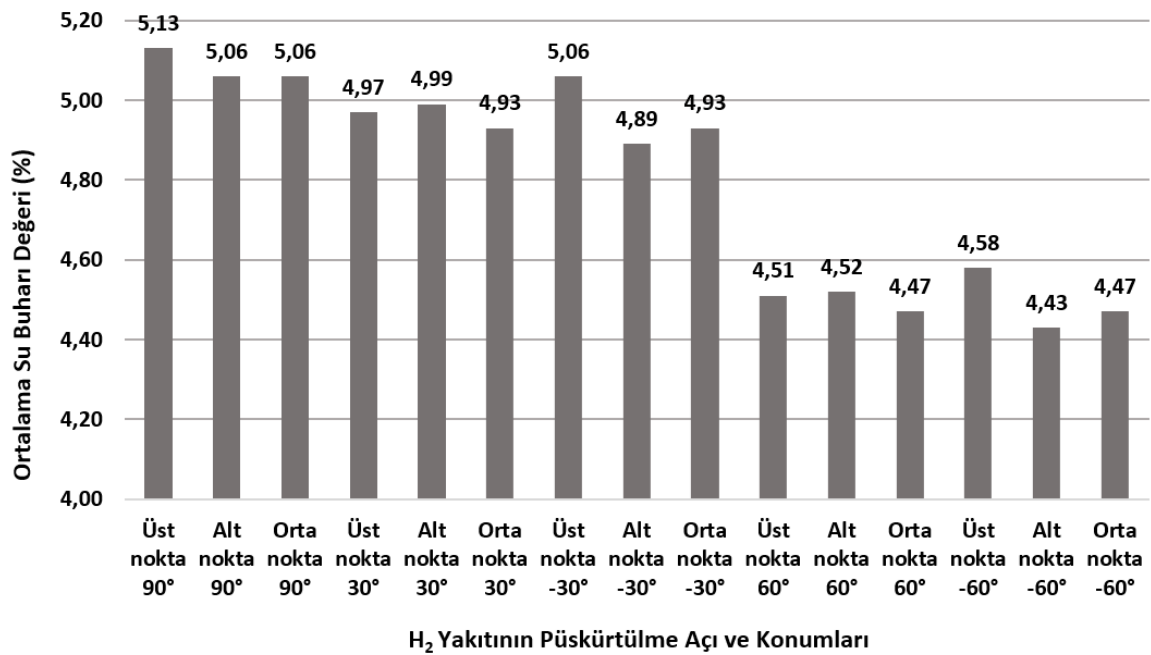


Şekil 4.14. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 60^\circ$)



Şekil 4.15. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = -60^\circ$)

Şekil 4.16’da, dikme-tabanlı alev tutucu sisteminde H_2 yakıtının farklı püskürtme açıları ve konumlarına göre elde edilen ortalama su buharı değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu değerler, yanma sonrası oluşan ürün yoğunluğunu ifade etmekte olup, karışım kalitesi ve yanma verimliliği açısından önemli bir göstergedir. 90° püskürtme açısı, genel olarak en yüksek su buharı konsantrasyonlarının elde edildiği konfigürasyon olmuştur. Özellikle üst noktadan yapılan püskürtme ile %5,13’lük en yüksek ortalama değere ulaşılmıştır. Alt ve orta noktalar da benzer şekilde %5,06 değerindedir. Bu durum, yakıtın akışa dik püskürtülmesiyle birlikte karışım bölgesinin genişlediğini ve yanmanın daha verimli gerçekleştiğini göstermektedir. Bu bulgu, Şekil 4.11’deki kontur dağılımında kırmızı renk alanının uzamış ve simetrik bir yapıda olmasıyla da desteklenmektedir. 30° püskürtme açısında, üst, orta ve alt noktalardan yapılan püskürtmeler benzer su buharı değerleri üretmiş, karışım yaygın ve dengeli bir şekilde gerçekleşmiştir. -30° açılı püskürtmelerde ise alt noktadaki düşük değer karışım dengesizliğini desteklemektedir. 60° ve -60° açılarla yapılan püskürtmelerde, genel olarak en düşük ortalama su buharı değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.14 ve 4.15’de kırmızı bölge hem kısa mesafeye yayılmış hem de daha düşük değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Püskürtme konumu olarak üst nokta, birçok açı için daha yüksek su buharı konsantrasyonu sağlamış ve bu yönüyle karışım kalitesini olumlu etkilemiştir.



Şekil 4.16. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisinde H_2 yakıtının farklı püskürtme açı ve konumlarına göre ortalama su buharı değer dağılımı

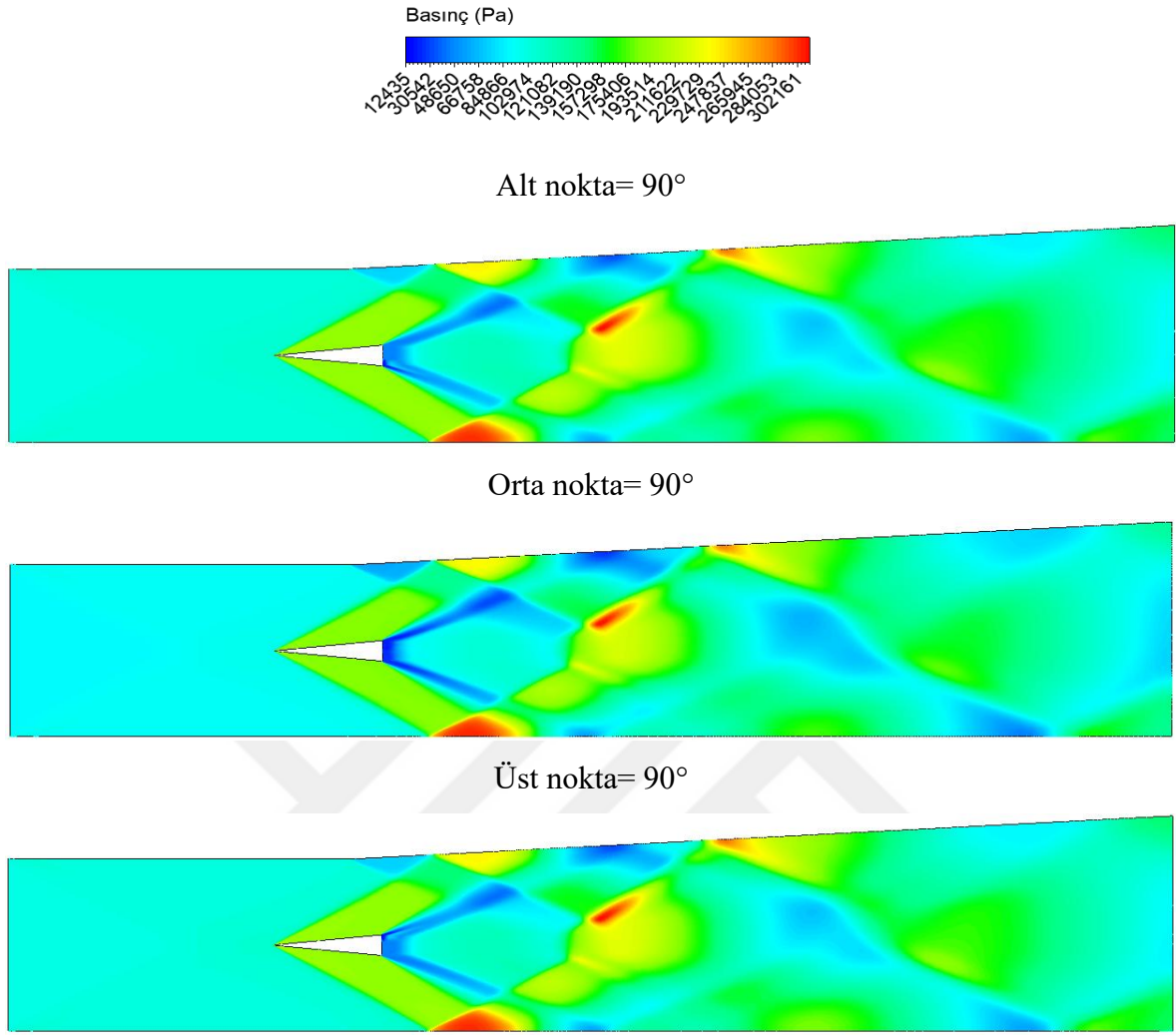
Basınç dağılımı; özellikle geri akım bölgeleri, akış sapmaları ve türbülans kaynaklı dengesizliklerin belirlenmesinde önemli bir gösterge işlevi görmektedir. Şekil 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 ve 4.21’de görüldüğü gibi elde edilen basınç dağılımları sunulmuştur. 90° açı ve konum olarak orta noktadan püskürtme durumunda basınç alanı simetrik ve dengeli bir yapı göstermektedir. Aynı zamanda en yüksek basınç bu konumda meydana gelmiştir ve değeri 123,256 kPa’dır.

30° püskürtme açısında, akışın yukarı yönelmesiyle birlikte özellikle üst noktadan yapılan püskürtmelerde yüksek basınç bölgesinin üst bölgeye kaydığı, buna karşılık alt kısımlarda geniş düşük basınç alanlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. -30° püskürtme açısında ise akışın aşağıya yönelmesi nedeniyle özellikle alt duvar yakınında yüksek basınç bölgeleri oluşmuş, akışın üst kısmında ise daha düşük basınç mevcuttur. Alt noktadan püskürtmelerde basınç artışı duvar yakınında yoğunlaşmıştır, bu durum yakıtın yüzeye çarpması sonucu oluşmaktadır. Bu oluşum, -30°’de gözlenen asimetrik karışım ve yön sapmalarıyla tutarlılık göstermektedir.

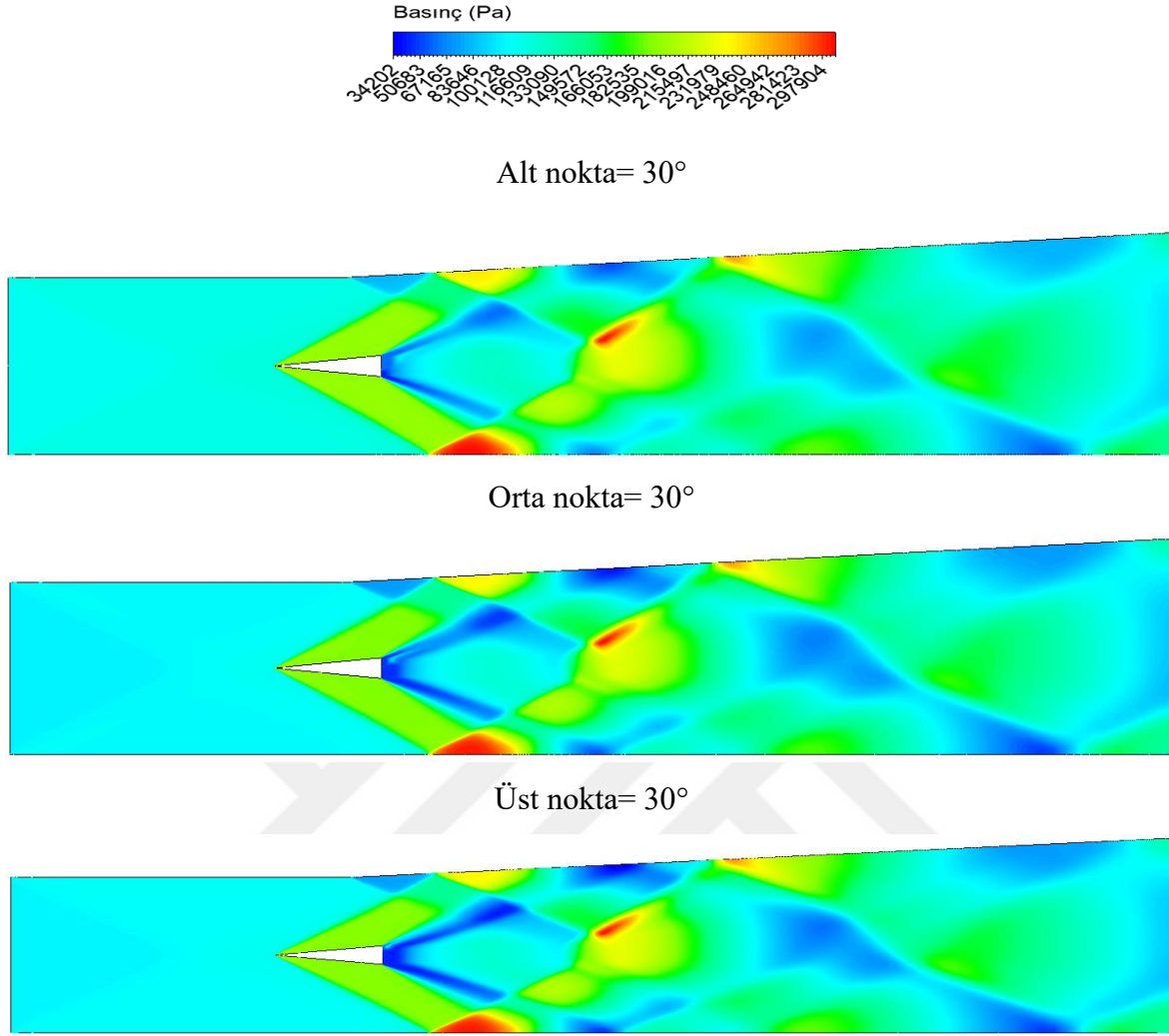
Diğer yandan 60° açı ile püskürtme sonucunda orta noktadan yapılan püskürtmelerde, dikmenin ön yüzeyinde daha geniş ve merkezli bir yüksek basınç alanı oluşurken, alt ve üst noktalardan püskürtmelerde bu bölgeler yön sapmasına bağlı olarak yer değiştirmektedir. Basınç alanları da su buharı analizlerindeki dar yayılım ve yön sapmaları ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak -60° açıda ise üstten yapılan püskürtmelerde yüksek basınç alanı dikmenin alt yüzeyine doğru kayarken, alt ve orta noktadan püskürtmelerde düşük basınç alanları genişlemiştir ve yüksek basınç eksenden uzaklaşmıştır.

Tüm analizler birlikte değerlendirildiğinde, orta noktadan yapılan püskürtmelerin basınç açısından daha simetrik ve kararlı bir yapı sunduğu anlaşılmaktadır. Püskürtme açısının büyümesi veya püskürtme konumunun eksenden uzaklaşması, basınç alanlarında asimetrilerin artmasına ve akış dengesizliğine neden olmaktadır.

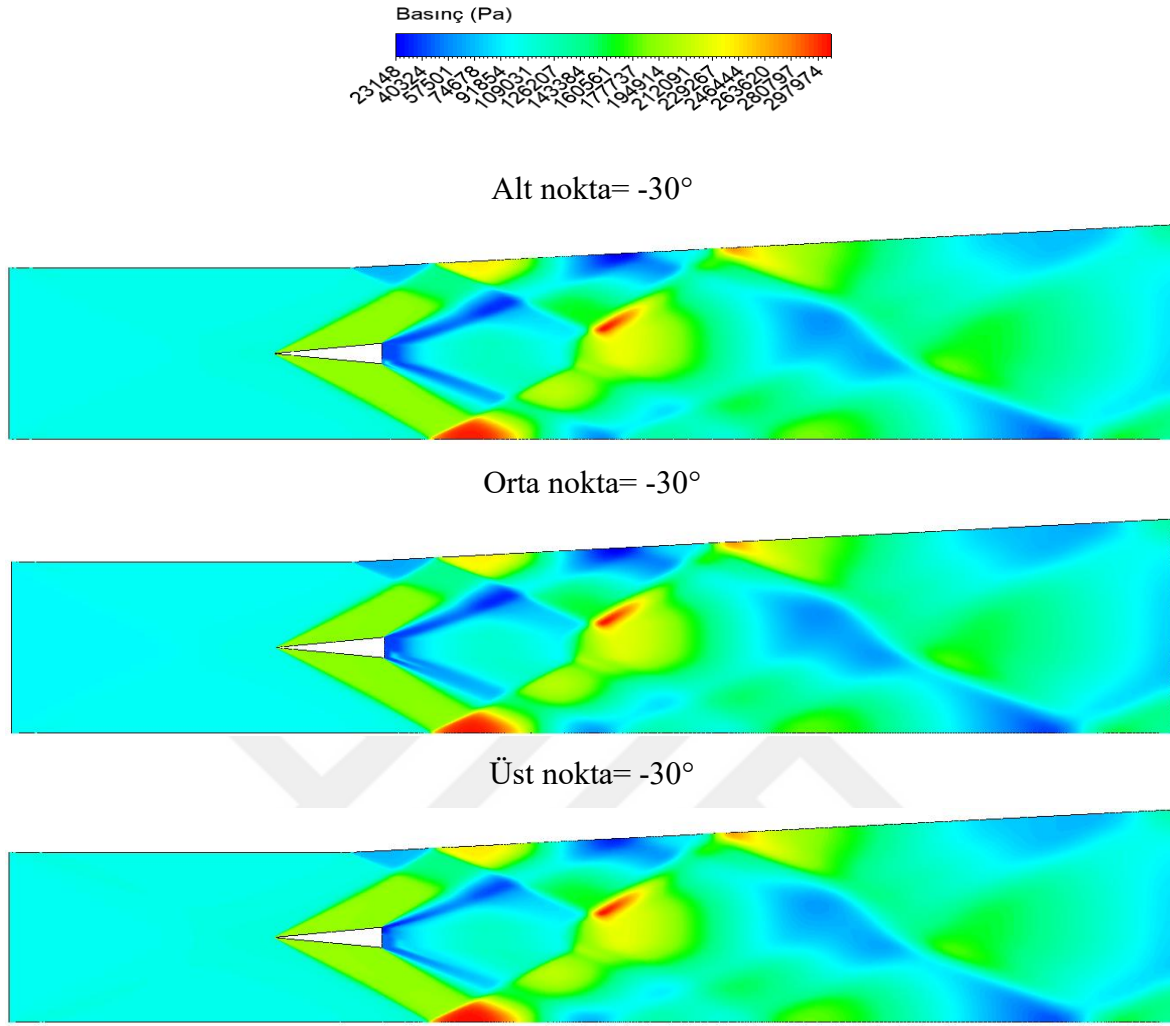
Sonuç olarak, elde edilen basınç dağılımları, daha önce incelenen hız vektörü ve su buharı konsantrasyonu dağılımları ile yüksek düzeyde tutarlılık göstermiştir.



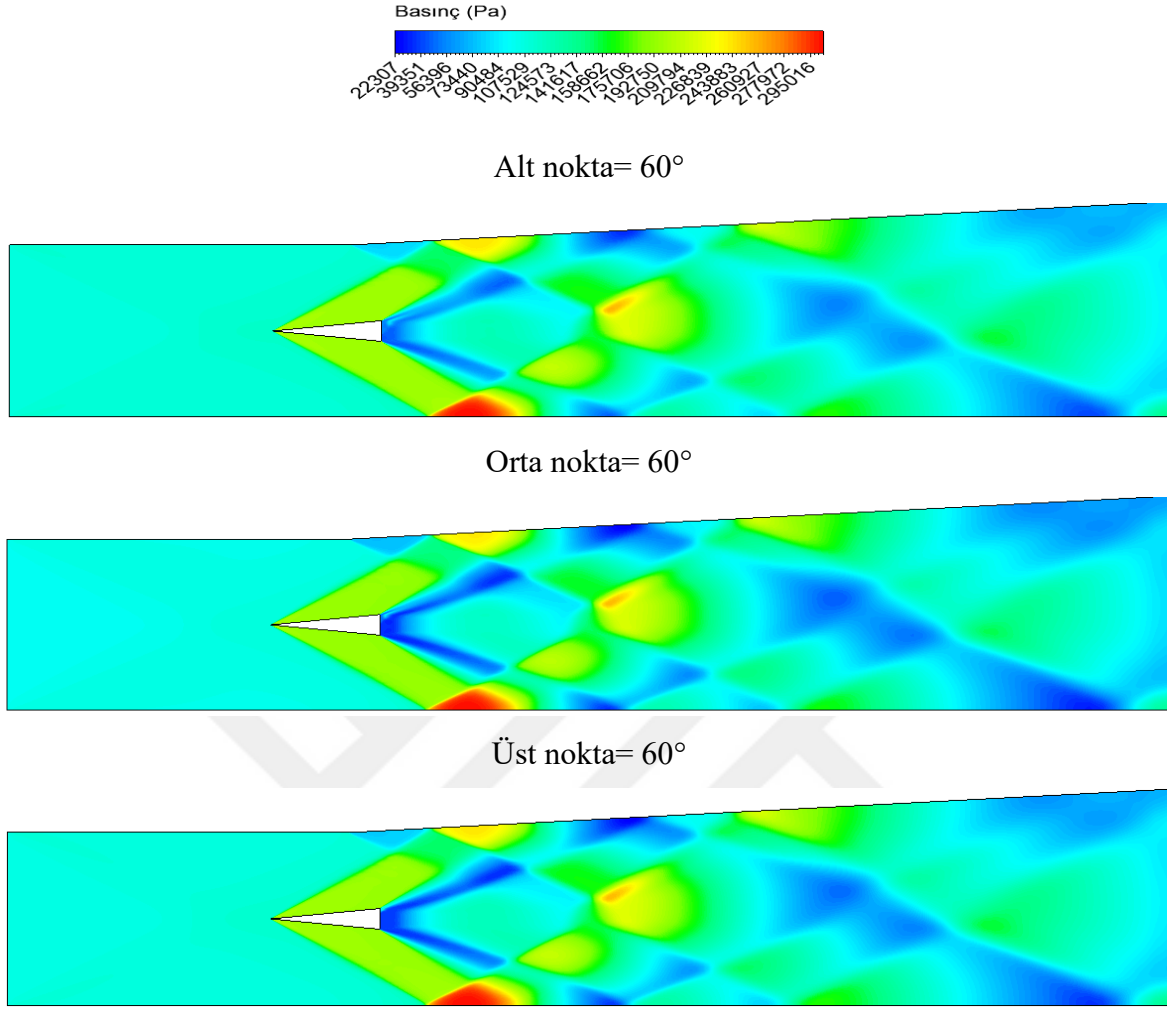
Şekil 4.17. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 90^\circ$)



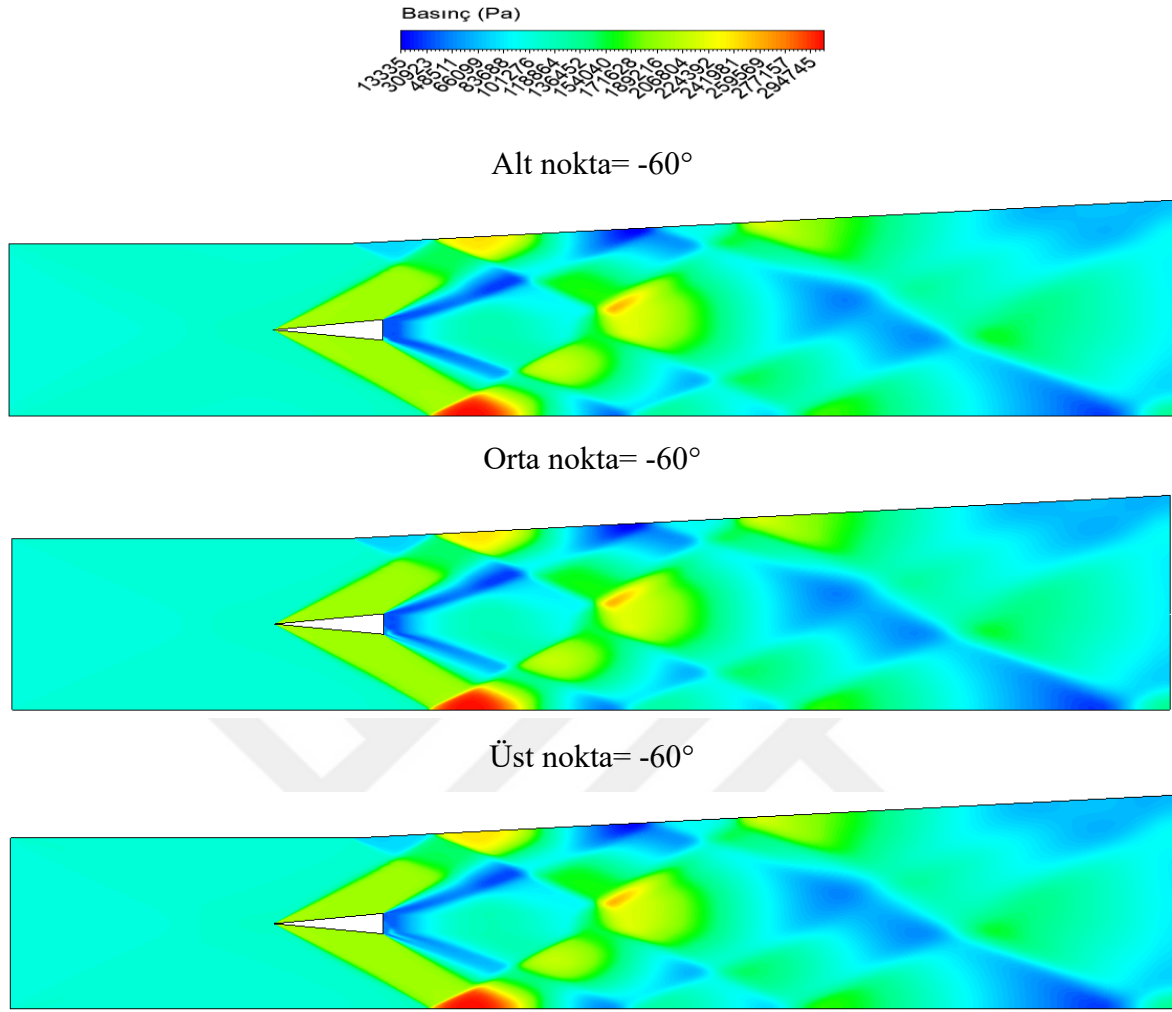
Şekil 4.18. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 30^\circ$)



Şekil 4.19. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = -30^\circ$)

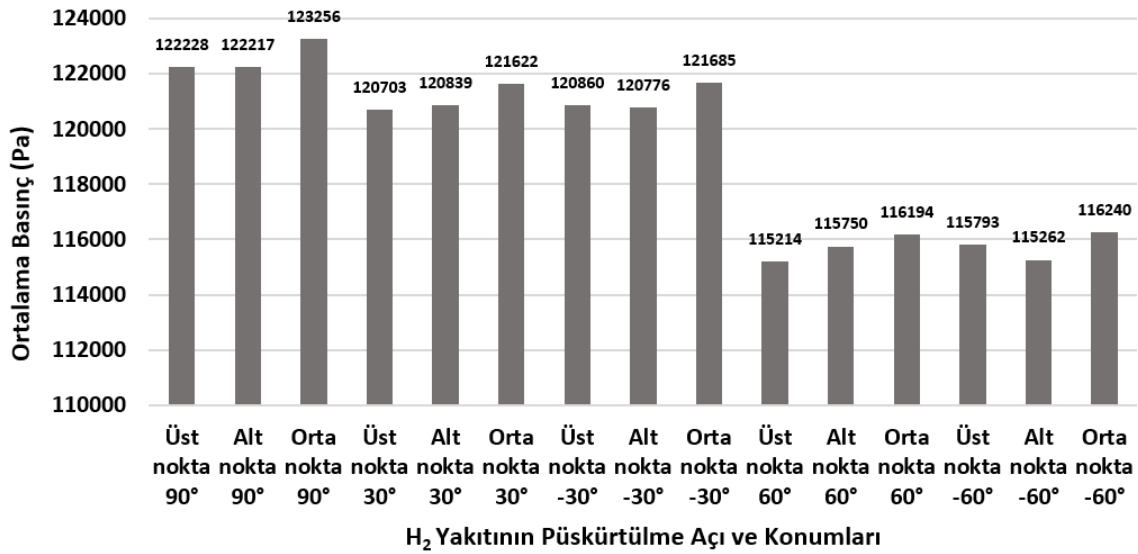


Şekil 4.20. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = -60^\circ$)



Şekil 4.21. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basiñç dağılımı ($\theta = -60^\circ$)

90° püskürtme açısı, özellikle orta noktadan yapılan püskürtmeyle 123,256 kPa ile tüm konfigürasyonlar içinde en yüksek ortalama basınç değerine ulaşmıştır. Şekil 4.17’de püskürtme bölgesindeki kırmızı ve sarı alanların genişliğiyle de orta noktadan püskürtme durumunda basınç alanının simetrik ve dengeli olduğunu ortaya koymuştur. 30° açılı püskürtmelerde, basınç değerleri düşmüştür. Benzer şekilde, -30° püskürtmelerde ortalama basınçlar 120,776-121,685 kPa değerleri aralığında elde edilmiştir. Püskürtmenin ters yönlenece, basınç konturlarında dalgalı bölgeler oluşturmuştur. 60° ve -60° açılarla yapılan püskürtmelerde, ortalama basınç değerlerinin belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum, akışa eğimli verilen püskürtmenin daha az direnç oluşturması ve basınç alanını daha az bozmasıyla bağlantılıdır. Şekil 4.20 ve 4.21’de kırmızı alanların sınırlı olması da bu bulguyu doğrulamaktadır.

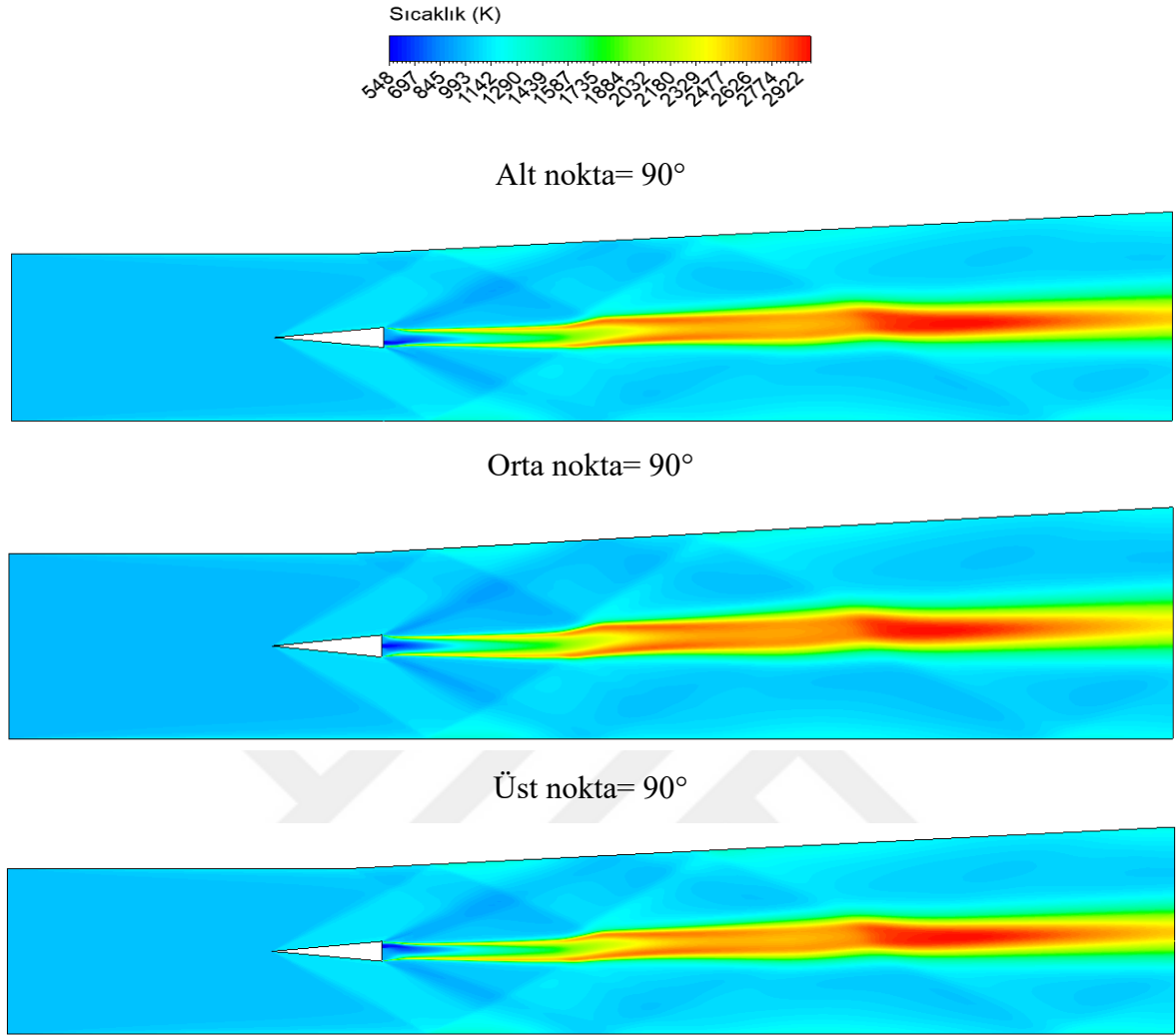


Şekil 4.22. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisinde H₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama basınç dağılımı

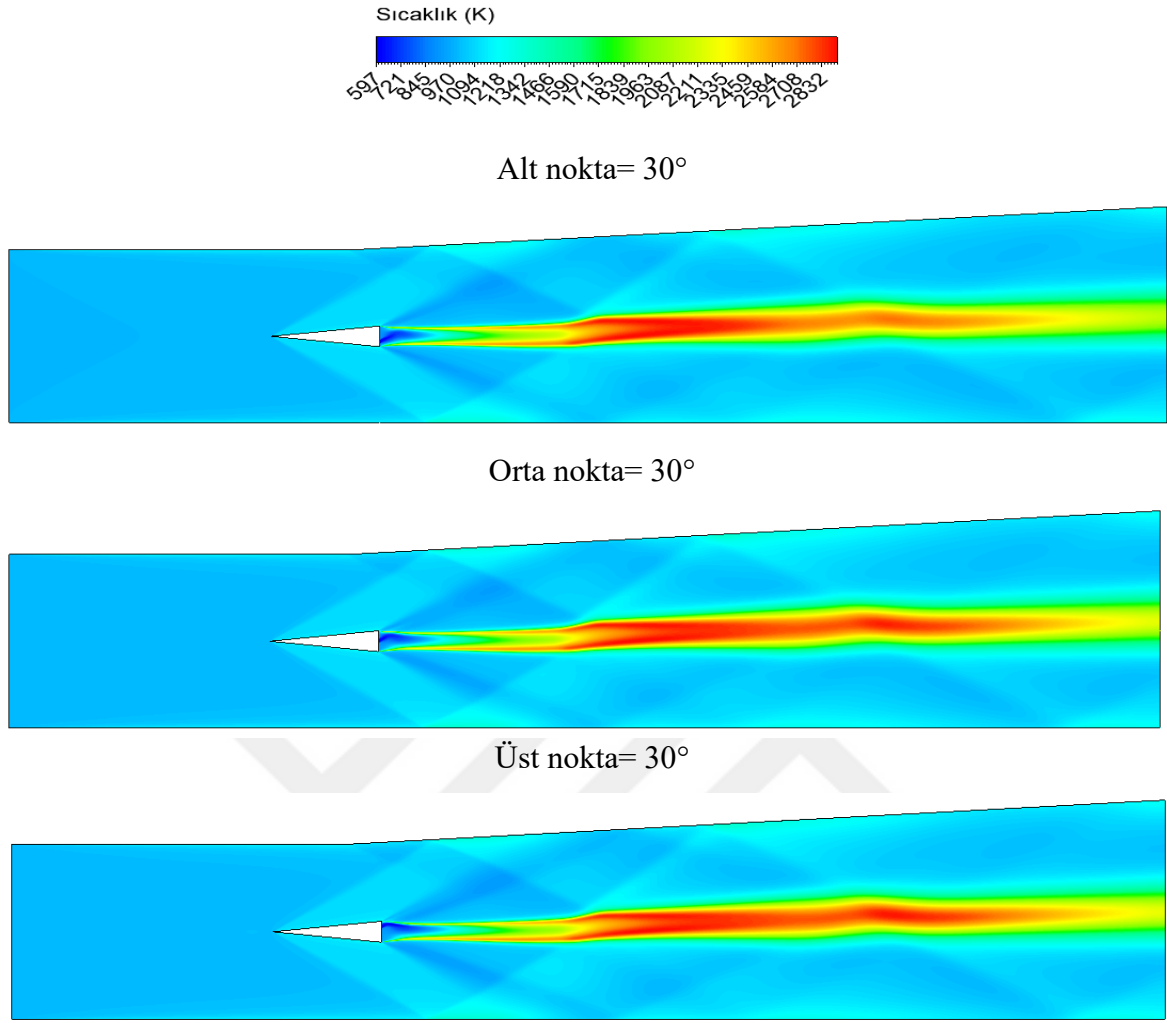
Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisi için son olarak sıcaklık dağılımları Şekil 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 ve 4.27’de verilmiştir. 90° açılı ile püskürtme sonucu Şekil 4.23’e bakıldığında orta noktadan püskürtme durumunda, yüksek sıcaklık bölgesi (kırmızı-sarı alan) 1192,27 K ortalama sıcaklık değeri ile merkez eksenini boyunca dengeli bir şekilde uzanmakta ve geniş bir reaksiyon bölgesi oluşturmaktadır. Alt ve üst noktalardan yapılan püskürtmelerde de benzer sıcaklık değerleri elde edilmiştir, ancak sıcaklık alanı eksenden hafifçe sapmaktadır. Diğer yandan 30° açılı ile akış için sıcaklık alanı özellikle üst noktadan püskürtmede yukarıya doğru sapmakta ve yüksek sıcaklık bölgesi üst duvar yönüne eğilmektedir.

Şekil 4.26 ve 4.27’e bakıldığında 60° açıda sıcaklık alanı daha kısa mesafeye yoğunlaşmakta ve çabuk sönümlenmektedir. Bu da sıcaklığın eksen boyunca devam edememesine ve daha yoğun karışımın yanamamasına neden olmaktadır. -60° açıda da 1148,29-1167,18 K aralığında ortalama sıcaklık meydana gelmiştir ve sıcaklık bölgesinin özellikle alt duvar yönünde toplandığı gözlemlenmiştir.

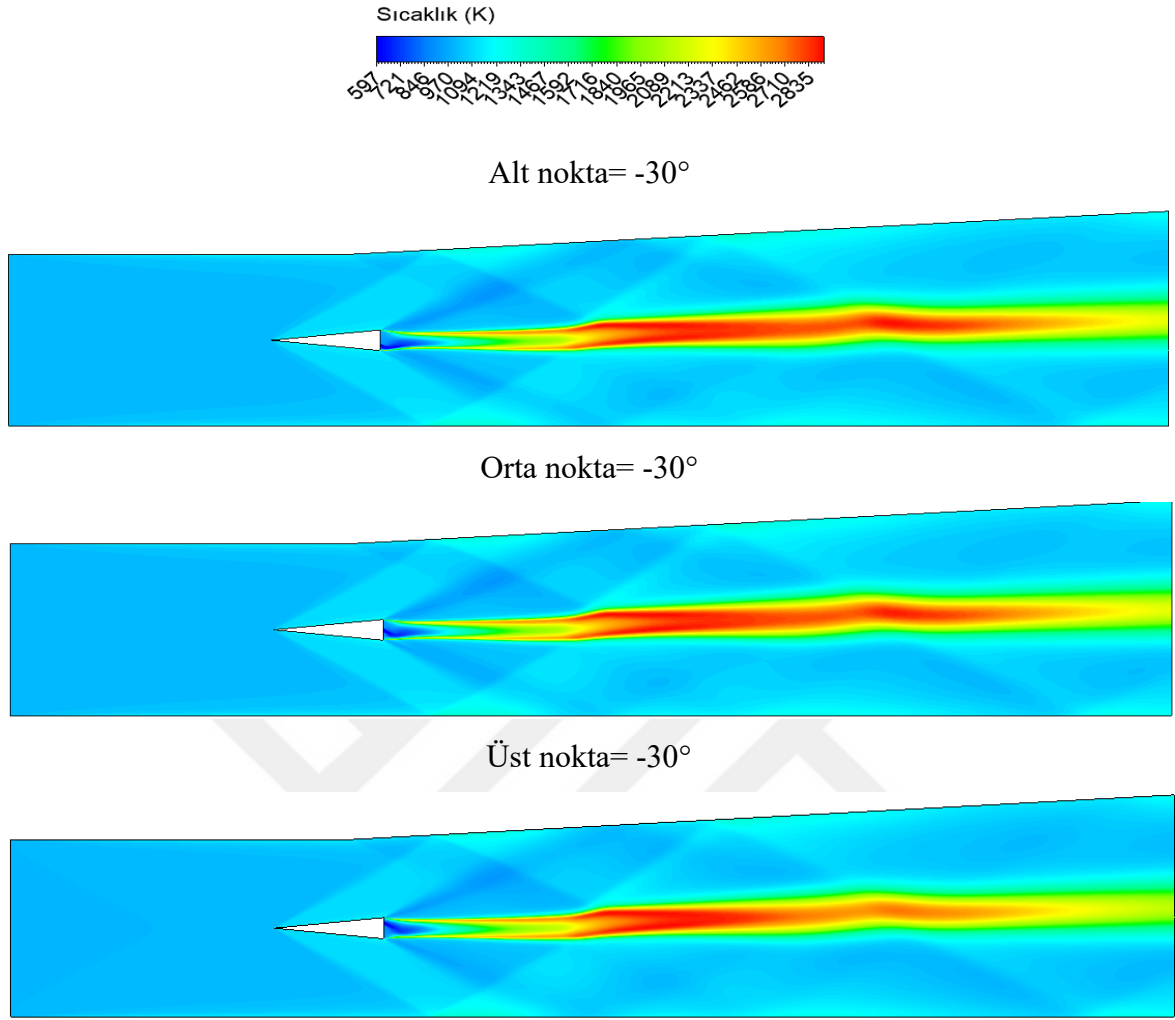
Dikme-tabanlı alev tutucu geometri için yapılan hız vektörü, su buharı konsantrasyonu, basınç dağılımı ve sıcaklık dağılımı analizlerin sonucu yüksek düzeyde tutarlıdır.



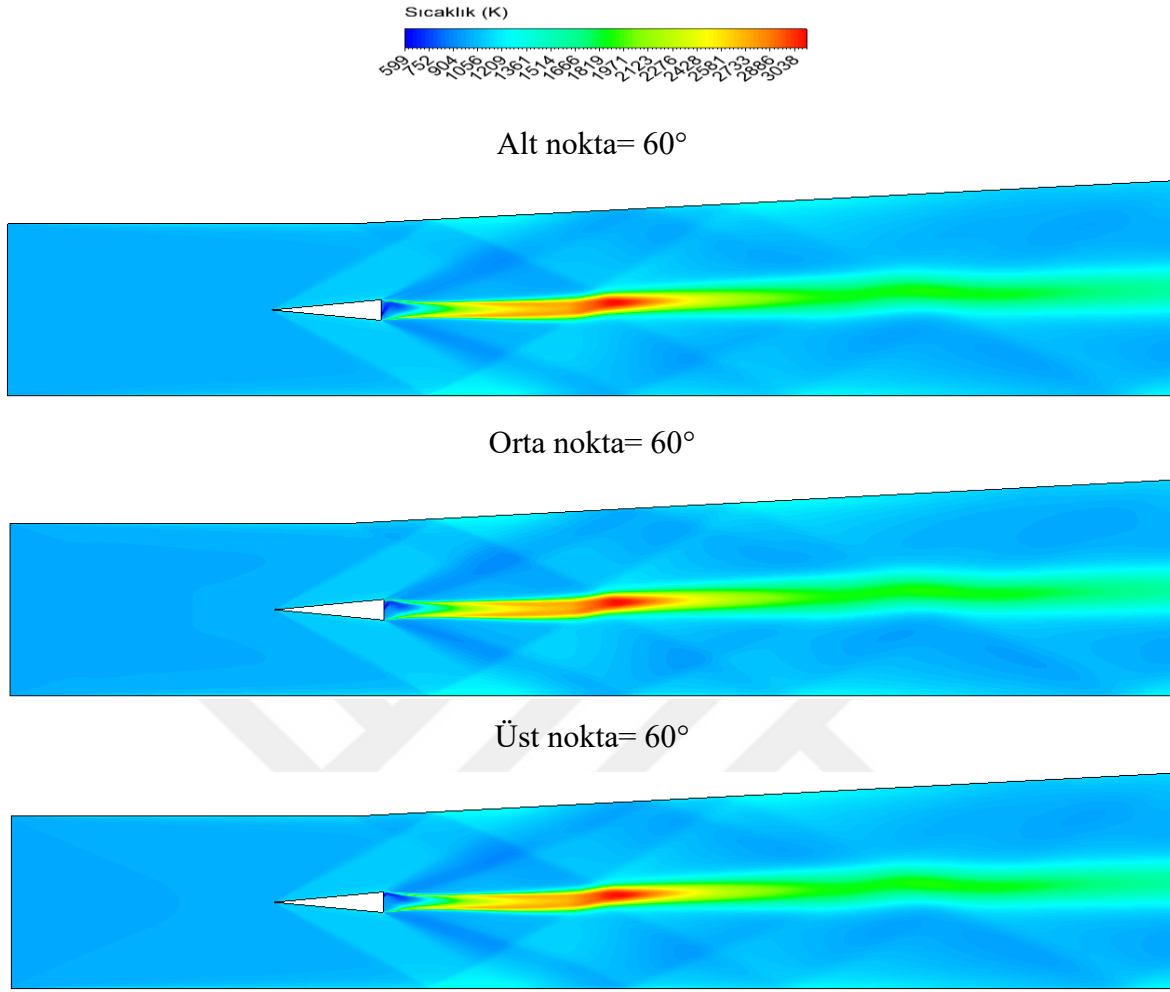
Şekil 4.23. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 90^\circ$)



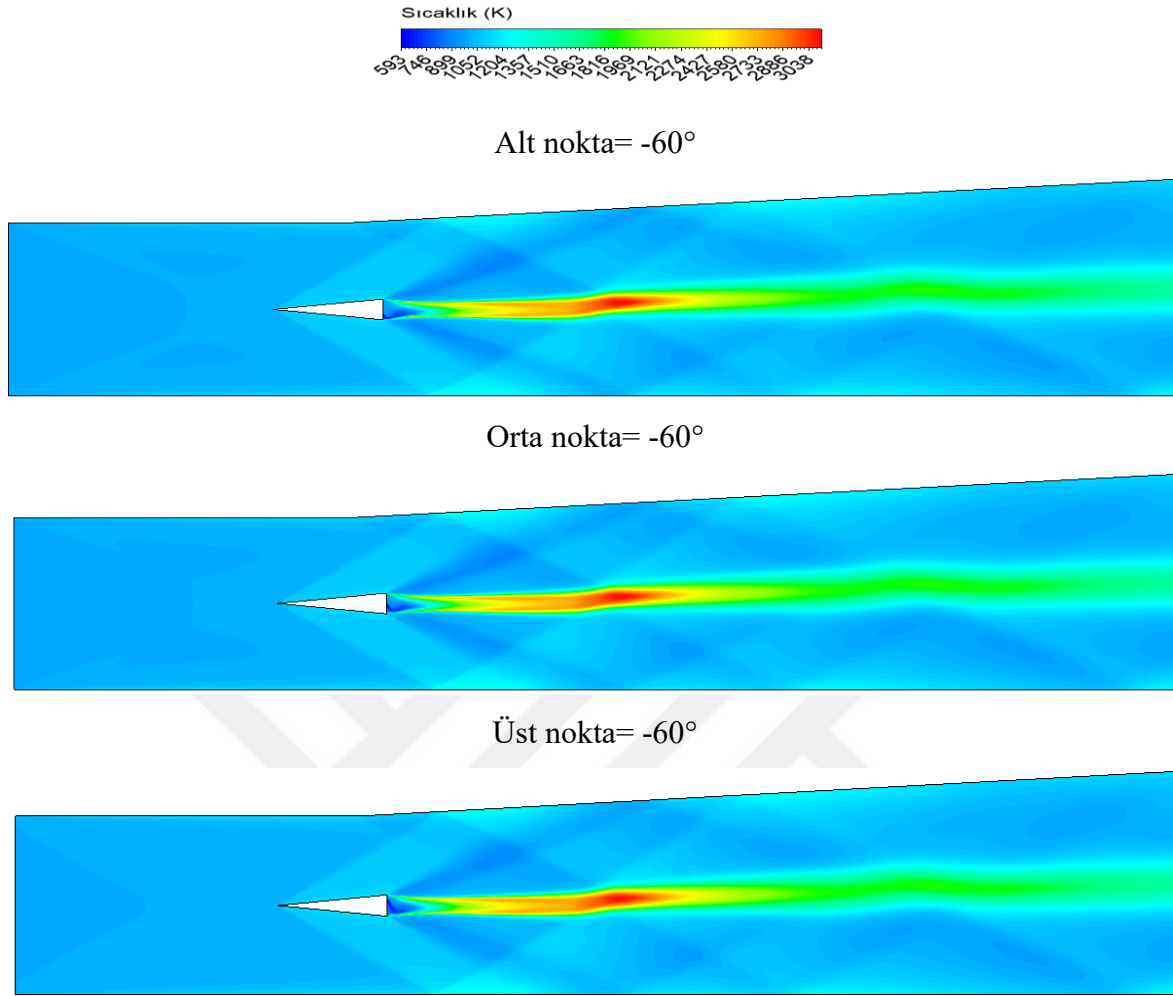
Şekil 4.24. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 30^\circ$)



Şekil 4.25. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = -30^\circ$)

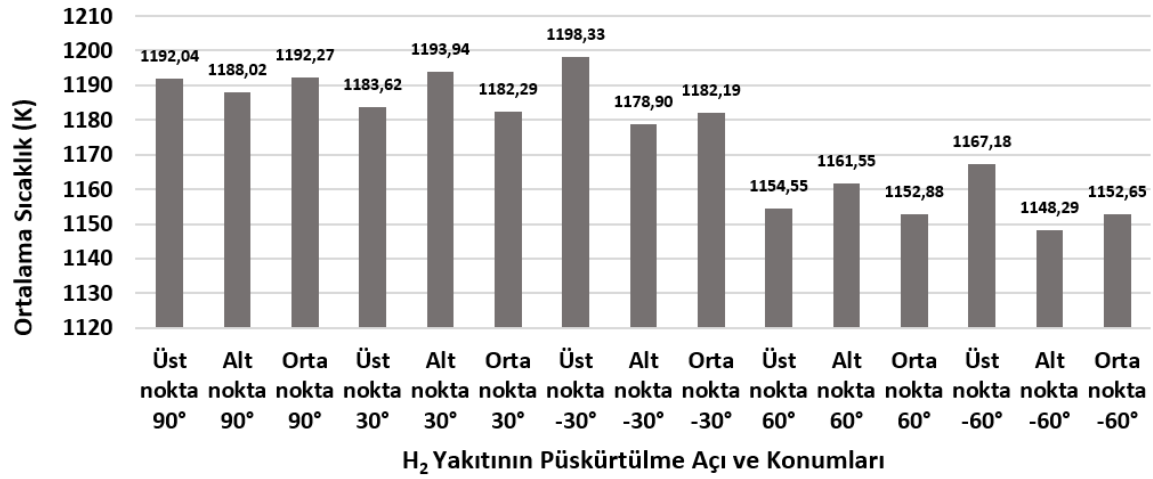


Şekil 4.26. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 60^\circ$)



Şekil 4.27. Dikme-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = -60^\circ$)

90° püskürtme açısıyla elde edilen sıcaklık değerleri, genel olarak yüksek seviyededir. Şekil 4.23’de kırmızı renkli sıcak bölgeler uzun mesafeye yayılmış ve çekirdek yapıyı koruduğu görülmektedir. 30° püskürtmelerde, en yüksek sıcaklık 1193,94 K ile üst noktadan elde edilmiş, alt ve orta noktalarda ise sıcaklıklar biraz daha düşük kalmıştır. -30° püskürtmelerde ise maksimum sıcaklık 1198,33 K ile yine üst noktada gözlenmiştir. Diğer konumlarda sıcaklıklar daha düşük olup, çekirdek yapı asimetrik yayılmıştır. Ancak üst noktadan püskürtme ile etkili bir sıcaklık bölgesi oluştuğu gözlemlenmiştir. 60° ve -60° açılarda, sıcaklıklar belirgin şekilde düşmüş ve bu durum yanma etkinliğinin azaldığına işaret etmektedir.

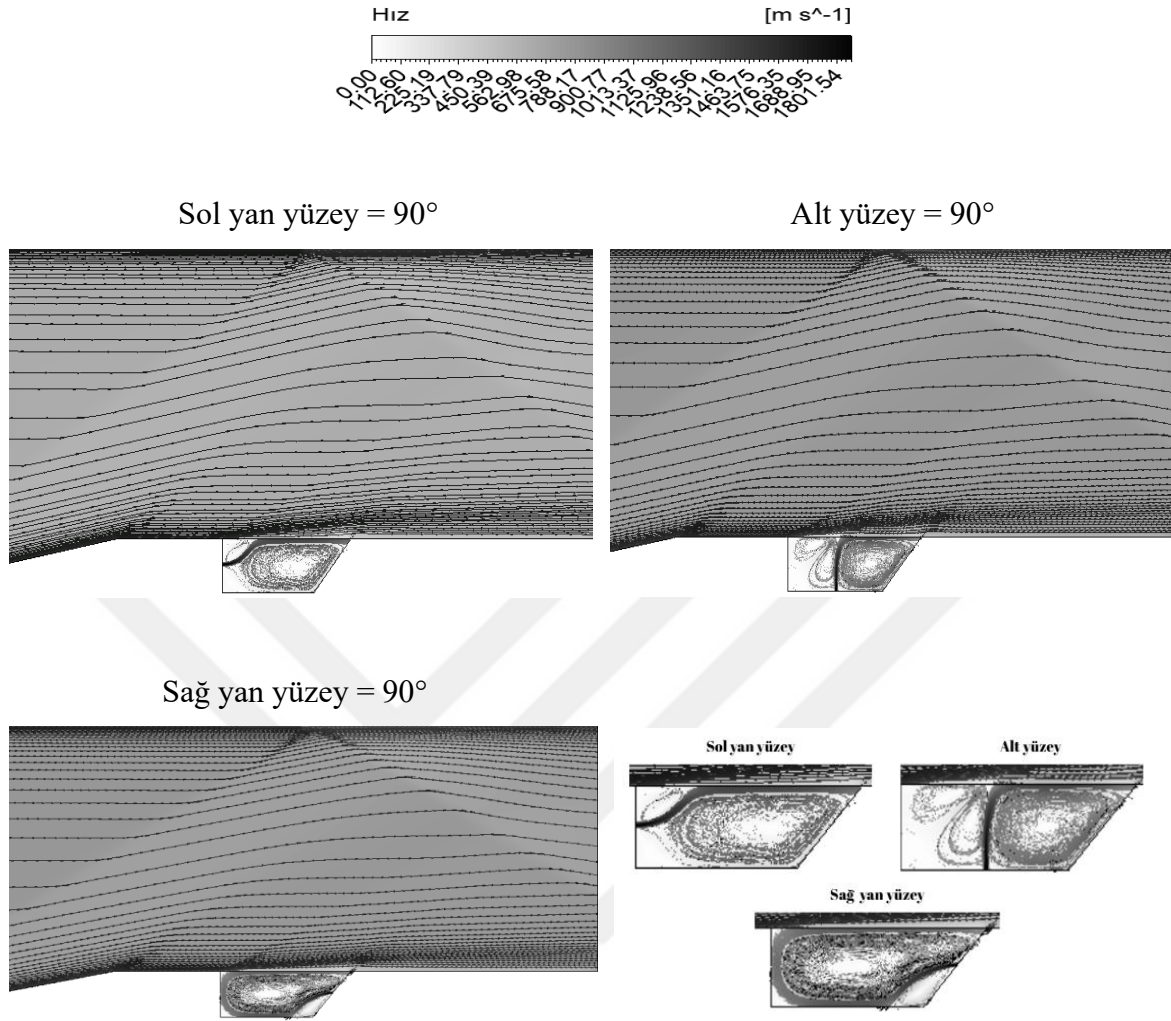


Şekil 4.28. Dikme-tabanlı alev tutucu geometrisinde H₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama sıcaklık dağılımı

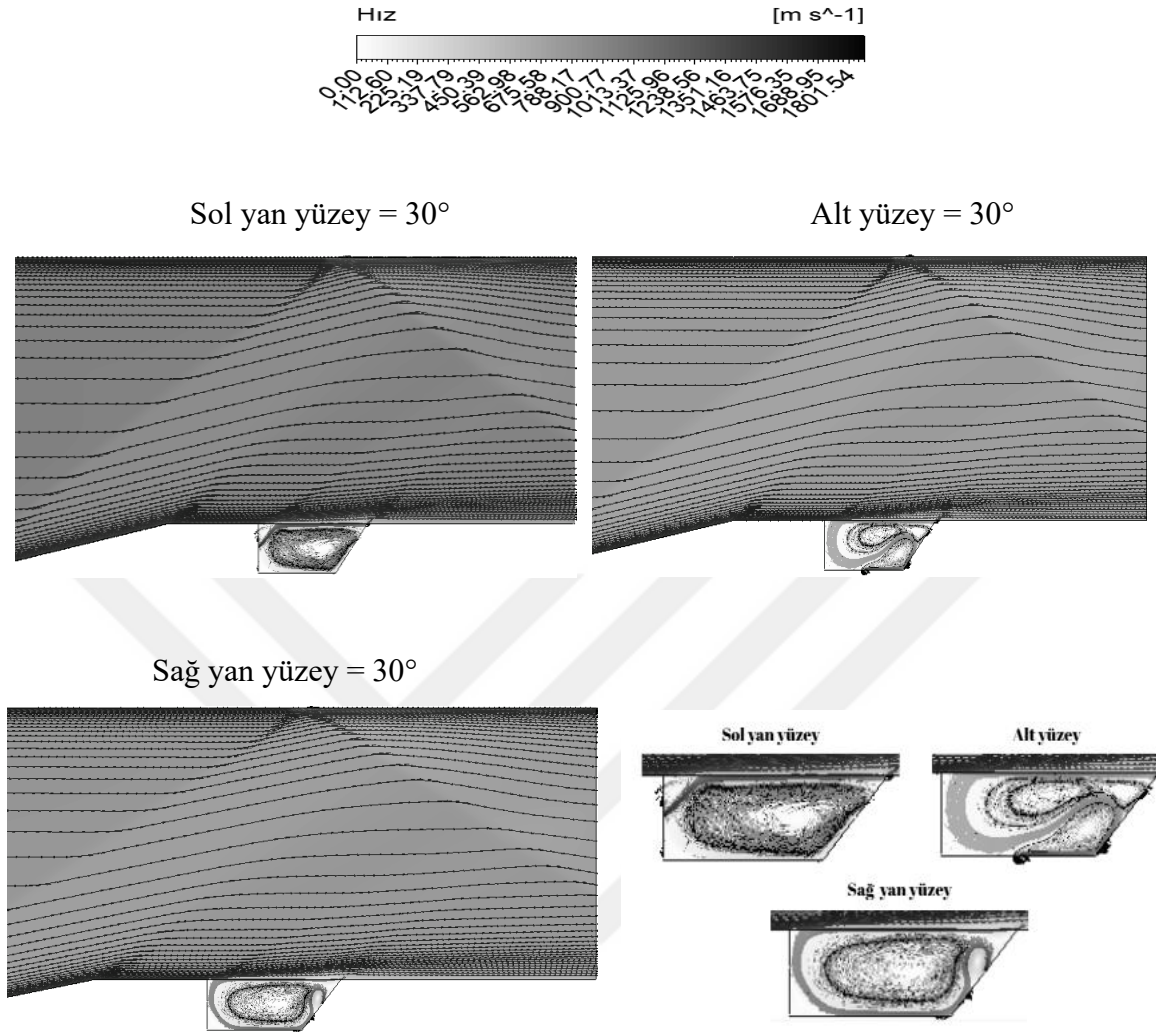
4.2.2. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisi

Boşluk-tabanlı alev tutucular, geri akış bölgeleri sayesinde alevin sabitlenmesini ve kararlı yanma koşullarının sağlanmasını mümkün kılar. Bu tür yapılarda yakıtın püskürtülme açısı, akışın yönlenmesini, türbülans yoğunluğunu ve karışım kalitesini doğrudan etkileyerek, alevin oluşumunu ve konumunu belirler. Bu bölümde, boşluk-tabanlı alev tutucudan farklı açılarla ve üç farklı konumdan (sol yan, alt ve sağ yan yüzey) yapılan yakıt püskürtmesi sonucunda oluşan akım çizgileri ve hız vektörlerine yer verilmiştir. Şekil 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33 incelendiğinde 90° alt yüzey püskürtme durumunda boşluğun hemen arkasında her iki yanda gelişmiş çift yönlü vorteks yapısı gözlenmektedir. 30° açı ile püskürtmede vorteks oluşumu zayıf ve parçalı yapıdadır. Boşluk içindeki geri akış bölgesi belirgin olsa da, çevresel vorteks oluşumları baskılanmış durumdadır. Bu da hem türbülans enerjisinin azalmasına hem de karışım kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Şekil 4.31’de -30° açı da ise alt bölgede sınırlı bir geri akış oluşmuş ancak bu bölge istikrarlı ve güçlü bir yapı oluşturmamıştır. Hız vektörlerinin yönü, akımın boşluğa tam olarak giremediğini ve yakıtın ana akımla taşındığını göstermektedir.

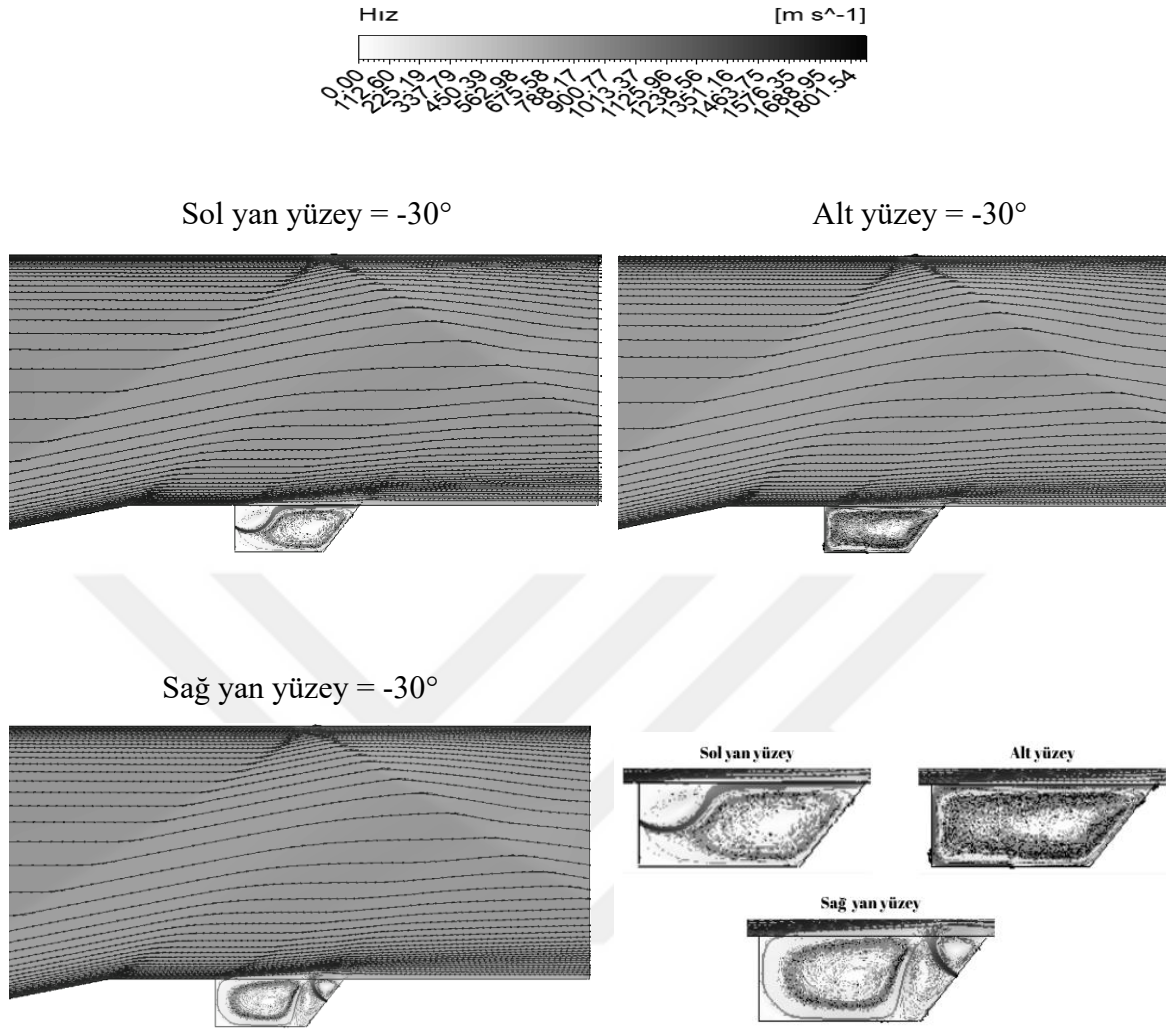
Şekil 4.32’de 60° alt yüzeyden yakıt püskürtülmesi sonucu boşluk içerisinde, özellikle giriş bölgesinde tek taraflı gelişmiş bir vorteks yapısı görünmektedir. Akım çizgileri bu alanda yön değiştirerek küçük çaplı bir dairesel hareket sergilemektedir. Bu yapıdaki akış düzeni, orta seviyede bir karışım verimliliği sunar. Alevin tutunması muhtemeldir ancak simetri eksikliği, alev pozisyonunun dengesiz olmasına neden olabilir. -60° açı ile alt yüzeyden püskürtmede ise boşluk bölgesi içerisinde çift yönlü, belirgin ve simetrik bir vorteks yapısı oluşmuştur. Akım çizgileri hem üstten hem alttan boşluğa yönelerek geri dönüş yapmaktadır. Girdap merkezleri belirgindir. Bu, ideal bir geri akış bölgesi örneğidir. Böyle bir yapı, yakıtın boşlukta yeterli süre kalmasını, iyi karışmasını ve alevin sabitlenmesini sağlar. Yapılan analizler sonucunda, alt yüzeyden 90° ve -60° püskürtme sonucu boşluk-tabanlı alev tutucular için en verimli geri akış bölgelerini oluşturduğu gözlemlenmiştir.



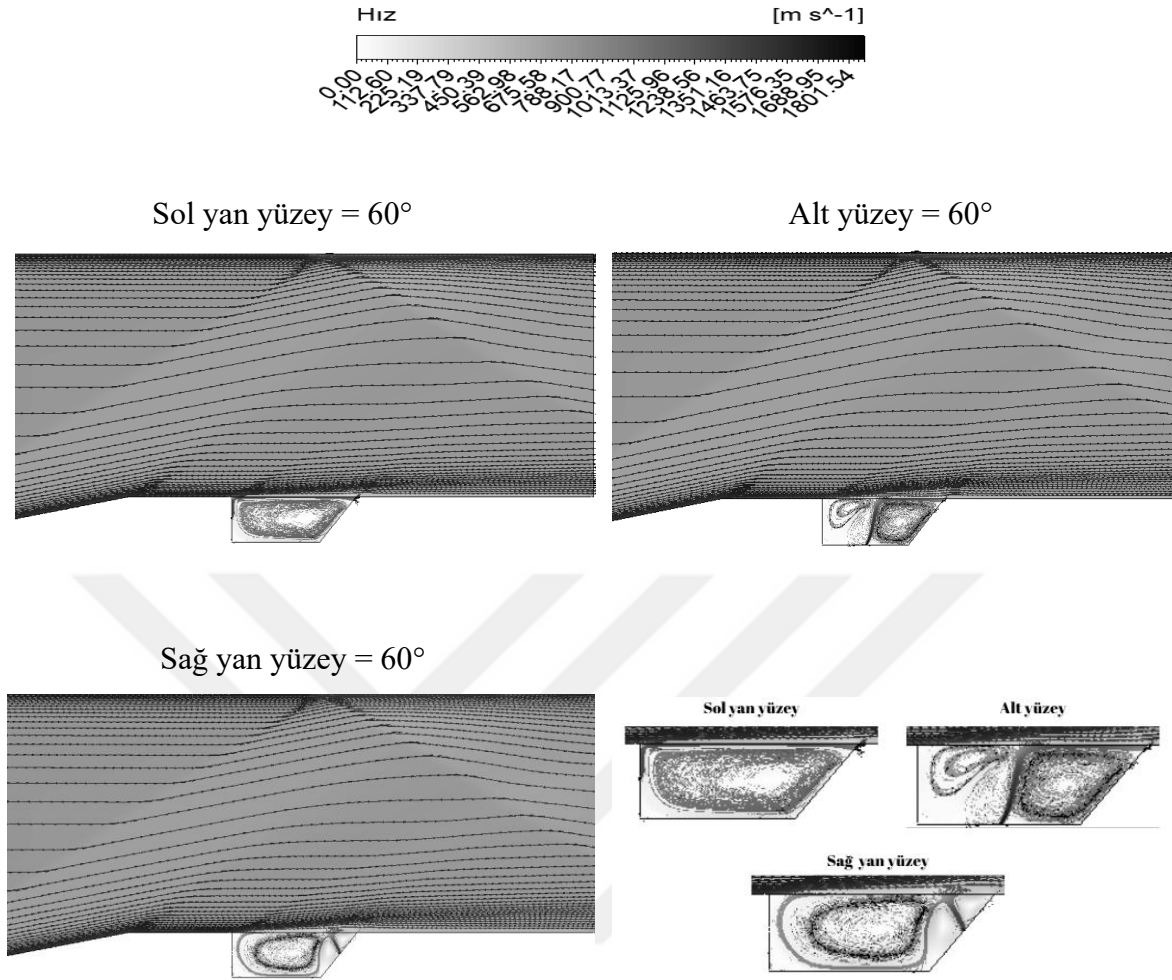
Şekil 4.29. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 90^\circ$)



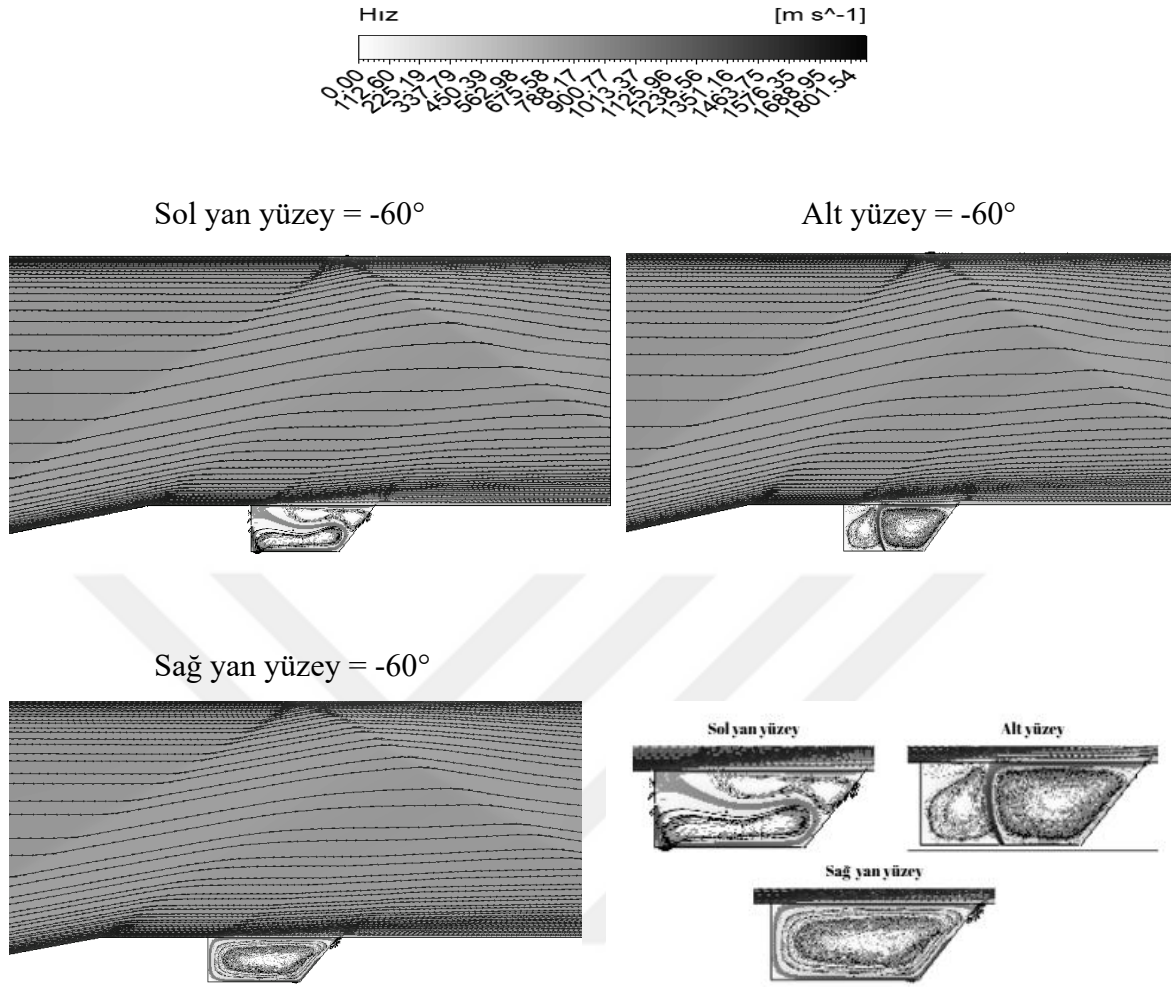
Şekil 4.30. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 30^\circ$)



Şekil 4.31. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = -30^\circ$)

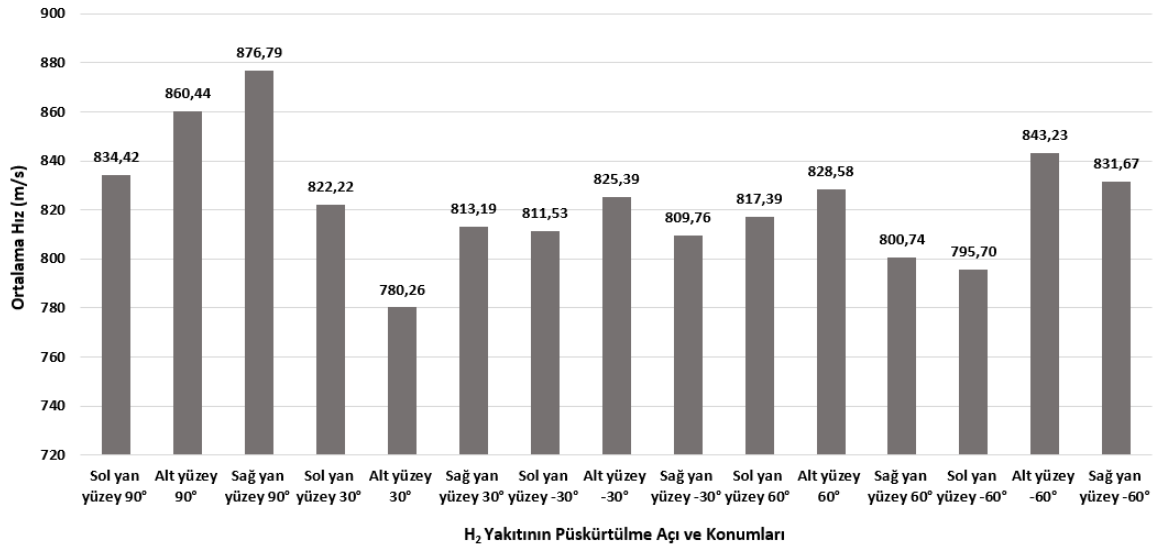


Şekil 4.32. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = 60^\circ$)



Şekil 4.33. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri ($\theta = -60^\circ$)

Şekil 4.34'te, H_2 yakıtının boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisinde farklı püskürtme açıları ($\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$, 90°) ve üç temel yüzey (sol yan, sağ yan, alt) üzerinden enjekte edilmesi sonucu elde edilen ortalama hız değerleri gösterilmiştir. 90° püskürtme açısında, sağ yan yüzeyden yapılan püskürtmeyle en yüksek ortalama hız değeri olan 876,79 m/s elde edilmiştir. 30° açıyla yapılan püskürtmelerde ortalama hızlar genel olarak düşüş göstermiştir. Şekil 4.30'daki akım çizgileri, bu konfigürasyonda boşluk bölgesindeki türbülansın zayıfladığını ve geri dönüş hareketlerinin sınırlı kaldığını göstermektedir. -30° püskürtmelerde ortalama hızların 30° 'ye göre daha dengeli olduğu görülmektedir. Şekil 4.31'de görüldüğü üzere, bu konfigürasyonda girdap bölgeleri daha belirgin hale gelmiş, ancak bu durum karışımı artırsa da hız değerlerini sınırlı düzeyde tutmuştur. 60° ve -60° açılarıyla yapılan püskürtmelerde ortalama hızlar belirgin şekilde azalmıştır. Özellikle -60° sol yan yüzeyde 795,70 m/s en düşük değer elde edilmiştir. Diğer yandan -60° alt yüzeyde yapılan püskürtmede 843,23 m/s hız elde edilmiştir. Şekil 4.33'de ki vorteks yapısı sonucu desteklemektedir.

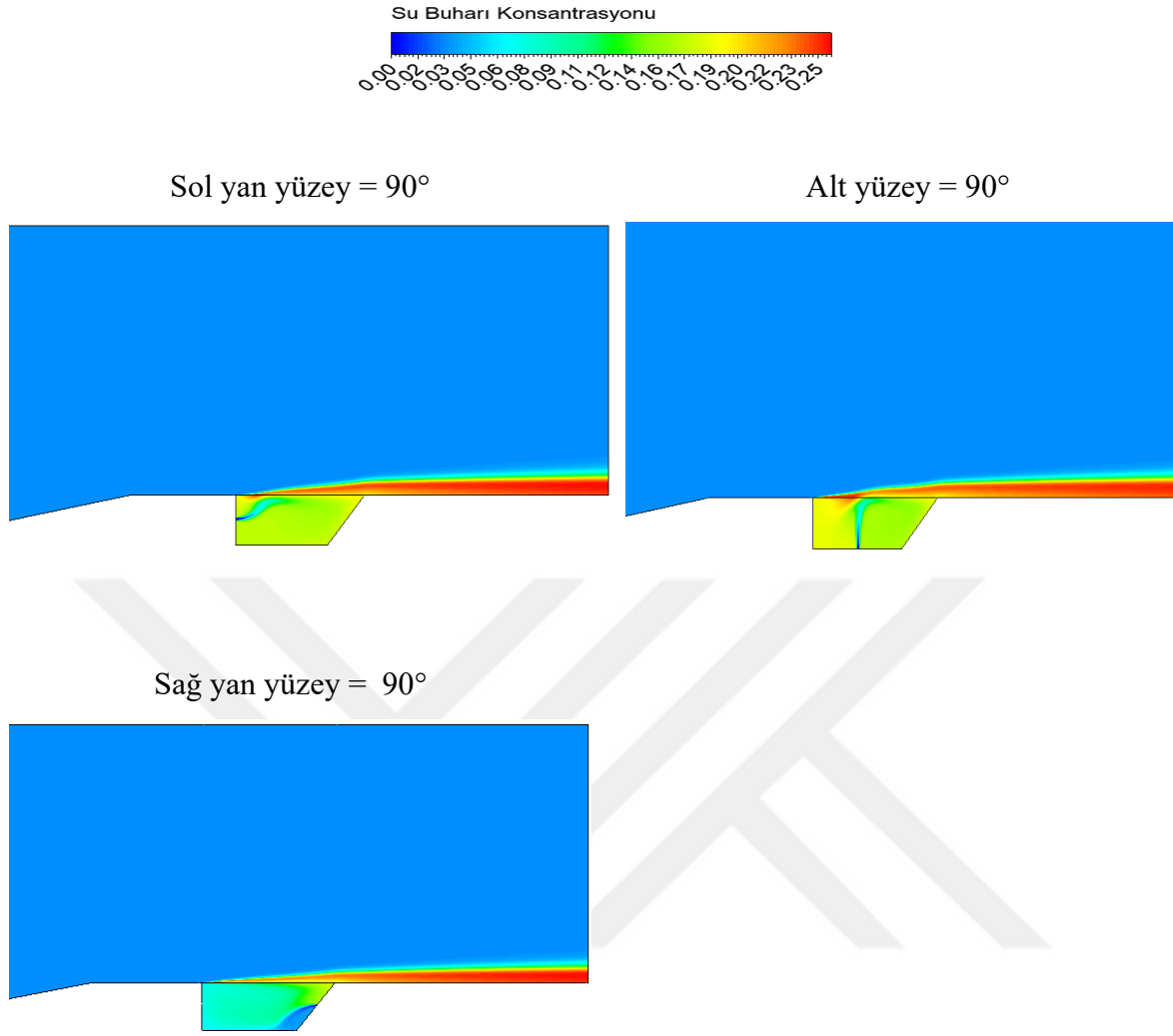


Şekil 4.34. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisinde H_2 yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama hız dağılımı

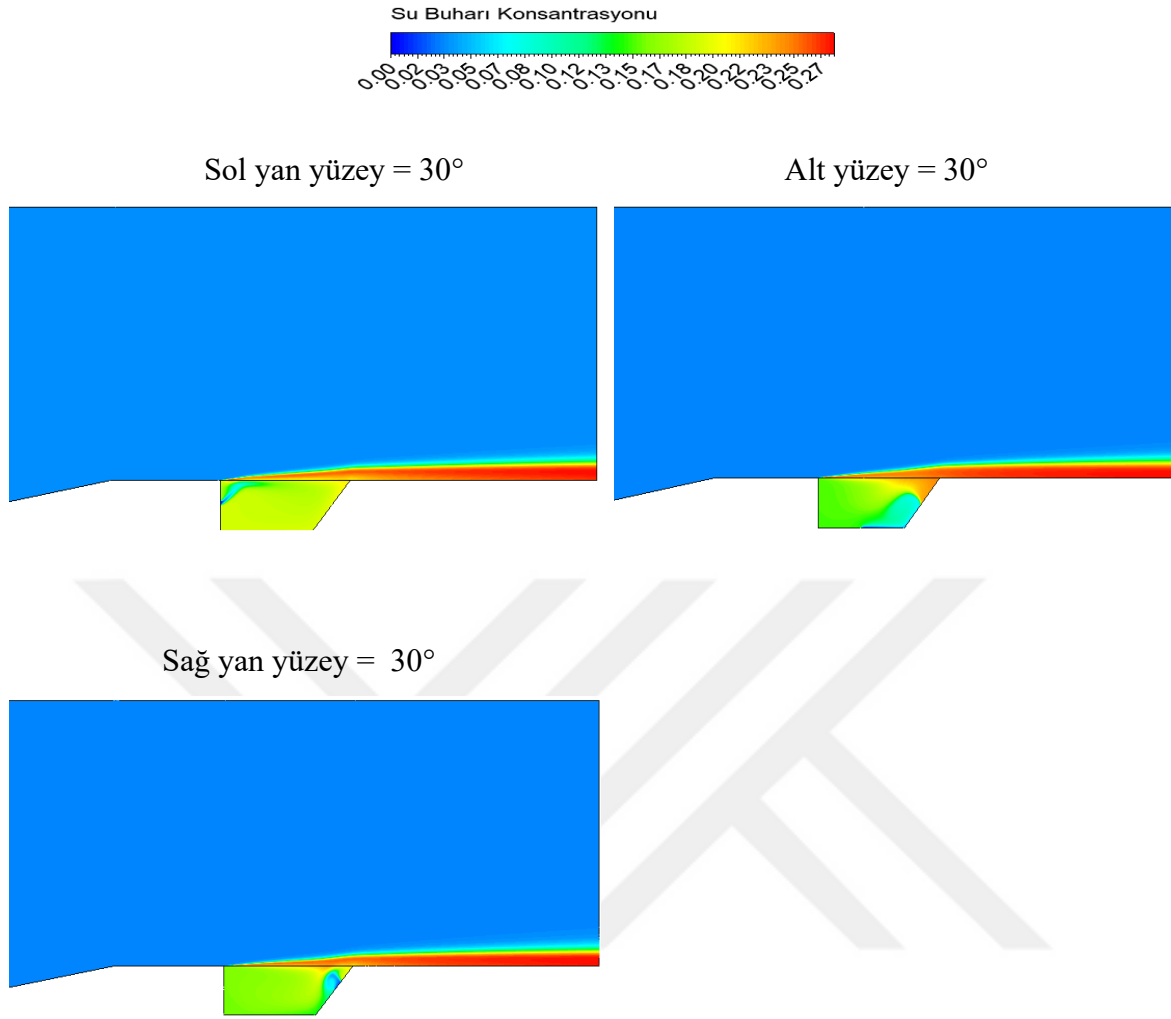
Şekil 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 ve 4.39’da su buharı konsantrasyon dağılımlarına yer verilmiştir. 90° açı ile püskürtme sonucu su buharı konsantrasyonu sınırlı bir alana sıkışmış durumda; alt yüzey boşlukta dar bir bölge kırmızıya dönmekte, çevresi ise mavi tonlarda. Akım çizgilerinde güçlü geri akış yapısı gözlenirse de, alt yüzeyden püskürtme sonucu yakıtın ana akımla hızla taşındığı ve boşlukta yeterince kalmadığı anlaşılmaktadır. 30° açı da ise yakıt boşluğa daha kontrollü girmekte, yanma daha homojen ve sabit bir bölgede gerçekleşmektedir. Şekil 4.37’ye bakıldığında, su buharı dağılımı alt yüzeyde yoğunlaşmış; kırmızı-sarı alanlar alt bölgede sınırlı kalmaktadır. Yakıtın alt yüzeye yönlendirilmesiyle birlikte yerel bir tutuşma bölgesi oluşmuş ancak yeterli yayılım sağlanamamıştır.

60° açı ile sol yan yüzeyden püskürtme sonucu daha belirgin ve yaygın bir kırmızı alan mevcuttur. Yakıt boşluk içine iyi yönlendirilmiş ve burada kararlı şekilde yandığı görülmüştür. Hem hız vektörleri hem de su buharı konsantrasyon dağılımı uyumlu; kararlı ve yüksek verimli yanma sağlanmıştır. Şekil 4.39’a bakıldığında geniş bir kırmızı alan mevcut. Bu sonuç, önceki girdap yapılarının görsel analizleriyle karşılaştırıldığında dikkat çekicidir; çünkü belirgin bir vorteks yapısı gözlemlenmemesine rağmen, yerel türbülans etkilerinin ve yakıtın boşluk bölgesine uygun açıyla yönlendirilmesinin, etkin bir karışım ve dolayısıyla yüksek yanma verimi sağladığının göstergesidir.

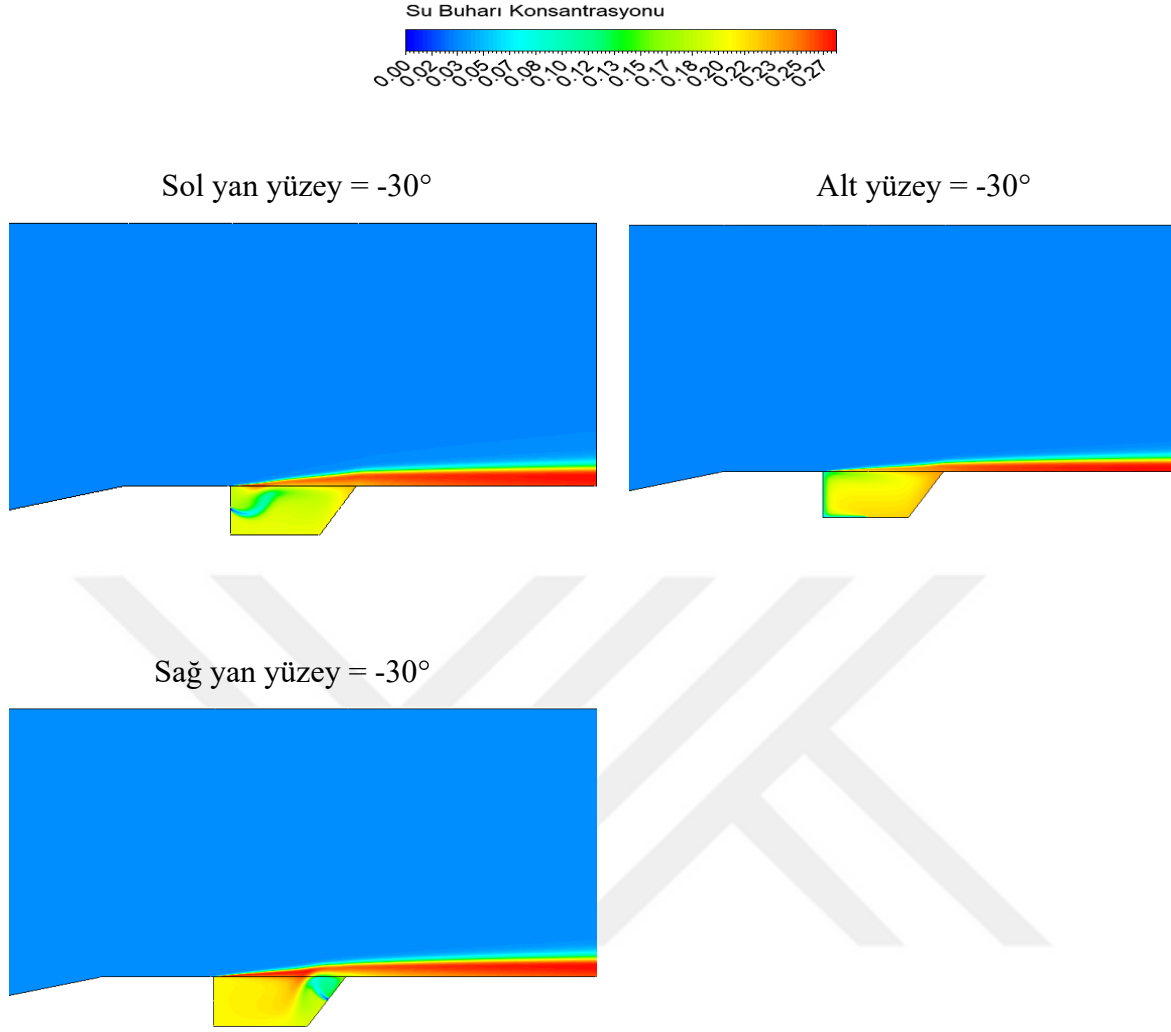
Hız vektörleri ile su buharı sonuçlarının tam örtüşmediği bazı durumlar, türbülansın yalnızca büyüklüğünün değil konum ve etkileşim süresinin de belirleyici olduğunu göstermektedir. En yüksek yanma verimi, boşluk içine etkili yakıt yönlendirmesinin sağlandığı, yerel türbülans yapılarının alevle kararlı etkileşim oluşturduğu durumlarda elde edilmiştir. Bu bağlamda, 60° ve -60° açıları, hem akış yapısı hem de yanma verimi açısından en uygun püskürtme konumları olduğu anlaşılmıştır.



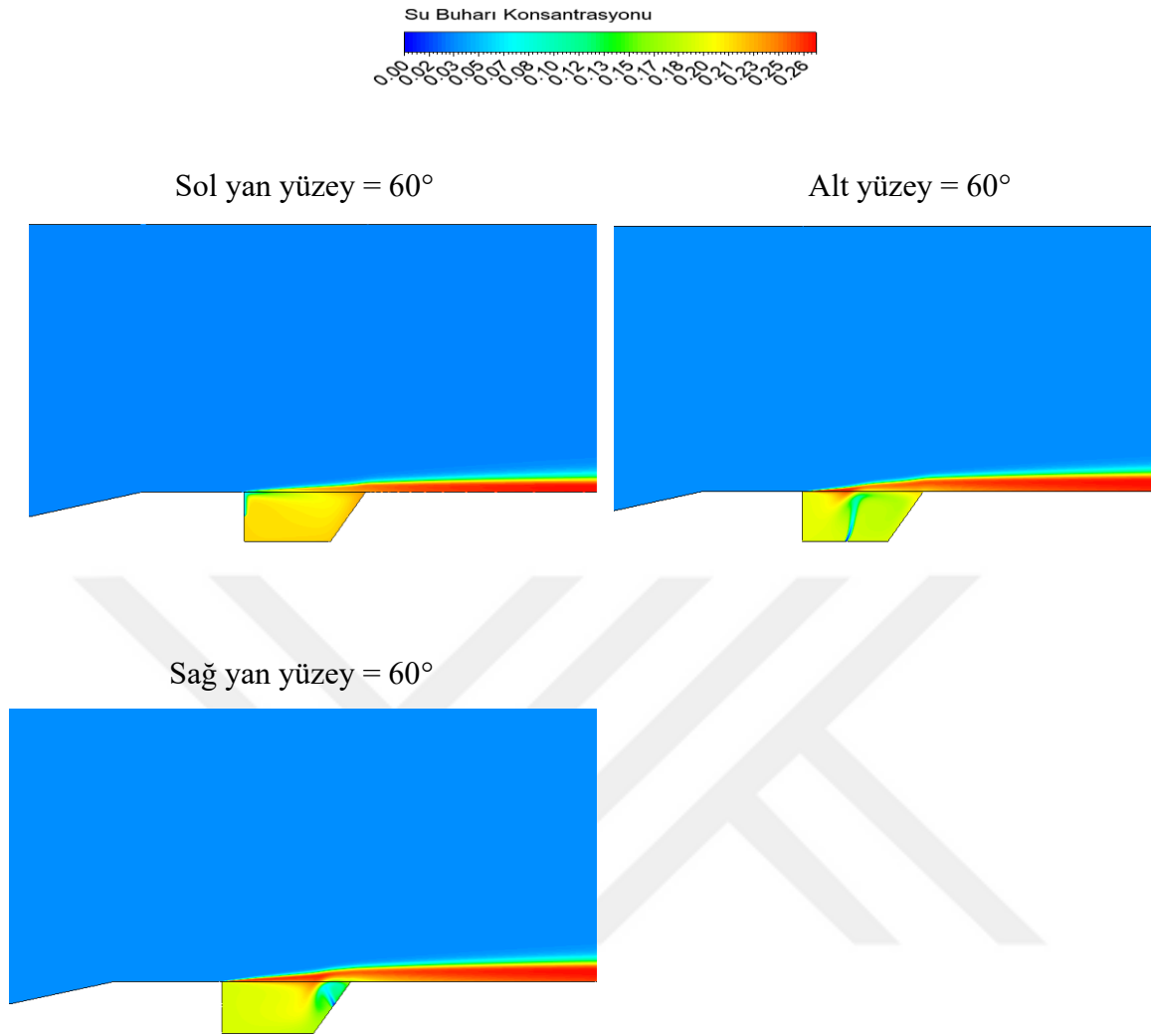
Şekil 4.35. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 90^\circ$)



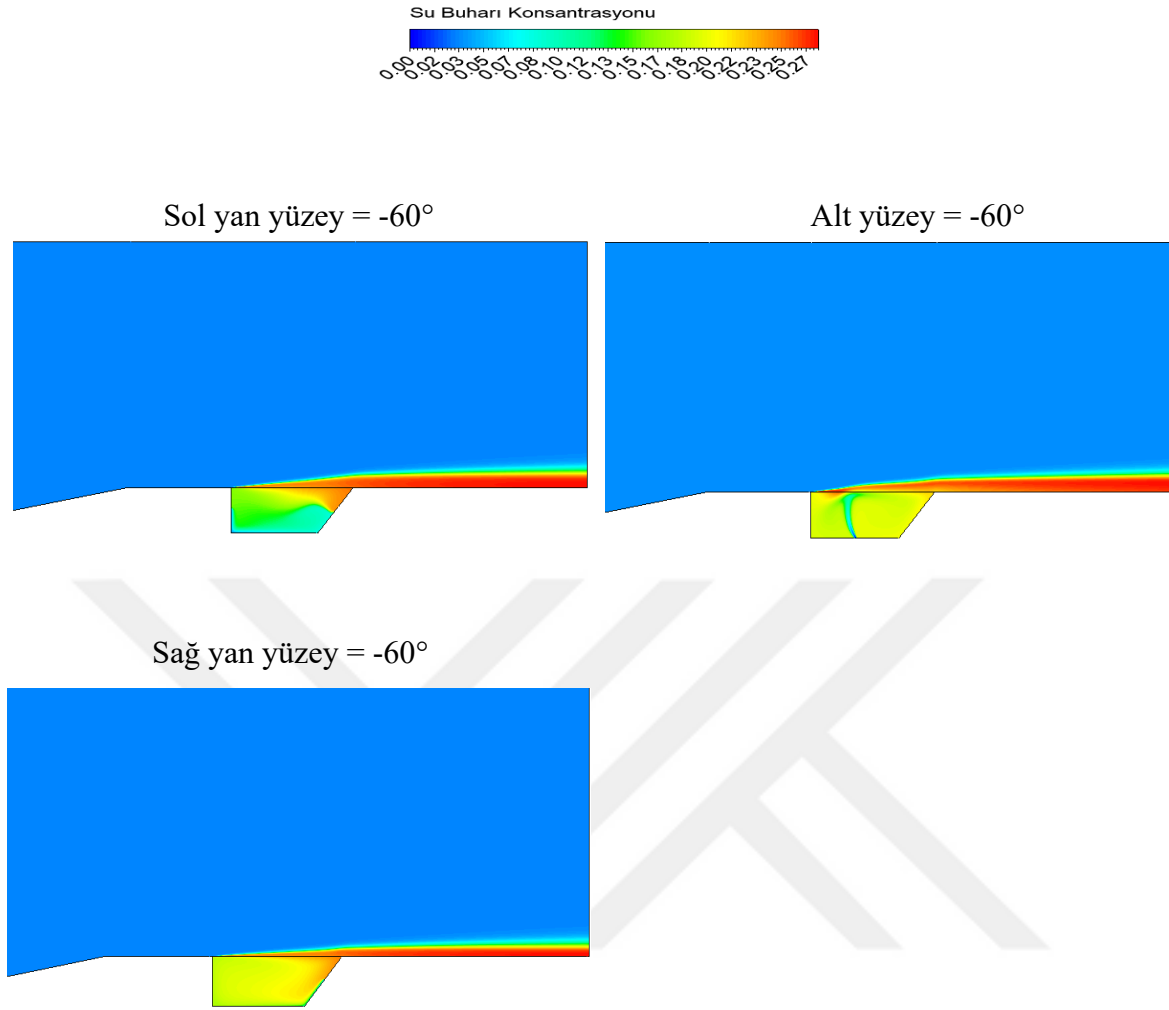
Şekil 4.36. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 30^\circ$)



Şekil 4.37. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = -30^\circ$)

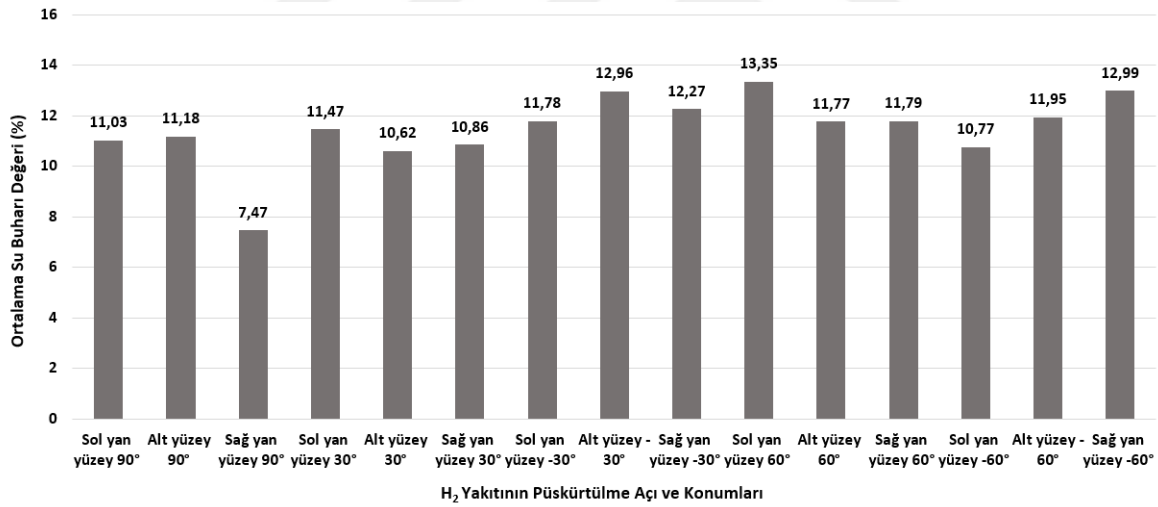


Şekil 4.38. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = 60^\circ$)



Şekil 4.39. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan su buharı konsantrasyonu dağılımı ($\theta = -60^\circ$)

90° açıyla gerçekleştirilen püskürtmelerde en yüksek ortalama su buharı değeri %11,18 ile alt yüzeyde elde edilmiştir. Şekil 4.35'te görüldüğü üzere, alt yüzeyden yapılan püskürtme sonucunda oluşan yoğun kırmızı bölge, yanma ürünlerinin boşluk boyunca etkili bir şekilde yayıldığını göstermektedir. 30° açılı püskürtmelerde, sol yan yüzey %11,47 ve -30° alt yüzeyden yapılan püskürtme ile %12,96 ortalama su buharı değeri elde edilmiştir. Şekil 4.36 ve 4.37'de görülen geniş kırmızı-sarı bölgeler, bu püskürtme açılarıyla daha kararlı ve yayvan bir karışım bölgesi oluştuğunu ve buna bağlı olarak su buharı üretiminin arttığını göstermektedir. En yüksek ortalama su buharı değeri %13,35 ile 60° sol yan yüzey püskürtmesinde gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, püskürtme konumunun yalnızca akış yapısını değil, aynı zamanda yanma verimini belirleyici şekilde etkilediğini göstermektedir. Karışım etkinliği açısından, 60° sol yan yüzey ve -60° sağ yan yüzey püskürtmeleri özellikle öne çıkmaktadır.

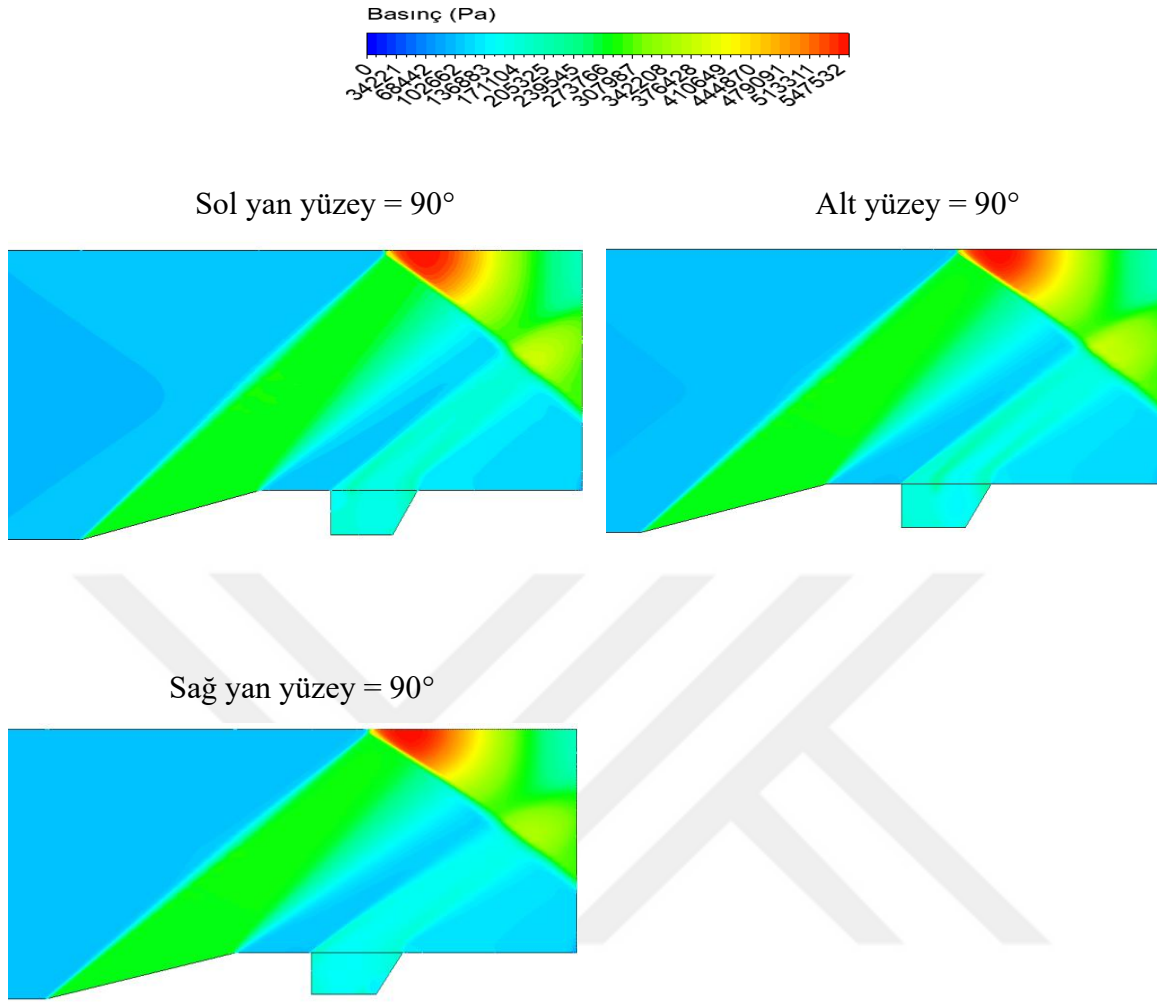


Şekil 4.40. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisinde H₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama su buharı değer dağılımı

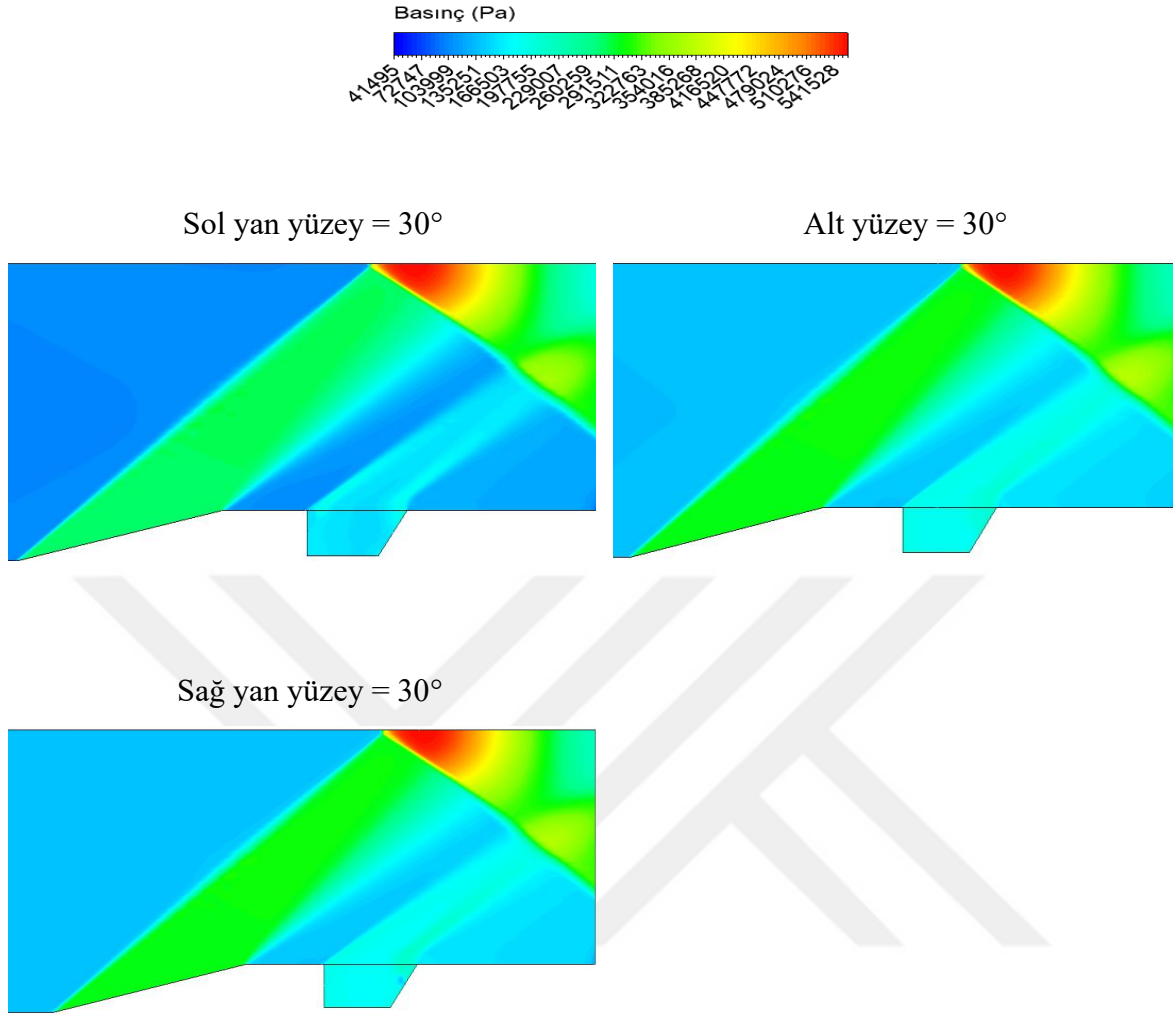
Şekil 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 ve 4.45’da görüldüğü gibi elde edilen basınç dağılımları sunulmuştur. 90° açılı ile püskürtme sonucu boşluğun giriş bölgesinde orta düzeyde bir basınç artışı, çıkışa doğru ise net bir basınç düşüşü mevcuttur. Bu yapı, güçlü hız vektörleriyle uyumlu olup boşlukta bir miktar geri akış oluştuğunu göstermektedir. 30° açılı da ise basınç dağılımını daha dengeli ve boşluk bölgesinde belirgin bir düşük basınç çekirdeği oluşmuştur. Bu çekirdek, geri akış bölgesiyle örtüşerek alev sabitlenmesi açısından uygun koşulların sağlandığını göstermektedir. -30° açılı ile püskürtülme sonucu boşluğun alt kısmına yönelmiş yerel düşük basınç bölgeleri var, ancak geniş bir etki alanına yayılmamış. Bu durum, yakıtın alt bölgede kısmen tutunabildiğini ama alevin sabitlenmesi için yeterli düşük basınç alanı oluşmadığını göstermektedir.

Şekil 4.44’de 60° açılıda ise boşluk bölgesi içerisinde yaygın ve merkezi konumlanmış düşük basınç alanı belirgin şekilde oluşmuştur. Bu yapının, çıkış yönüne doğru kademeli bir basınç düşüşü ile birlikte gelişmesi, boşluk içerisinde kararlı bir geri akış bölgesinin mevcut olduğunu ve yakıtın bu bölgede yeterli süreyle tutulabildiğini göstermektedir. -60° açılı sonucunda boşluk içinde belirgin, ama biraz daha yerel ve alt bölgeye yönelmiş düşük basınç bölgeleri gözlenmektedir.

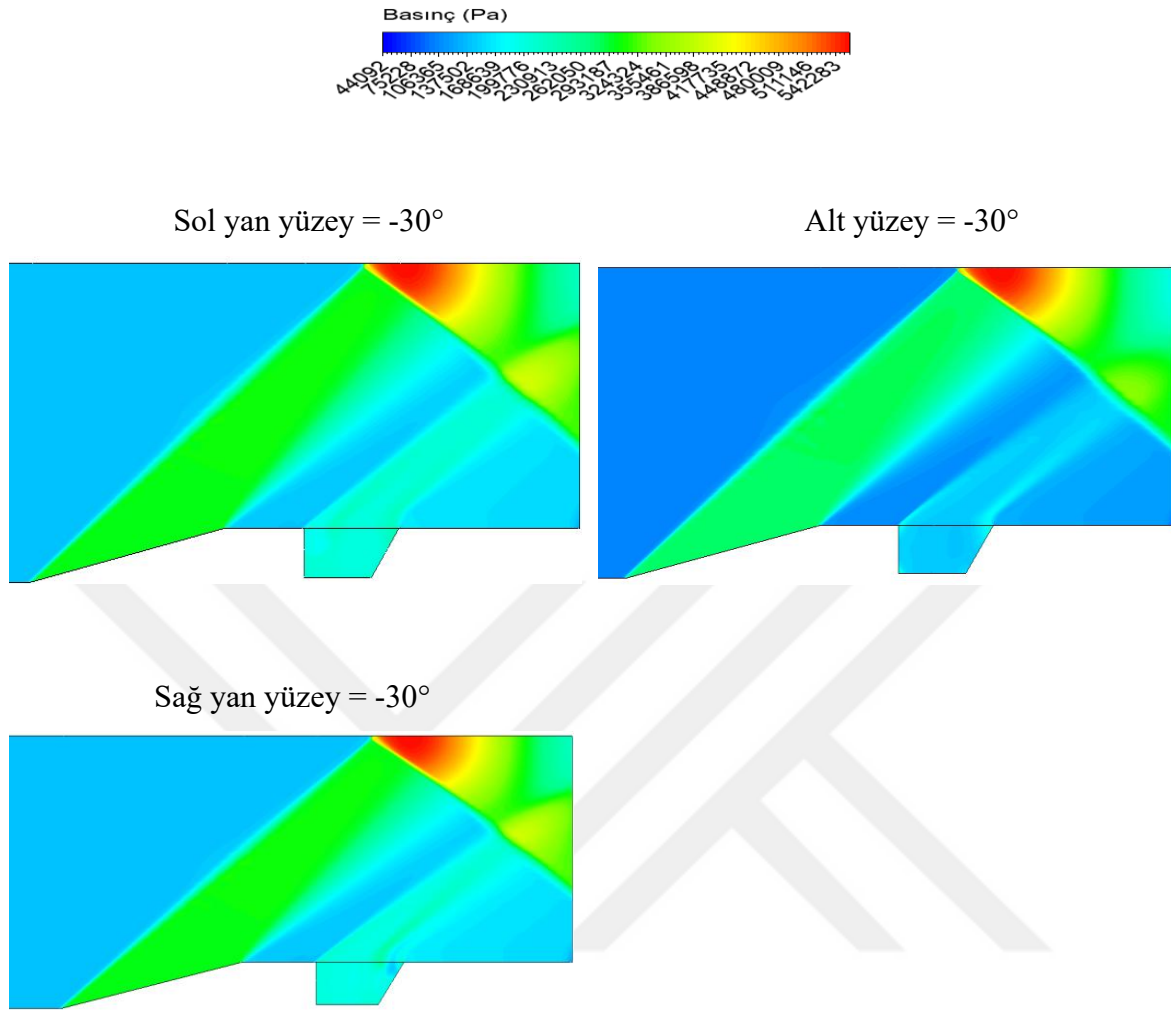
Analiz sonuçlarında 60° ve -60° açılarında, boşluk içinde uygun konumlanmış düşük basınç bölgeleri sayesinde, kararlı geri akış alanları ve yüksek yanma verimi elde edildiği tespit edilmiştir.



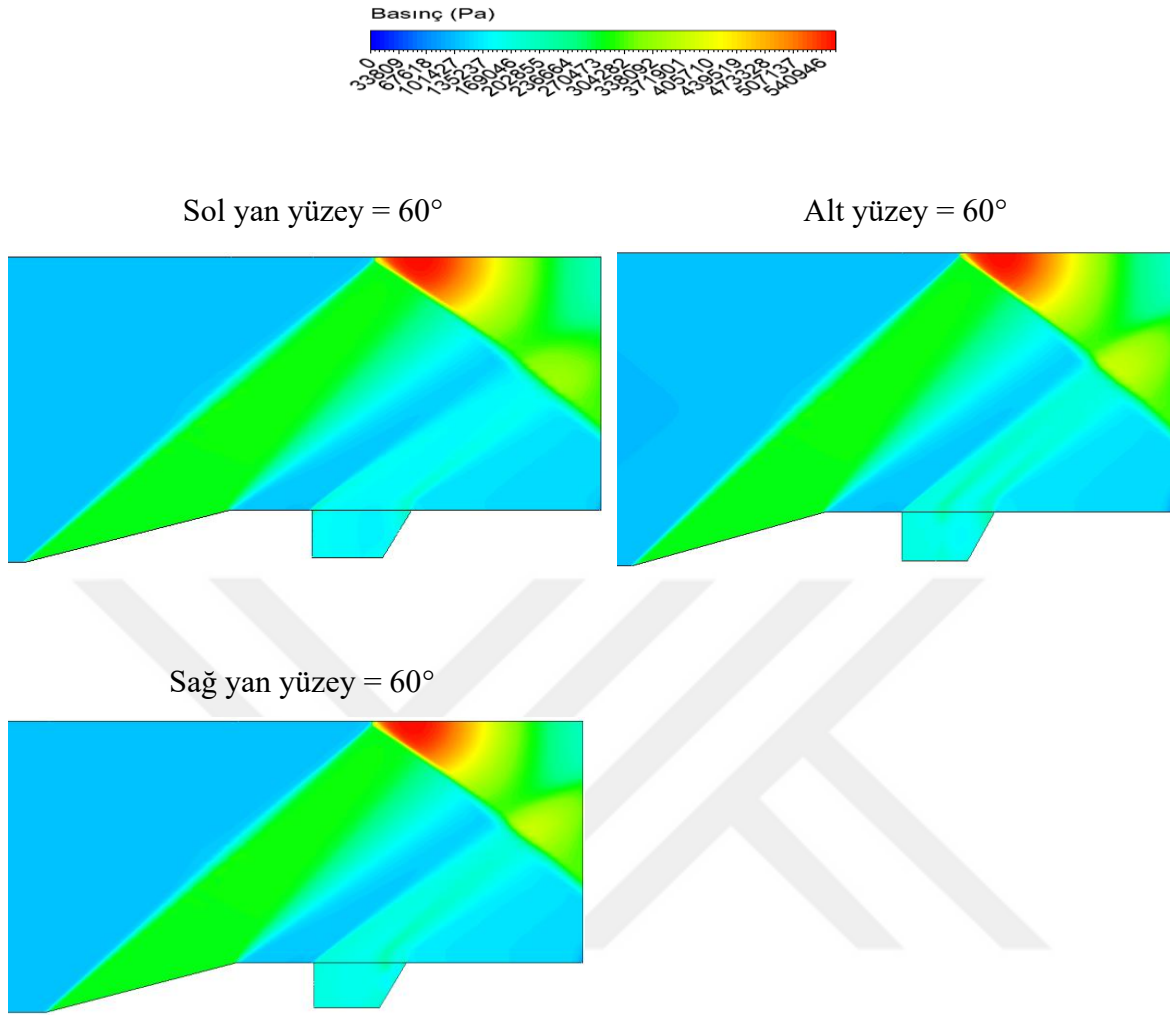
Şekil 4.41. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 90^\circ$)



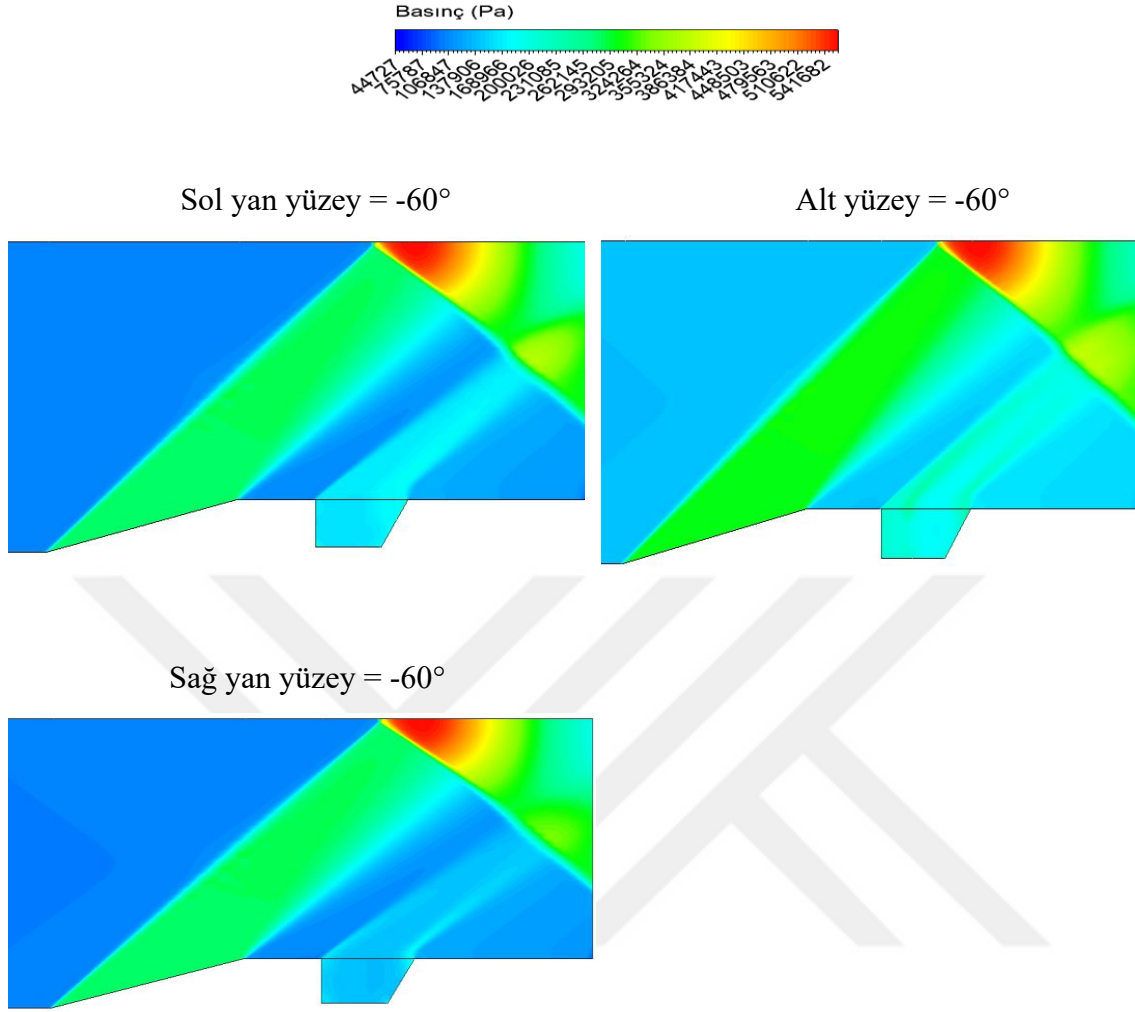
Şekil 4.42. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 30^\circ$)



Şekil 4.43. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = -30^\circ$)

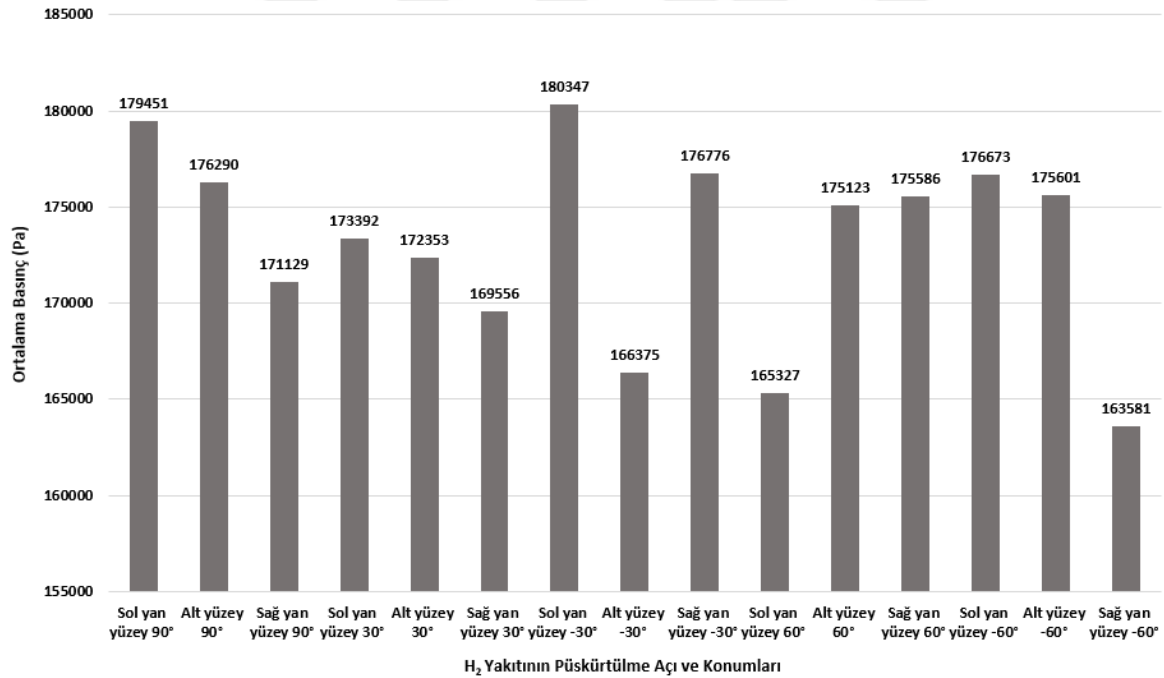


Şekil 4.44. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = 60^\circ$)



Şekil 4.45. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan basınç dağılımı ($\theta = -60^\circ$)

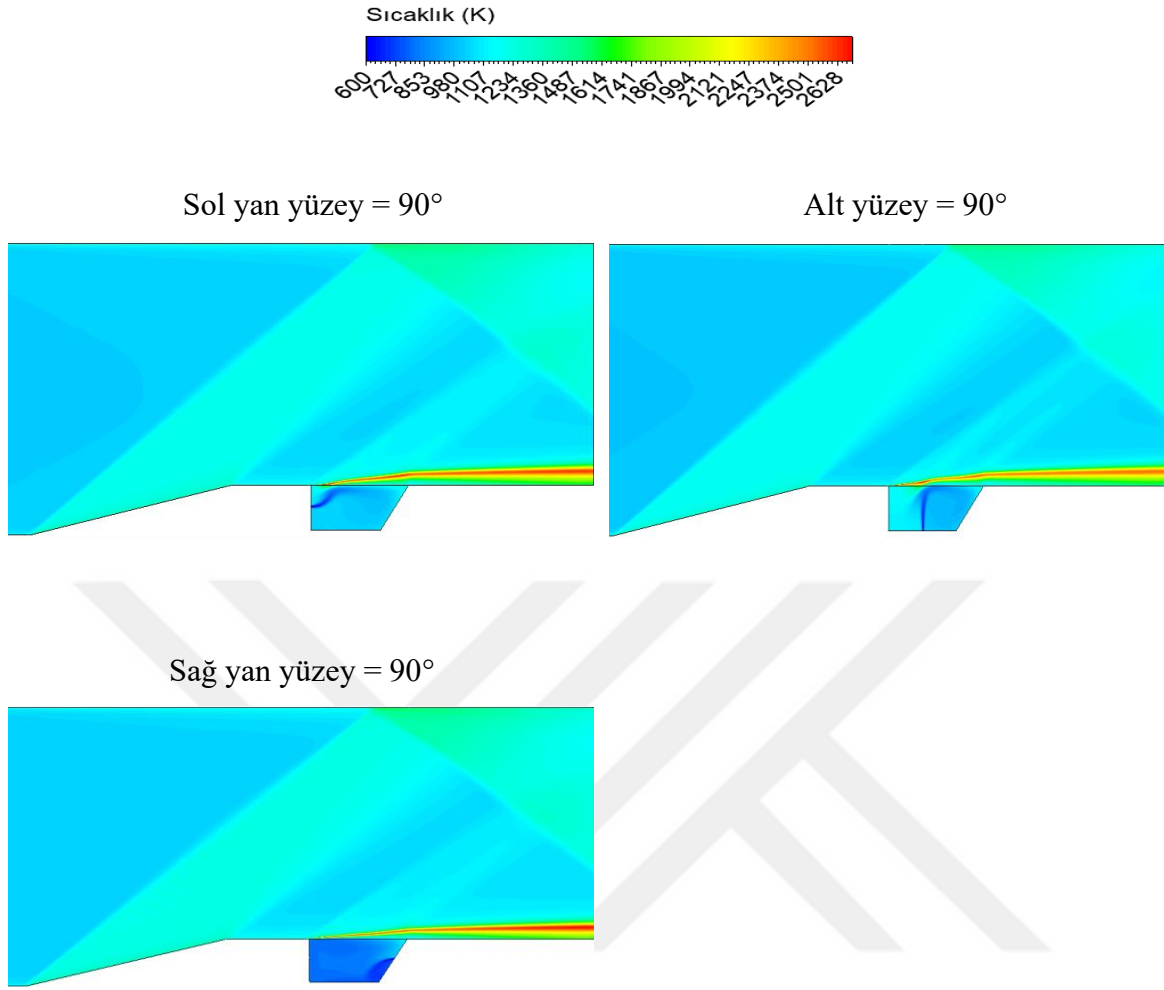
Şekil 4.46’da ortalama basınç değerleri, H₂ yakıtının boşluk-tabanlı bir alev tutucu içerisinde farklı açılar ($\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$, 90°) ve üç farklı yüzeyden (sol yan, alt, sağ yan) püskürtülmesi sonucunda elde edilmiştir. 90° püskürtme açısıyla yapılan analizlerde, en yüksek ortalama basınç değeri 179,451 kPa ile sol yan yüzeyde elde edilmiştir. Şekil 4.41’de görüldüğü gibi, bu açıda püskürtülen jetin dik yönlü etkisi nedeniyle boşluk kenarlarında belirgin kırmızı bölgeler oluşmuş ve basınç yükselmiştir. 30° açılı püskürtmelerde basınç değerleri 169,556–173,392 kPa aralığında değişmektedir. -30° sol yan yüzeyde 180,347 kPa ile tüm analizler arasında en yüksek ortalama basınç elde edilmiştir. Bu sonuç, püskürtmenin ters açıyla boşluğa yönlendirilmesi sonucu akışın sıkışarak yüksek basınç alanı oluşturması ile ilişkilidir (Şekil 4.43). 60° açılı püskürtmelerde genel olarak daha düşük basınçlar gözlemlenmiştir. -60° açılı püskürtmelerde ise en düşük değer 163,581 kPa ile sağ yan yüzeyde görülmüştür. Şekil 4.44 ve 4.45 kırmızı alanların daraldığı ve akışın duvarlara daha paralel ilerleyerek daha düşük direnç oluşturduğu gözlenmektedir.



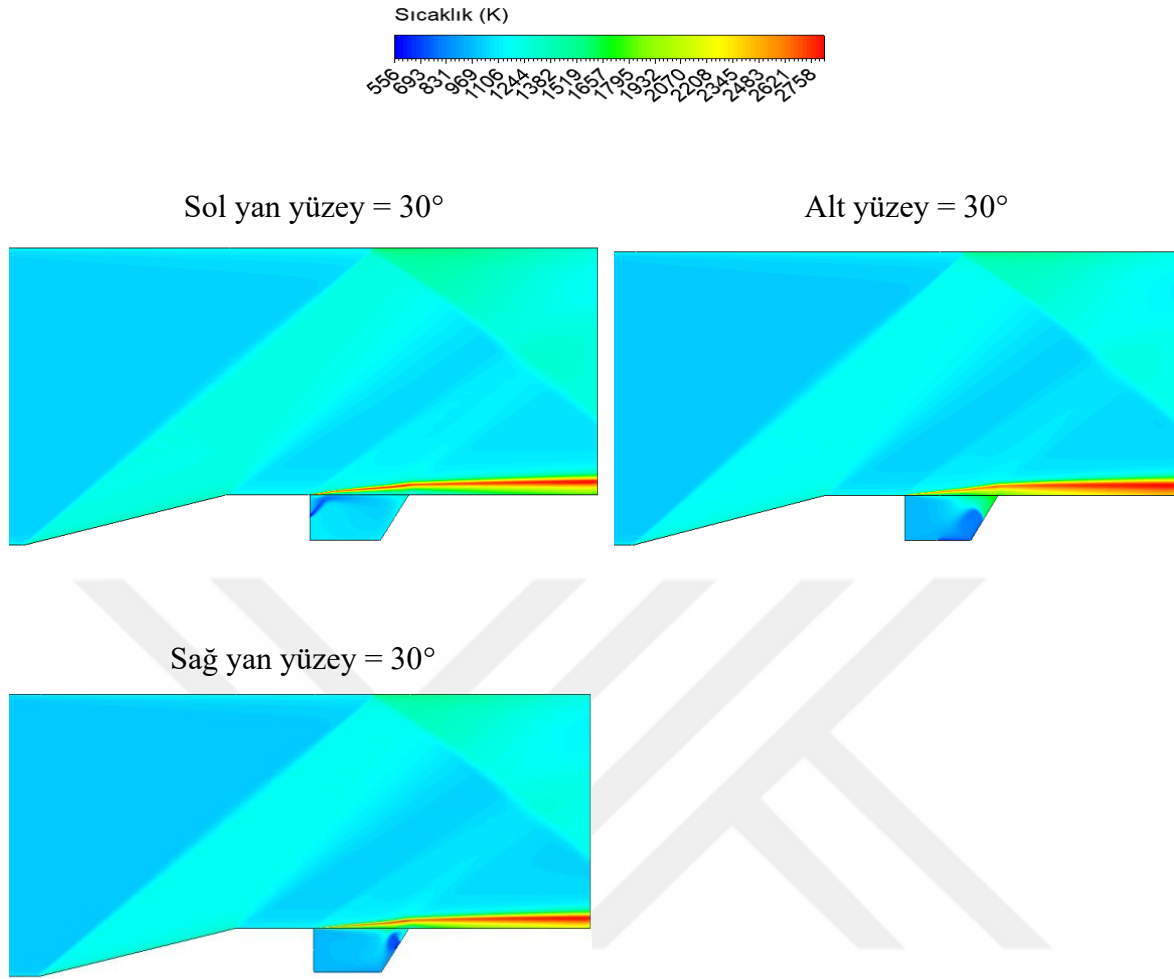
Şekil 4.46. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisinde H₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama basınç dağılımı

Şekil 4.47, 4.48, 4.49, 4.50 ve 4.51 sıcaklık dağılımı sonuçları, boşluk-tabanlı alev tutucu sisteminde farklı püskürtme açılarının alev oluşumu, alev sabitlenmesi ve yanma verimi üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. 90° açısı durumunda, sıcaklık alanı (kırmızı-sarı renk) oldukça sınırlı ve dar bir bölgede yoğunlaşmıştır. Bu açıyla yapılan dik püskürtme, önceki girdap analizlerinde güçlü türbülans yapıları göstermesine rağmen, alevin boşlukta sabitlenmesine yeterli katkı sağlamamıştır. 30° açısında alt yüzey konumunda ise sıcaklık dağılımı daha homojen ve dengeli bir yapı sergilemektedir. Bu durum, su buharı konsantrasyonunun yüksek olmasıyla uyumludur. -30° püskürtme açısında, sıcaklık alanı alt yüzey boyunca sınırlı kalmış, boşluk içerisine tam olarak yayılmamıştır. Düşük basınç çekirdeği ve zayıf vorteks yapıları da bu durumu desteklemektedir.

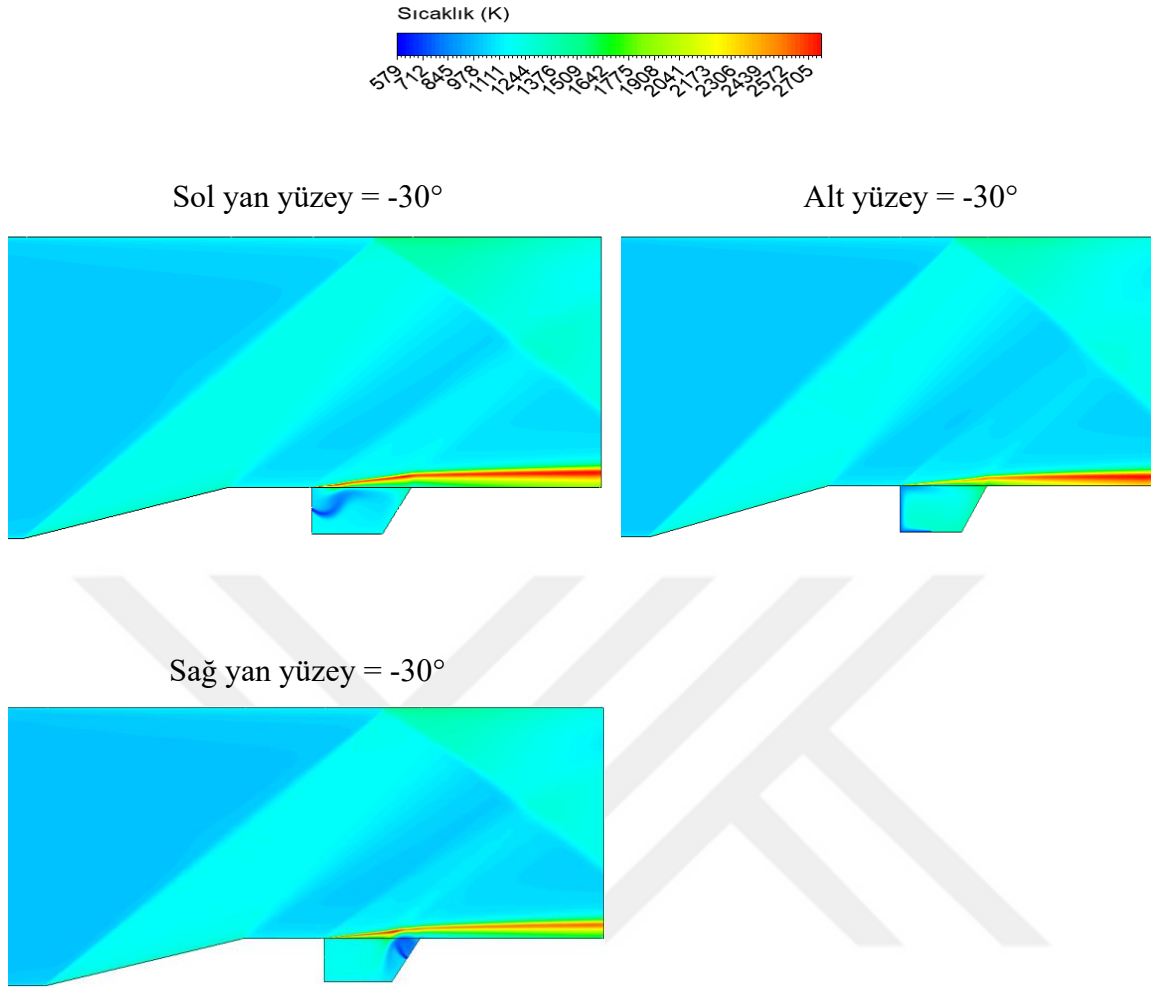
Şekil 4.50'de 60° açısında da sıcaklık dağılımı oldukça etkili olup, boşluk içerisine yönelmiş ve kararlı bir alev oluşumu sağlamıştır. Her ne kadar girdap yapısı görsel olarak çok belirgin olmasa da, sıcaklık alanı ve su buharı konsantrasyonu bu konumun yüksek yanma verimliliğine işaret ettiğini göstermektedir. -60° sol yan yüzey püskürtme açısında ise sıcaklık dağılımı, tüm açılar içerisinde en geniş ve kararlı yapıya sahiptir. Alev boşluğun iç kısmına düzgün şekilde yerleşmiş, sıcaklık alanı hem simetrik hem de güçlüdür. Bu, önceki bulgularda görülen yüksek su buharı konsantrasyonu, kararlı basınç alanı ve güçlü geri akış bölgeleriyle uyumlu olup, en verimli yanma koşullarının bu konfigürasyonda elde edildiğini ortaya koymaktadır.



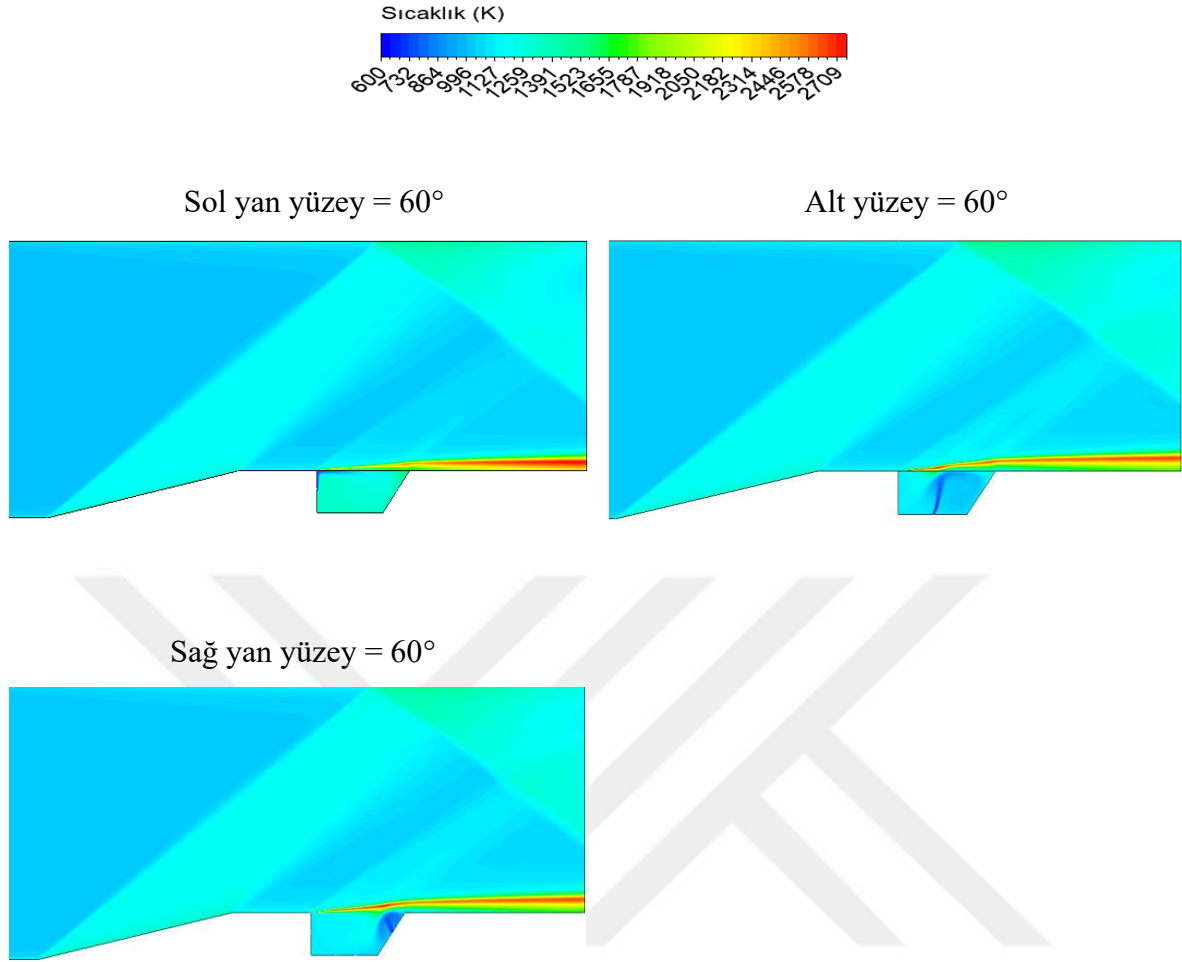
Şekil 4.47. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 90^\circ$)



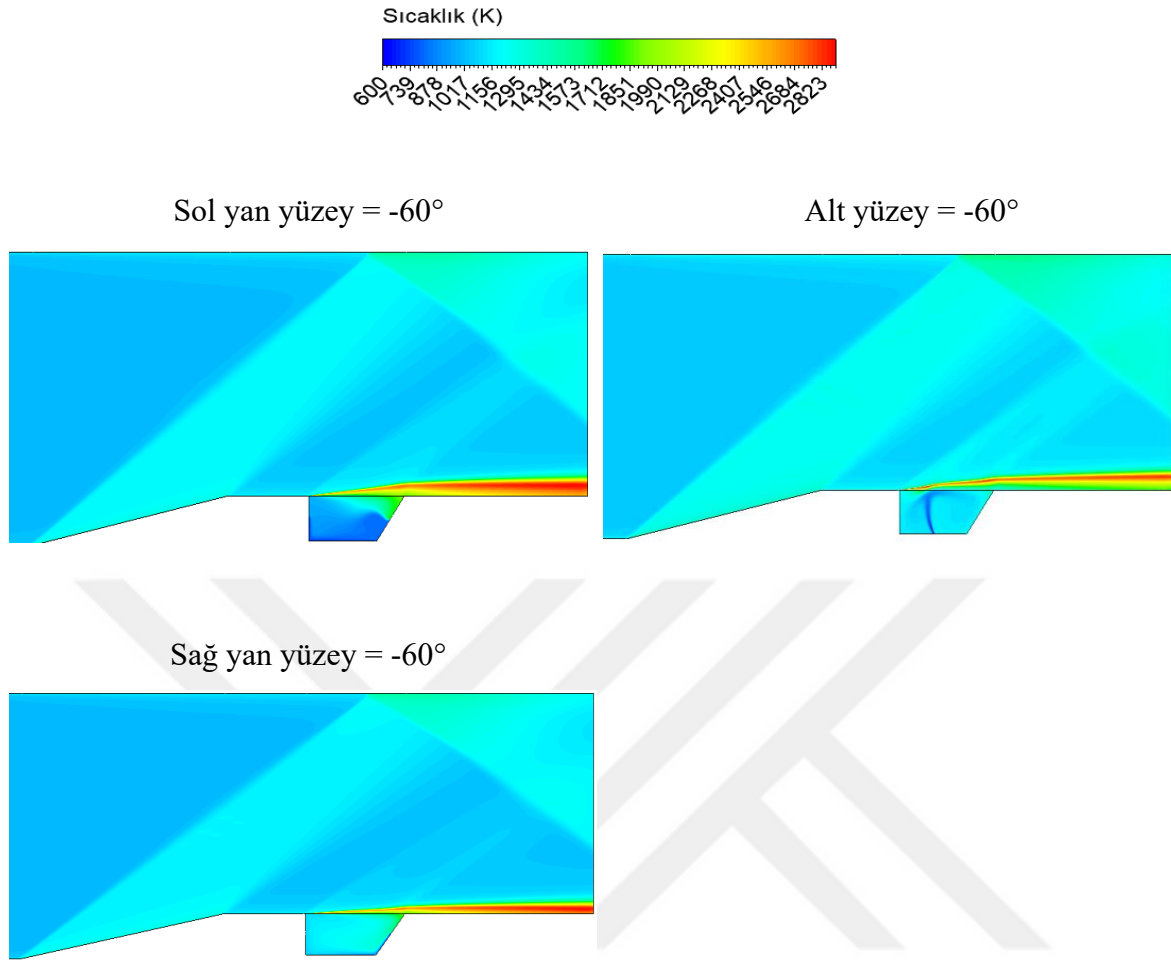
Şekil 4.48. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 30^\circ$)



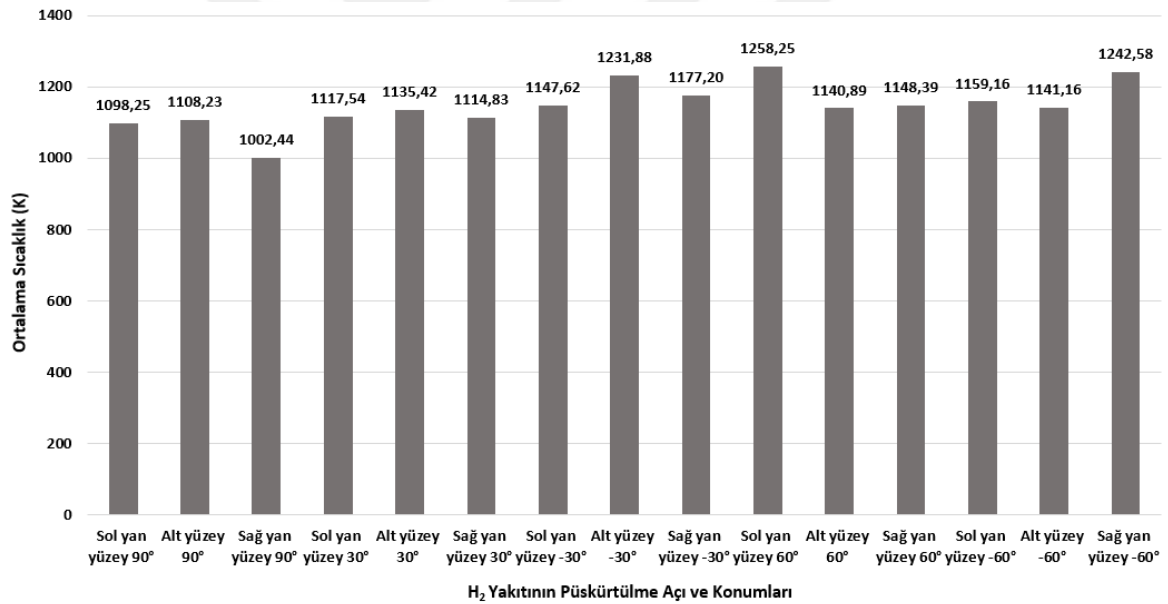
Şekil 4.49. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = -30^\circ$)



Şekil 4.50. Boşluk-tabanlı alev tutucu için farklı konumlardan yakıt püskürtülmesi sonucu oluşan sıcaklık dağılımı ($\theta = 60^\circ$)



90° püskürtme açısıyla yapılan uygulamalarda, sıcaklık değerlerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.47, sıcaklık dağılımının sınır tabaka etkisi altında kaldığı ve tutucu duvarlarına daha yakın sınırlı bir bölgeye yayıldığı görülmektedir. Bu durum, dik püskürtmenin ana akıma karşı yüksek direnç oluşturması ve karışımı sınırlamasına bağlı olduğunu göstermektedir. 30° açılı püskürtmelerde özellikle alt yüzeyden yapılan püskürtmeyle 1135,42 K sıcaklık değeri elde edilmiştir. Şekil 4.48’de geniş ve uzayan sıcak bölge, karışım verimliliğinin arttığını göstermektedir. -30° püskürtmelerde özellikle alt yüzeyden yapılan püskürtmeyle 1231,88 K, sağ yan yüzeyde ise 1177,20 K sıcaklık değerleri elde edilmiştir. -60° açılı püskürtmelerde sıcaklık dağılımı daha homojen ve kararlı bir yapı göstermiştir. Sol yan yüzeyden püskürtme sonucunda 1258,25 K ile en yüksek değer elde edilmiştir.



Şekil 4.52. Boşluk-tabanlı alev tutucu geometrisinde H₂ yakıtının farklı püskürtme açısı ve konumlarına göre ortalama sıcaklık dağılımı

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dikme-tabanlı ve boşluk-tabanlı alev tutucu geometrileri üzerinde farklı püskürtme açıları ve enjektör konumlarının (alt, orta, üst / alt, sol yan, sağ yan) akış yapısı ve yanma verimi üzerindeki etkileri sayısal analizlerle araştırılmıştır. Hız vektörleri ve akım çizgileri, basınç dağılımı, sıcaklık dağılımları ve su buharı konsantrasyonu gibi parametreler üzerinden yapılan değerlendirmelerde, püskürtme stratejisinin alev sabitlenmesi, geri akış oluşumu ve türbülans karakteristiği üzerinde belirleyici olduğu ortaya konmuştur. Analiz sonuçları doğrultusunda aşağıdaki temel bulgular elde edilmiştir:

- Dikme-tabanlı alev tutucuda gerçekleştirilen sayısal analizler, püskürtme açısı ve konumunun akış yapısını doğrudan etkilediği görülmüştür. Özellikle 90° açıyla ve orta noktadan püskürtme yapıldığında akım simetrisi korunmuş, geri akış bölgesi daha dengeli ve geniş oluşmuştur. Bu durum, alevin kararlı bir şekilde sabitlenmesine büyük avantaj sağlamıştır.
- Su buharı konsantrasyonu analizleri, püskürtme açısı ve konumunun karışım kalitesine etkisi oldukça belirgindir. 90° açılı püskürtmelerde, özellikle üst noktadan püskürtme yapıldığında, eksen boyunca düzenli, simetrik ve yoğun bir karışım oluşmuştur. Üst noktadan püskürtme sırasında %5,13 gibi en yüksek su buharı konsantrasyonu elde edilmiş ve yanma verimi artış göstermiştir. Alt ve orta noktalarda ise bu değer %5,06 olarak elde edilmiştir.
- Basınç dağılımı analizleri, düşük basınç bölgelerinin geri akım yapılarıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle 90° püskürtme açısıyla ve orta noktadan yapılan analizde, 123,256 kPa ile en yüksek ortalama basınç değeri elde edilmiştir. 30° ve -30° açılarda gerçekleştirilen püskürtmelerde ise ortalama basınç seviyeleri düşüş göstermiş, ters yönlü püskürtmelerde basınç konturlarında dalgalı ve düzensiz yapılar gözlemlenmiştir.

- Sıcaklık dağılım analizleri sonucunda, 90° püskürtme açısı ve özellikle orta nokta konumunda, sıcaklık alanının merkez eksenini boyunca simetrik olarak yayıldığı ve yaklaşık 1192,27 K ortalama sıcaklığa ulaştığı gözlemlenmiştir. -30° püskürtme açısıyla yapılan analizde, üst yüzeyden püskürtme durumunda ortalama sıcaklık değeri 1198,33 K elde edilmiştir. Ancak akışın yukarı doğru saptığı gözlemlenmektedir.
- Boşluk-tabanlı alev tutucuda ise en başarılı sonuçlar, -60° açısında alt yüzeyden yapılan püskürtmelerle elde edilmiştir. Bu konfigürasyonlarda boşluk içerisinde simetrik ve belirgin geri akış bölgeleri oluşmuş, çift yönlü vorteks yapıları sayesinde yakıtın boşlukta daha uzun süre tutulması sağlanmıştır. Bu yapı, hem kararlı alev sabitlenmesine hem de homojen karışım bölgelerine olanak tanımıştır.
- Özellikle 60° sol yan yüzeyden püskürtme sonucunda ortalama %13,35 ortalama su buharı değeri elde edilmiştir. Boşluk bölgesinde yüksek yoğunluklu ve geniş yayılım gösteren kırmızı bölgeler gözlemlenmiştir. Bu durum, yakıtın etkili şekilde yandığını ve reaksiyon bölgesinde kararlı biçimde tutulduğunu ortaya koymaktadır. 60° püskürtme açısı, hem akış yapısının yönlendirilmesi hem de yanma verimi açısından en uygun sonuçları vermiştir.
- Basınç dağılımları, geri akım alanlarının varlığını destekleyici önemli bir göstergedir. Özellikle boşluk içinde merkezlenmiş düşük basınç bölgeleri, geri beslemeli akış yapılarının habercisi olarak değerlendirilmiş ve -60° ile 60° açılarında bu yapılar net şekilde gözlemlenmiştir. Açılı azaldıkça ($\pm 30^\circ$) bu bölgelerin daraldığı ve konumunun saparak kararsızlığa neden olduğu anlaşılmıştır.
- Sıcaklık analizlerinde, 60° açılı püskürtmelerde homojen ve kararlı bir yapı elde edilmiştir. Sol yan yüzeyden 60° açıyla püskürtme sonucu 1258,25 K ile tüm konfigürasyonlar içerisinde en yüksek ortalama sıcaklık değeri elde edilmiştir.

- Dikme-tabanlı ve boşluk-tabanlı alev tutucu için süpersonik akış ve yanma sırasında meydana gelen yüksek sıcaklık ve basınç koşullarından kaynaklı malzemede zorlanma ise bir dezavantajdır.
- Su buharı konsantrasyonu dağılımı, yanma verimliliğini ve karışım kalitesini değerlendirmek açısından önemli bir göstergedir. Homojen bir su buharı dağılımı, yakıt ve havanın düzgün karıştığını ve yanmanın eksiksiz gerçekleştiğini gösterir. Bu nedenle dikme-tabanlı alev tutucuda üst noktadan 90° açıyla püskürtme, boşluk-tabanlı alev tutucuda ise 60° açıyla sol yan yüzeyden püskürtme en uygun açı ve konumun olduğu gözlemlenmiştir.
- Dikme-tabanlı alev tutucuda en yüksek ortalama su buharı değeri %5,13, boşluk-tabanlı alev tutucuda ise %13,35 olduğu bilinmektedir. Dikme-tabanlı alev tutucuda ortalama su buharı değişimi %15,8 (maksimum ve minimum ortalama su buharı değeri arasındaki oran), boşluk-tabanlı alev tutucudaki ortalama su buharı değişimi ise %78 değerindedir. İki alev tutucu arasında kıyaslama yapılacak olursa boşluk-tabanlı alev tutucu, dikme-tabanlı alev tutucuya göre hava-yakıt karışımının daha fazla miktarda ve uzun süre yanmanın gerçekleştiğinin göstergesidir.

Sonuçlar, literatürde deneysel olarak raporlanmış verilerle büyük ölçüde tutarlılık göstermektedir. Özellikle simetrik enjeksiyonla sağlanan düzenli vorteks yapılarının yanmayı stabilize ettiği; eksenden uzak püskürtmelerde ise bu yapının bozulduğu yönündeki gözlemler, mevcut çalışmanın doğruluğunu ve güvenilirliğini pekiştirmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, alev tutucunun geometrik yapısı kadar, püskürtme parametrelerinin (konum ve açı) hassas şekilde belirlenmesinin de yanma kararlılığı ve verimi açısından oldukça önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışma, özellikle scramjet benzeri yüksek hızlı yanma sistemlerinde, yakıt enjeksiyon tasarımının akış-karışım yapısına etkisini ortaya koymakta ve mühendislik tasarımları için referans sağlayabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Choubey, G., Patel, O., Solanki, M., Ingenito, A., Devarajan, Y., and Tripathi, S. (2023). Influence of cavity floor injection strategy on mixing improvement study of a splitter plate-assisted supersonic combustor. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 155, 995-1012.
- Fangbin, L. I. U., ZHANG, R., ZHENG, R., and Qiang, S. U. N. (2025). Influence of injection positions on combustion performance in kerosene-fueled multi-cavity Scramjet combustor. *Chinese Journal of Aeronautics*, 103403.
- Gruber, M. R., Baurle, R. A., Mathur, T., and Hsu, K. Y. (2001). Fundamental studies of cavity-based flameholder concepts for supersonic combustors. *Journal of Propulsion and power*, 17(1), 146-153.
- Guerra, R., Waidmann, W., and Laible, C. (1991, December). An experimental investigation of the combustion of a hydrogen jet injected parallel in a supersonic air stream. *In 3rd International Aerospace Planes Conference* (p. 5102).
- 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.
- Kireeti, S. K., Sastry, G. R., and Gugulothu, S. K. (2022). Numerical investigation on implication of innovative hydrogen strut in comparison with multi strut injector on performance and combustion characteristics in a scramjet combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(99), 41932-41946.
- Kummitha, O. R. (2022). Effect of inclined fuel injection in the strut wake region for a hydrogen fueled scramjet combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(68), 29526-29541.
- Lakka, S., Randive, P., and Pandey, K. M. (2021). Implication of geometrical configuration of cavity on combustion performance in a strut-based scramjet combustor. *Acta Astronautica*, 178, 793-804.
- Li, J., Xia, Z., Yan, M., Zhang, H., Dang, J., and Zhao, M. (2025). Numerical simulation on the combustion characteristics of scramjet at high Mach number. *Defence Technology*.
- Li, L., Rong, C., Hu, S., Zhang, B., and Liu, H. (2024). Intelligent variable strut for combustion performance optimization of a wide-range scramjet engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 1-13.
- Liu, X., Gerdroodbary, M. B., Sheikholeslami, M., Moradi, R., Shafee, A., and Li, Z. (2020). Effect of strut angle on performance of hydrogen multi-jets inside the cavity at combustion chamber. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(55), 31179-31187.
- Lu, L. Z., Sheng, Z. Q., Ji, X. Y., Liao, W. B., Liu, J. Y., and Wu, Y. F. (2025). Utilization of vortices to promote combustion in a twin-strut scramjet combustor. *Fuel*, 386, 134216.

- Musielak, D. (2022). Scramjet Propulsion. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Nair, P. P., Ananthu, J. P., and Narayanan, V. (2024). Influence of passive strut on the mixing and combustion performance enhancement. *Acta Astronautica*, 219, 1-7.
- Nair, P. P., Suryan, A., and Narayanan, V. (2022). Modal analysis of mixing characteristics in scramjet combustor with passive struts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(81), 34656-34675.
- Petrescu, R.V., Aversa, R., Akash, B., Bucinell, R., Corchado, J., Berto, F., Petrescu, F. I. (2017). Modern Propulsions for Aerospace-A Review. *Journal of Aircraft and Spacecraft Technology*, 1-8.
- Pranaykumar, S., Mengu, D., and Prakash, A. (2023). Effect of crossflow impinging type throttling mechanism on combustion characteristics of a strut-based scramjet combustor. *Aerospace Science and Technology*, 142, 108648.
- Rajesh, A. C., Jeyakumar, S., Jayaraman, K., Karaca, M., and Athithan, A. A. (2023). The implications of dual cavity location in a strut-mounted scramjet combustor. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 145, 106855.
- Saravanamuttoo, H., Rogers, G., Cohen, H., Straznicky, P., and Nix, A. (2017). Gas Turbine Theory. Harlow: Pearson Education Limited.
- Shyy, W. and Rycroft, M. J. (2009). The Scramjet Engine. Cambridge: Cambridge University Press.
- Suneetha, L., Randive, P., and Pandey, K. M. (2021). Implication of self-throttling on combustion performance in a strut-based scramjet combustor. *Acta Astronautica*, 186, 228-241.
- Walsh, P. P., and Fletcher, P. (2004). Gas Turbine Performance. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Wang, G., Cheng, Q., Liu, S., Li, F., and Liu, H. (2025). Thermal and drag reduction performance evaluation of a cavity-based scramjet combustor cooled by distributed hydrocarbon film. *Applied Thermal Engineering*, 260, 124981.
- Wang, K., and Cao, W. (2025). Numerical investigation of mixing enhancement in a cavity-based supersonic combustor using the upstream wavy wall. *International Journal of Hydrogen Energy*, 114, 18-30.
- Yan, L., Liao, L., Huang, W., and Li, L. Q. (2018). Nonlinear process in the mode transition in typical strut-based and cavity-strut based scramjet combustors. *Acta Astronautica*, 145, 250-262.
- Yüzücü, M. ve Kurşun, B. (2023). Scramjet motorlarda alev tutucu geometrisinin hava-yakıt karışımına etkisinin sayısal olarak araştırılması. *Uluslararası Marmara Bilimler Kongresi'nde sunulan bildiri*. Kocaeli, Türkiye

Zhou, Z., Cao, T., Liang, R., and Mi, Y. (2025). Influence of the fuel jet injection angle on the combustion process of a gel scramjet. *Aerospace Science and Technology*, 162, 110180.

Zhu, Y. Peng, W. Xu, R. and Jiang, P. (2018). Review on active thermal protection and its heat transfer for airbreathing hypersonic vehicles. *Chinese Journal of Aeronautics*



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı – Soyadı: Mevludiye KARABULUT

Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet Yılı
Lisans	Amasya Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2020
Yüksek Lisans	Amasya Üniversitesi / Makine Mühendisliği A.B.D.	2025

Bilimsel Faaliyetler

1. Karabulut, M. and Kurşun, B. Numerical investigation of the effects of fuel injection location and angle on fuel-air mixing in cavity-based scramjet engines. 5. Bilisel International TurAbdin Scientific Research and Innovation Congress, 10-11 May 2025, Mardin /Türkiye.