

SERBEST DÖNMELİ YÜKSEK İRTİFA KOŞULLARINDA BİR TURBOJET MOTORUNUN YENİDEN TUTUŞMA KARAKTERİSTİĞİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ

Çağdaş Cem Ergin¹ ve Baran İper²
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Ankara

Sıtkı Uslu³
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Ankara

ÖZET

Bu bildiride turbojet motora ait halka tipi yanma odasının serbest dönmeli yüksek irtifa koşullarında yeniden tutuşma karakteristiği Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile incelenmiştir. Yüksek irtifada düşük sıcaklık ve basınç gibi alev oluşumu ve kararlılığını etkileyen olumsuz koşullar sebebiyle yanma odası içerisindeki alev sönebilir. Bu durumda alevin tekrar oluşması ve yanma odası boyunca yayılarak kararlı hale gelebilmesi için ateşleyici sistemi kullanılır. Yapılan bu çalışmada 2 ateşleyici sistemine sahip 10 enjektörlü halka tipi yanma odası için farklı sıcaklık, basınç ve yakıt-hava oranı durumlarının alev oluşumu ve yayılımı üzerine etkisi numerik olarak incelenmiştir. Çözüm açısından bağımsızlaştırma çalışması yapılarak problemin çözümü için en uygun çözüm ağı sayısı belirlenmiştir. Yapılan analizlerde türbülans modeli olarak yeniden tutuşma için literatürde de sıklıkla tercih edilen Büyük Burgaç Benzetim yaklaşımı kullanılmıştır. Çözüm açısından bağımsızlaştırma çalışmasına ek olarak, Büyük Burgaç Benzetim yaklaşımının çözünürlüğünün belirlenmesinde kullanılan kalite indeksi (LES_IQ) ve ağ-altı türbülans kinetik enerjisinin toplam kinetik enerjiye oranını ifade eden M indeksi hesaplanmış ve çözüm ağının yeterliliği belirlenmiştir. Yanma modeli olarak kimyasal kinetikten gelen reaksiyon hızlarının da hesaplandığı Hibrit Eddy Break-up (HEBU) yanma modeli kullanılmıştır. Yeniden tutuşma analizlerinde alev oluşumunu sağlayacak en uygun ateşleyici konumunun belirlenebilmesi için Büyük Burgaç Benzetim (BBB) yaklaşımı kullanılarak soğuk akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analizlerde ateşleyici bölgesindeki hız, hava-yakıt eşlenik katsayısı, türbülans ve girdap yoğunluğu parametreleri incelenerek ateşleyici için en uygun konum belirlenmiştir. 3 boyutlu zamana bağlı gaz fazından gerçekleştirilen reaktif HAD analizleri için Star CCM+ ticari yazılımı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda turbojet motorun tutuşma karakteristiğinin belirlenmesinde HAD analizlerinin doğruluğu ve etkinliği incelenmiştir.

Kısaltmalar

τ_{ij} = viskoz gerilme tensörü

μ_t = türbülanslı dinamik viskozite

H = toplam entalpi

k_g = ısı iletim katsayısı

S_H = reaksiyonlar sonucu çıkan enerji

S_C = reaksiyonlar için üretim ya da tüketim miktarı

D = kütle yayılım

Y = kütle oranı

Δ = uzunluk ölçeği

κ = von karman sabiti

C_t = deneysel sabit

C_ω = deneysel sabit

S_ω = deformasyon parametresi

S_{ij} = gerilim tensörü

S_{ij}^d = deformasyon tensörü

l = ağ-altı uzunluk ölçeği

t = ağ-altı zaman ölçeği

k_{sgs} = ağ-altı türbülans kinetik enerjisi

ε_{sgs} = ağ-altı yitim oranı

A_p = ön faktör

E_A = aktivasyon enerjisi

M = mol ağırlığı

¹ Araştırma Görevlisi, Makine Müh. Böl., E-posta: cagdasergin@etu.edu.tr

² Araştırma Görevlisi, Makine Müh. Böl., E-posta: b.iper@etu.edu.tr

³ Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: suslu@etu.edu.tr

GİRİŞ

Günümüzde özellikle askeri uçaklarda kullanılan gaz türbini motorlarında kolay ve güvenilir ateşleme gerçekleştirebilmek oldukça önemlidir. Gaz türbinlerinde uçuş boyunca alev sönmesi durumunda, alevin tekrar oluşumu ve yanma odası boyunca yayılımı için ek gereksinimlere ihtiyaç vardır. Düşük basınç ve sıcaklığın görüldüğü yüksek irtifa koşullarında, olumsuz iklim koşullarında ya da aşırı miktarda su veya buzlanmanın olduğu ıslak bir pistten kalkış sırasında ateşleme sisteminin alev sönmesi durumlarına karşı sürekli güvenilir bir şekilde çalışabilir olması gerekmektedir. Tutuşturulabilir bir yakıt-hava karışımının ateşlenmesi farklı yollar ile gerçekleştirilebilir. Gaz türbinlerinde ateşleme genellikle yanma odasına gönderilen sıcak gazlar ya da elektrik enerjisi ile sağlanmaktadır.

Gaz türbinlerinde tutuşma basınç, sıcaklık ve ateşleme enerjisinin artması ile kolaylaşırken, hız, türbülans yoğunluğu ve yakıt damlacık çapındaki artış, tutuşmayı olumsuz yönde etkilemektedir. Sıvı yakıt içeren karışımlarda ise tutuşma olasılığı uçuculuk, viskozite, buharlaşma hızı gibi yakıt parametrelerine önemli ölçüde bağlıdır. Sıvı yakıtın tutuşması için gerekli enerjinin bir miktarı yakıtı parçalamak ve buharlaştırmak için kullanıldığından, sıvı yakıtlı karışımı tutuşturmak için gerekli enerji, gaz karışımını tutuşturmak için gerekli enerji miktarından çok daha fazladır [Lefebvre, 2010].

Literatürde ateşleme ve yeniden tutuşma üzerine deneysel ve numerik birçok çalışma mevcuttur. Swett [Rowling, 1955], yaptığı çalışmalarla basınç, hız, yakıt-hava eşdeğerlilik oranı ve türbülansın tutuşma üzerine etkisini incelemiştir. Bu kapsamda, ateşleme sürecinde boşaltım uzunluğunun bir kısmının önemli olduğunu ve termal iletimle gerçekleşen ısı kaybının, burgaçların yayılımı ile gerçekleşen ısı kaybının yanında ihmal edilebilir olduğunu vurgulamıştır. Ballal ve Lefebvre'de [Lefebvre, 2010], tutuşma üzerine yaptıkları deneylerle Swett'in bu teorisini doğrulamışlardır.

Mishra [Mishra, 2004], yaptığı çalışmalarla modern bir avcı uçağına ait halka tipi yanma odasının yeniden ateşleme performansını deneysel olarak incelemiştir. Bu kapsamda farklı uçuş mach sayısı ve irtifa koşulları altında yeniden tutuşma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda alev oluşumu ve tutuşma için yüksek sıcaklık ve basınca ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Guisti ve arkadaşları [Guisti, 2018], kerosen damlacıkları ile yaptıkları çalışmalarda, yüksek irtifa koşullarındaki buharlaşma hızının alev oluşumu ve yayılımı üzerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmalarda başarılı bir tutuşma için daha düşük damlacık çapı içeren yakıt-hava karışımına ve buharlaşma hızını arttıracak spark enerjisine ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Denton ve arkadaşları [Denton, 2018], yaptıkları çalışmalarla atmosfer basıncı ve sıcaklığının, yakıt-hava eşlenik katsayısının, yanma odası basınç düşümünün yeniden tutuşma üzerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda, atmosfer basıncı ve sıcaklığının azalması ile yeniden tutuşma olasılığının azaldığı ve yanma odası basınç düşümü arttıkça yeniden tutuşma için yakıtça daha zengin bir karışıma ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Ayrıca RQL tipi yanma odasında görülen büyük resirkülasyon bölgelerinin yeniden tutuşmayı kolaylaştırdığı vurgulanmıştır. Boileau [Boileau, 2008] ve Read [Read, 2010] ise yaptıkları numerik çalışmalarda Büyük Burgaç Benzetim yaklaşımının tutuşma karakteristiğinin incelenmesinde iyi bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

YÖNTEM

Bu bölümde, HAD analizlerinde kullanılan fiziksel denklemler ve fiziksel model ile hesaplama alanı tanımlanmıştır.

Korunum Denklemleri ve Numerik Algoritma

Yapılan çalışmada 3-boyutlu reaktif HAD analizleri farklı çözüm ağı sayısı ve Büyük Burgaç Benzetim yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde hava ideal gaz olarak tanımlanmış ve basınç bazlı çözücü kullanılmıştır. Viskozite Sutherland Kuralı kullanılarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Reaktif gerçekleştirilen analizlerde yanma modeli olarak kimyasal kinetikten gelen reaksiyon hızlarının da hesaplandığı Hibrit Eddy Break-up (HEBU) yanma modeli kullanılmıştır. Akışkanın modellenmesinde kullanılan temel süreklilik, momentum, enerji ve türlerin taşınımı denklemleri sırasıyla verilmiştir.

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j H)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k_g}{c_p} \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} + S_H \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho Y_M)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j Y_M)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Y_M}{\partial x_j} \right) + S_C \quad (4)$$

Büyük Burgaç Benzetim (Large Eddy Simulation, LES) Yaklaşımı

Büyük Burgaç Benzetim yöntemi, RANS (Reynolds Average Navier Stokes) yaklaşımına göre daha yüksek hesaplama maliyetine sahip olmasına rağmen daha doğru ve güvenilir sonuçlar vermesi sebebiyle mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir yaklaşımdır. Bu yöntemde ortalamalı akışın çözümlendiği RANS yaklaşımından farklı olarak büyük ölçekteki burgaçlar doğrudan çözümlenirken, küçük ölçekteki burgaçların çözümü ise ağ-altı adı verilen modeller ile gerçekleştirilir. Yapılan çalışmada küçük ölçekli burgaçlar için WALE (Wall Adapting Local Eddy Viscosity) ağ-altı modeli kullanılmıştır [Fureby, 2008; Nicoud, 1999]. Büyük Burgaç Benzetim yaklaşımında ve WALE ağ-altı modelinde kullanılan denklemler sırasıyla gösterilmiştir.

$$\mu_t = \bar{\rho} \Delta^2 S_\omega \quad (5)$$

$$\Delta = \min(\kappa d, C_\omega V^{1/3}) \quad (6)$$

$$S_\omega = \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4} + (S_{ij} S_{ij})^{5/2}} \quad (7)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial x_i^2} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k^2} \right) \quad (9)$$

$$l = \frac{C_t^{3/2} \mu_t^{1/2}}{S^{1/2} \rho^{1/2}} \quad (10)$$

$$t = \frac{C_t}{S} \quad (11)$$

$$k_{sgs} = \frac{C_t \mu_t S}{\rho} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{sgs} = \frac{\mu_t S^2}{\rho} \quad (13)$$

Çizelge 1. WALE Modeli İçin Sabitler

Sabit	C_ω	κ	C_t
Değer	0.54	0.41	3.5

Hibrit Eddy Break-up (HEBU) Yanma Modeli

HEBU yanma modelinde Arrhenius yaklaşımı ve Eddy Break-up yanma modelleri baz alınarak reaksiyon hızları hesaplanmaktadır. Reaksiyon hızı, türbülanslı karışımın reaksiyon hızı ile kimyasal kinetikten gelen reaksiyon hızları hesaplanarak belirlenir [Siemens, 2020]. Arrhenius yaklaşımı ve HEBU yanma modelinde kullanılan reaksiyon hızı (ω_r) için matematiksel ifadeler sırasıyla verilmiştir.

$$\omega_r^{kin} = -A_p \exp\left(\frac{E_A}{RT}\right) \prod_m \left(\frac{\bar{\rho} Y_m}{M_m}\right)^{\psi_m} \quad (14)$$

$$\omega_r = \min(\omega_r^{kin}, \omega_r^{mix}) \quad (15)$$

Yapılan HAD analizlerinde 2-adımlı kerosen mekanizması kullanılmıştır [Franzelli, 2010]. Aşağıda HAD analizlerinde kullanılan mekanizmaya ait denklemler gösterilmiştir. Çizelge 2’de bu denklemlere ait parametrelere yer verilmiştir. Birimler mol, s, cm^3 , j ve cal/mol cinsindendir.



Çizelge 2. Kerosen Mekanizmasına Ait Parametreler

	1.Denklem		2.Denklem	
Aktivasyon Enerjisi	4.15×10^4		2×10^4	
Ön Exponansiyel Faktör	8×10^{11}		4.5×10^{10}	
Reaksiyon Derecesi	$C_{10}H_{20}$	0.55	CO	1
	O_2	0.9	O_2	0.5

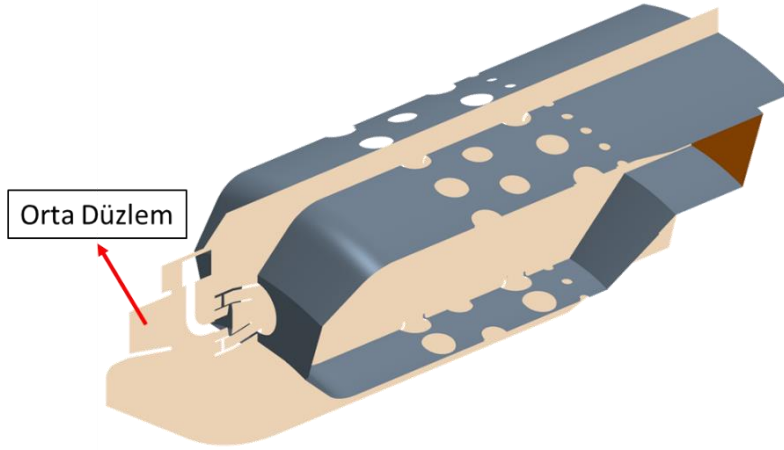
UYGULAMALAR

Çözüm Ağı Çalışması

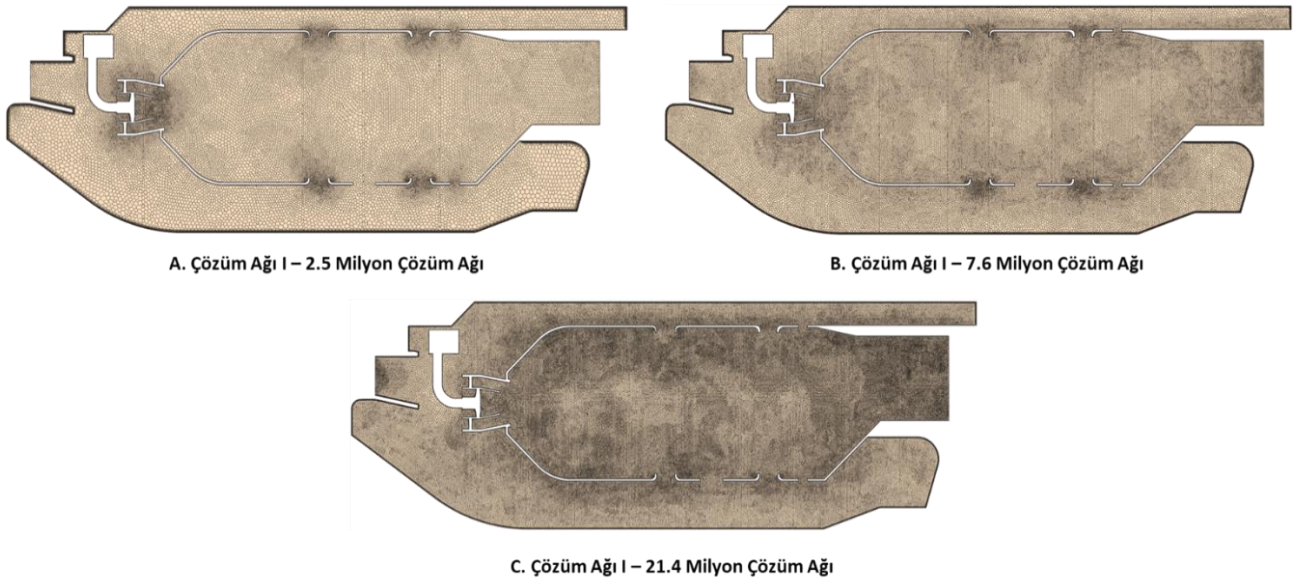
Bu bölümde ilk olarak, yapılan çözüm ağı çalışmasına ait detaylı sonuçlara yer verilmiştir. Çizelge 3’de çözüm ağı modellerine ait parametreler ve Şekil 2’de ise bu parametreler kullanılarak oluşturulan çözüm ağı konturları gösterilmiştir. Çözüm ağı konturları Çizelge 3 ’de gösterilen orta düzlem üzerinden alınmıştır.

Çizelge 3.Çözüm Ağı Modellerine Ait Parametreler

Çözüm Ağı Modeli	Hücre Sayısı (Milyon)	Hücre Tipi	Sınır Tabaka Hücre Sayısı	Temel Hücre Boyutu (mm)	Sınır Tabaka Hücre Kalınlığı (mm)
Çözüm Ağı I	2.5	Çokyüzlü (Polyhedral)	8	1.6	1.28
Çözüm Ağı II	7.6	Çokyüzlü (Polyhedral)	12	0.9	0.72
Çözüm Ağı III	21.4	Çokyüzlü (Polyhedral)	15	0.6	0.48

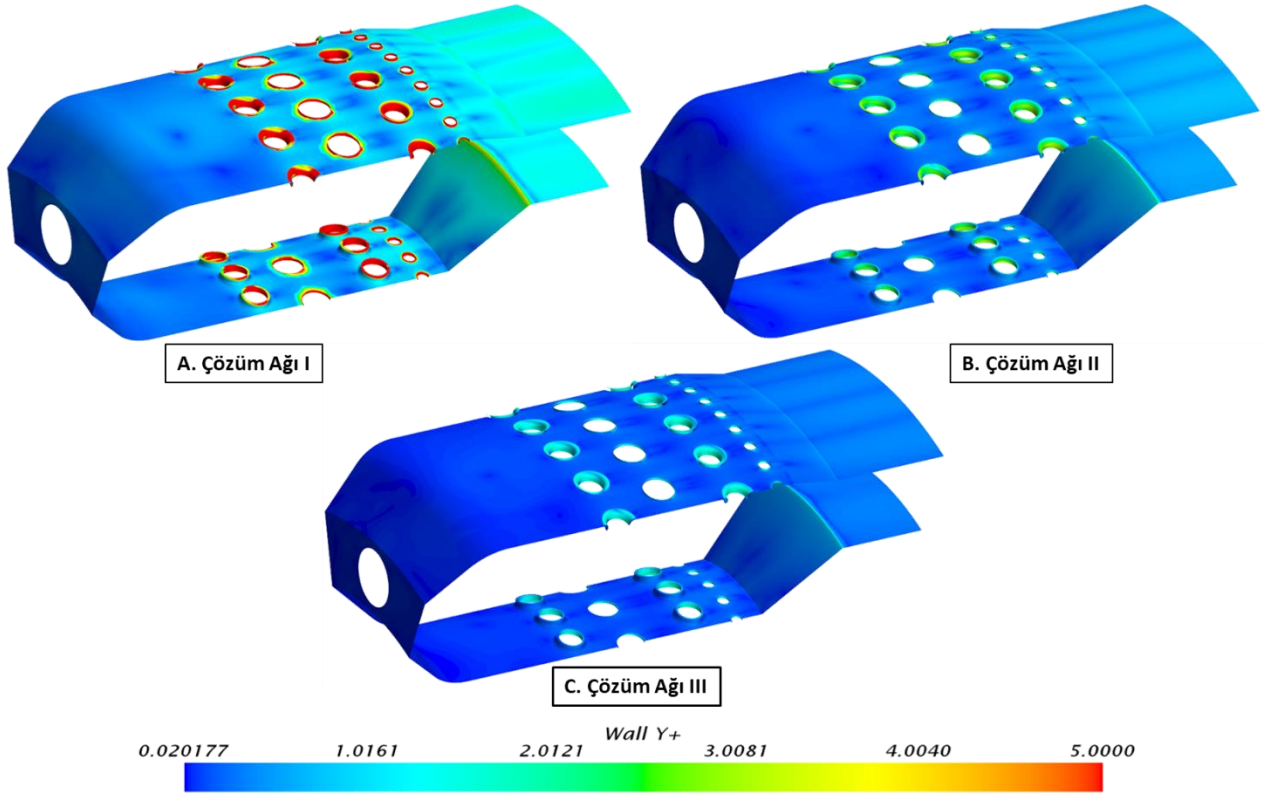


Şekil 1. Çözüm Ağı Konturlarının Gösterildiği Düzlem



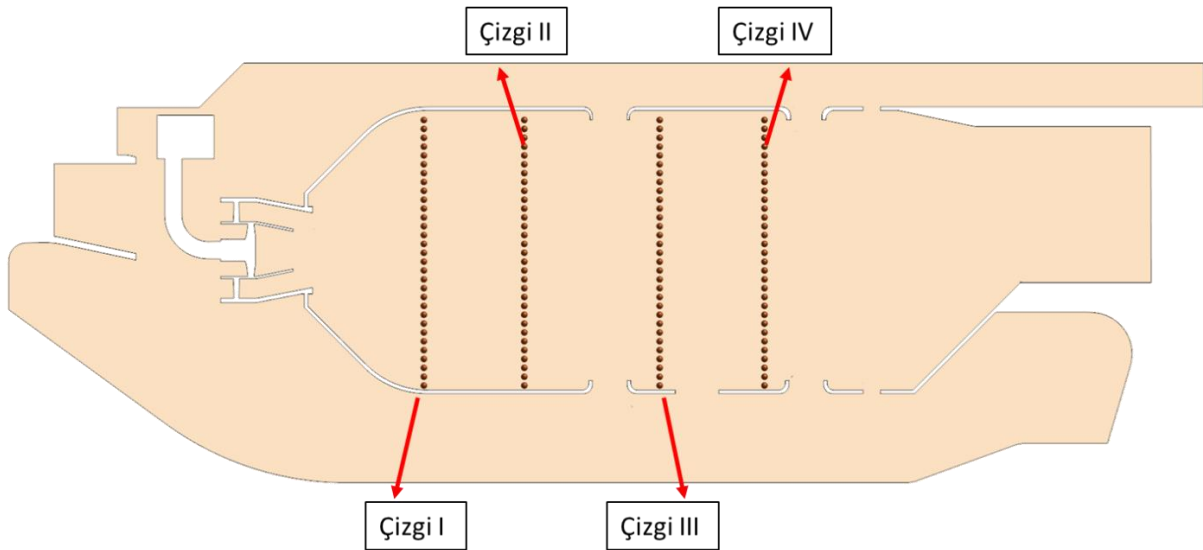
Şekil 2. Çözüm Ağı Konturları: A. Çözüm Ağı I- B. Çözüm Ağı II- C. Çözüm Ağı III

Oluşturulan farklı çözüm ağı modelleri için Şekil 3'de sınır tabaka çözünürlüğünün göstergesi olan y^+ değerleri verilmiştir. İyi ve güvenilir numerik çözümler için y^+ değerinin 5 ve altında olması beklenmektedir [Şimşek, 2019].



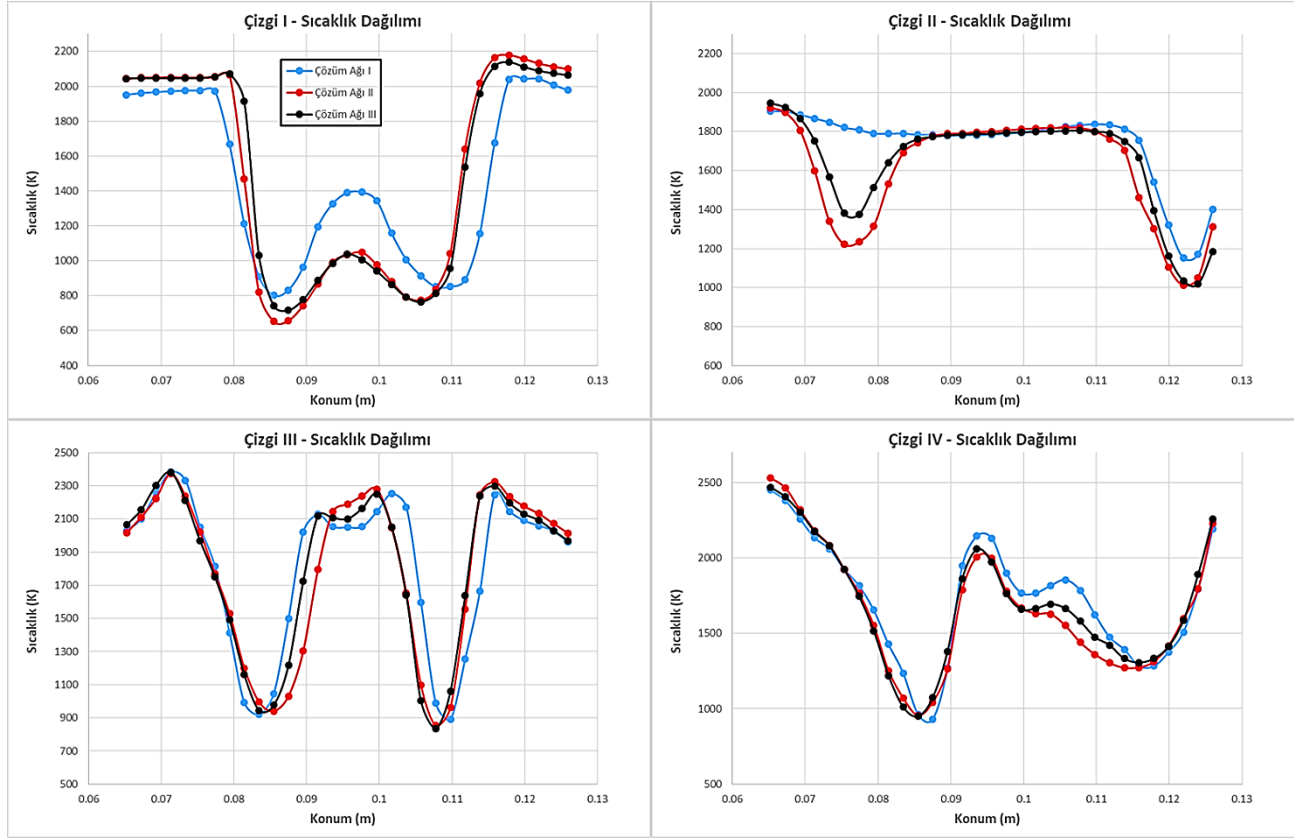
Şekil 3. İç Astar İçin Y^+ Konturları

Astar için verilen y^+ konturları incelendiğinde çözüm ağı II modelinin duvar kenarlarında oluşan sınır tabaka çözümü için yeterli çözünürlükte olduğu belirlenmiştir. Ancak ileride yapılacak analizlerde kullanılacak çözüm ağı modeli için daha detaylı sonuçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda yanma odası alev tüpü boyunca dikey yönde çizgiler oluşturulmuş ve her bir çizgi üzerinde farklı çözüm ağı modelleri için çizgi üzerindeki düşey konuma karşılık eksenel hız ve sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4'de alev tüpü boyunca oluşturulan çizgiler gösterilmiştir.



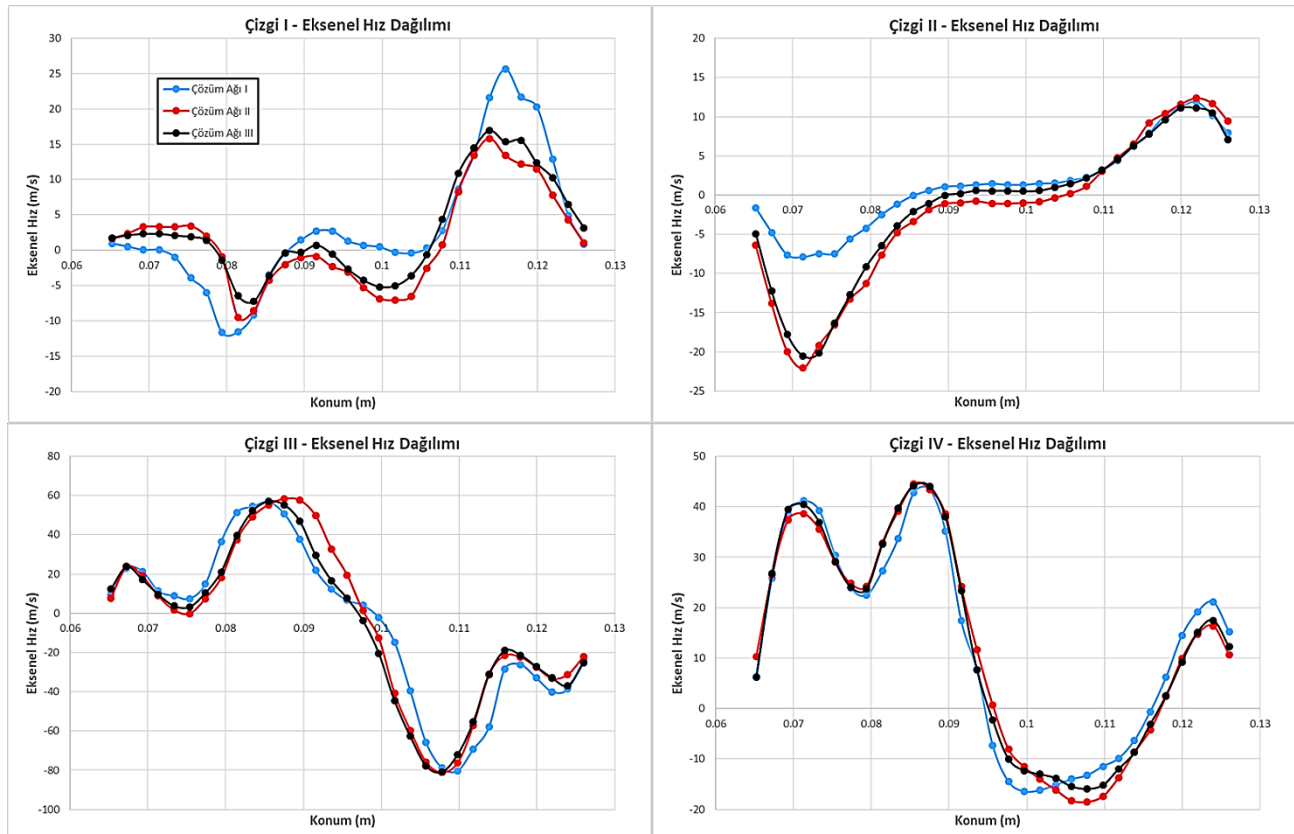
Şekil 4. Alev Tüpü Boyunca Oluşturulan Çizgiler

Çizgiler üzerinde elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Çizgiler Üzerinde Sıcaklık Dağılımı

Çizgiler üzerinde elde edilen eksenel hız dağılımları Şekil 6'da gösterilmiştir.

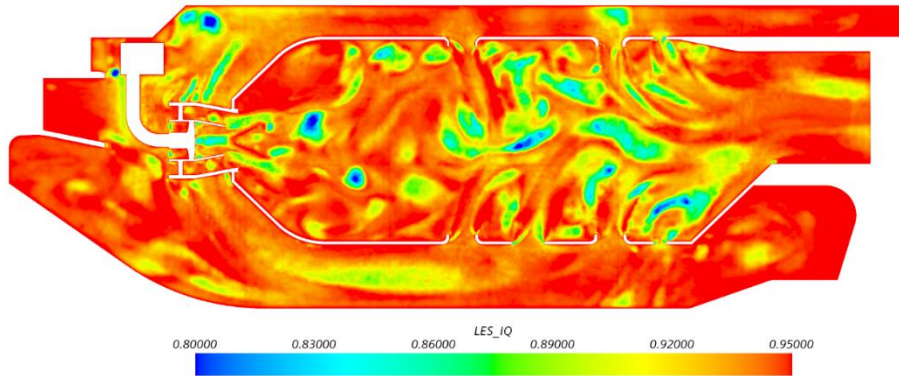


Şekil 6. Çizgiler Üzerinde Eksenel Hız Dağılımı

Çizgiler üzerinden elde edilen sıcaklık ve eksenel hız dağılımları incelendiğinde, 7,6 milyon çözüm ağı içeren çözüm ağı II modeli ile 21,4 milyon çözüm ağı içeren çözüm ağı II modelinin birbirine yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Özellikle çizgi I ve çizgi II için elde edilen sonuçlarda çözüm ağı I modelinin yeterli çözünürlükte olmadığı görülmektedir. Bu sebeple ateşleme çalışması için yapılacak detaylı HAD analizlerinde çözüm ağı II modelinin yeterli olacağına karar verilmiştir.

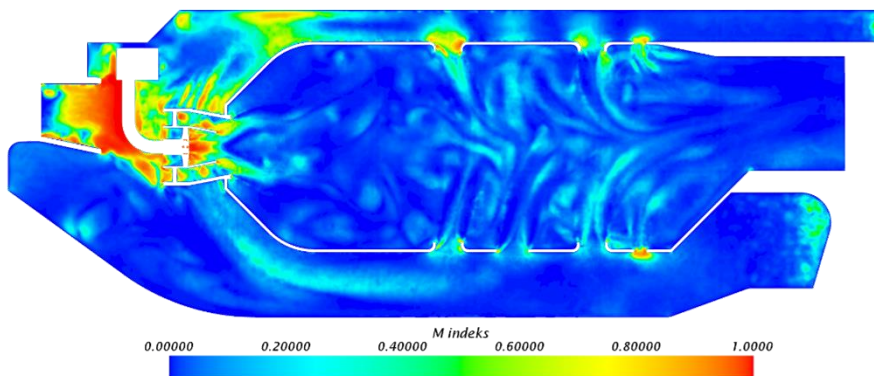
Tutuşma karakteristiğini incelemek için Büyük Burgaç Benzetim yaklaşımı kullanılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda ilk olarak çözüm ağı II modelinin Büyük Burgaç Benzetim yaklaşımı için yeterli çözünürlükte olup olmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Literatürde yer alan ve çözüm ağının Büyük Burgaç Benzetim yaklaşımı için yeterliliğinin belirlenmesinde kullanılan kalite indeksi (LES_IQ) ve ağ-altı türbülans kinetik enerjisinin toplam kinetik enerjiye oranını ifade eden M indeksi hesaplanmıştır. Çelik ve diğerleri [Çelik, 2005] tarafından geliştirilen kalite indeksi için 0.75-1.0 aralığının Büyük Burgaç Benzetim yaklaşımı için yeterli olduğu belirtilmiştir. 7,6 milyon çözüm ağı içeren çözüm ağı II modeli ile gerçekleştirilen soğuk akış Büyük Burgaç Benzetim analizlerinde ikincil bölge delikleri ile karıştırıcı bölgesinde yer alan bazı noktalarda literatürde verilen LES_IQ göstergesi aralığının dışında kaldığı belirlenmiştir. Bu sebeple çözüm ağı II modeli için belirtilen bölgelerde daha sık çözüm ağı kullanılarak iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu iyileştirmeler sonucunda çözüm ağı II modeli 8,3 milyon çözüm ağı içerecek şekilde güncellenmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'de sırasıyla LES_IQ göstergesi ve M indeksi için soğuk akış analiz sonuçları gösterilmiştir.

$$LES\ IQ = \frac{1}{\left(0.05 * \left(\frac{Effective\ Viscosity}{Dynamic\ Viscosity}\right)^{(0.53)}\right) + 1} \quad (16)$$



Şekil 7. Çözüm Ağı 2 İçin LES_IQ Çözünürlük İndeksi

$$M\ İndeksi = \frac{k_{sgs}}{k_{sgs} + k_{res}} \quad (17)$$



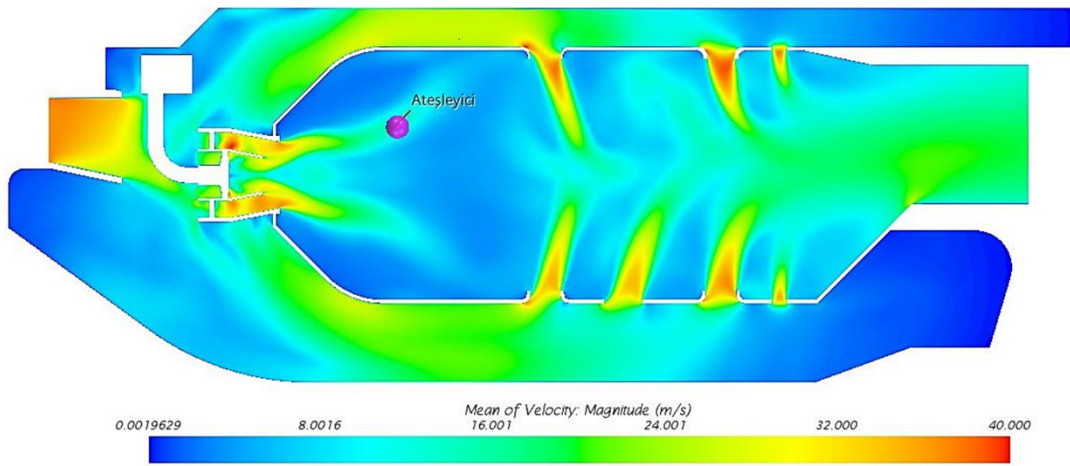
Şekil 8. Çözüm Ağı 2 İçin M İndeksi

Alev tüpü içerisindeki M indeksi değerlerinin sıfıra yakın olduğu ve LES için yeterli çözünürlüğün elde edildiği belirlenmiştir.

Ateşleyici Konum Belirleme Çalışması

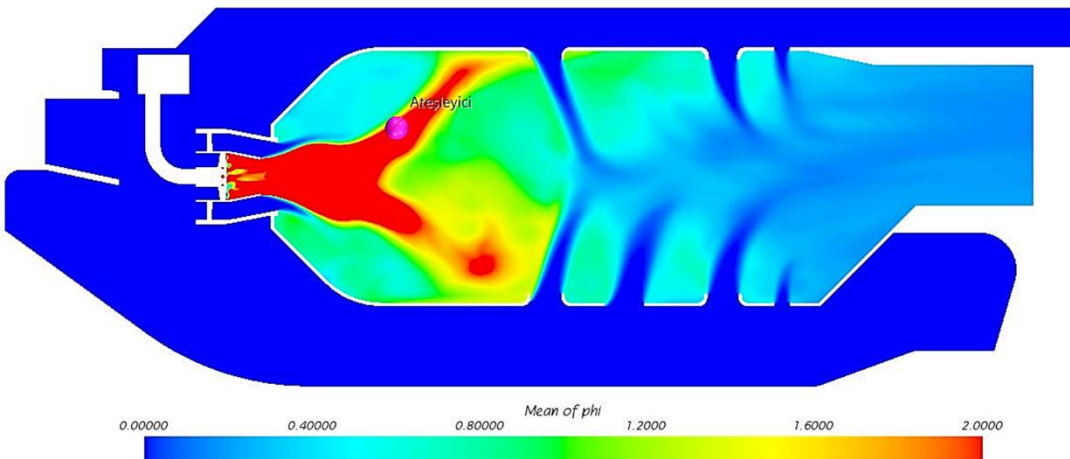
Ateşleyici konumu belirleme çalışması için, LES yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen soğuk akış analizlerinde hız, hız vektörleri ve yakıt-hava eşlenik katsayısı (ϕ) dağılımları incelenmiştir. Lefebvre [Lefebvre, 2010], ateşleyici konumu için en uygun bölgenin birincil bölge olduğu ve bu bölgede spreyn dış kenarına ve astar bölgesine yakın yerin en ideal konum olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca ateşleyicinin yer aldığı noktada hızın ve resirkülasyonun yayılma ve alev sönmesi durumları için optimum düzeyde olması gerektiğini belirtmiştir. Nicolas G.R. vd. [Rosa, 2015], ise yaptığı çalışmalarda ateşleme için yerel yakıt-hava eşlenik katsayısı değerinin 1,25 ile 2,5 arasında olması gerektiğini vurgulamıştır. Yapılan literatür araştırmaları neticesinde en uygun ateşleyici konumu belirlenmiş ve bu bölgedeki hız, yakıt-hava eşlenik katsayısı ve hız vektörleri dağılımları sırasıyla Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de gösterilmiştir.

Aşağıda verilen hız, yakıt-hava eşlenik katsayısı ve hız vektörü dağılımları 62 ms süren ve 10^{-6} ile 10^{-5} arasında değişen zaman adımı kullanılarak gerçekleştirilen soğuk akış LES analizleri sonucunda elde edilmiştir.



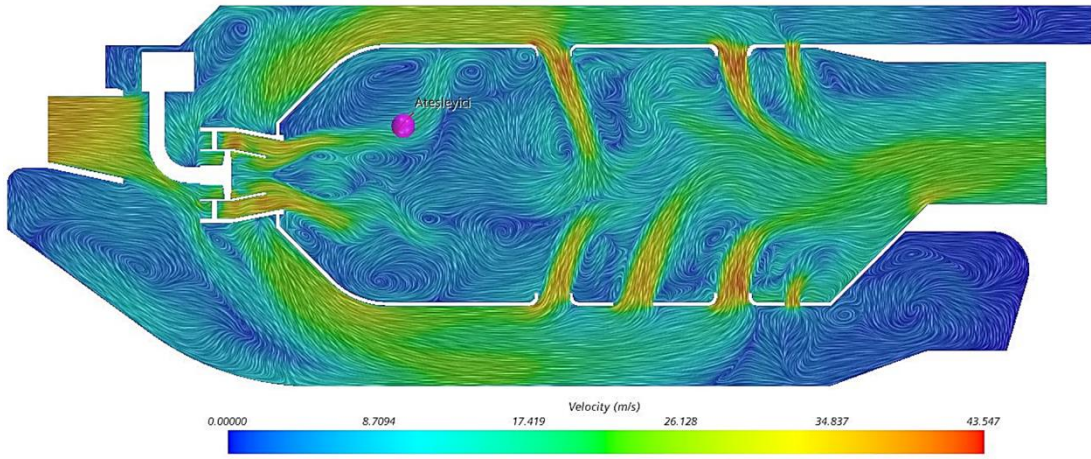
Şekil 9. Ateşleyicinin Bulunduğu Düzlemdeki Hız Dağılımı

Hız dağılımı incelendiğinde ateşleyicinin olduğu bölgede hız büyüklüğünün yaklaşık 20 m/s olduğu ve ateşleyicinin spreyn dış kenar bölgesine yakın bir bölgede yer aldığı görülmektedir.



Şekil 10. Ateşleyicinin Bulunduğu Düzlemde Yakıt-Hava Eşlenik Katsayısı (ϕ) Dağılımı

Yukarıda verilen yakıt-hava eşlenik katsayısı dağılımında ateşleyicinin bulunduğu bölgedeki ortalama yakıt-hava eşlenik katsayısı değeri 2,4 olarak hesaplanmış ve başarılı bir ateşleme için literatürde yer alan aralıkta olduğu belirlenmiştir.



Şekil 11. Ateşleyicinin Bulunduğu Düzlemde Hız Vektörleri

Hız vektörleri incelendiğinde ateşleyicinin daha kolay bir yayılım için istenildiği gibi resirkülasyon bölgesine yakın bir konumda yer aldığı belirlenmiştir. Ancak alev sönmesine sebep olabileceği için yüksek türbülans yoğunluğuna sahip resirkülasyon bölgesi merkezlerinden kaçınılmıştır.

Ateşleyici konumu belirlendikten sonra sıcaklık, basınç ve yakıt-hava oranının ateşleme ve yeniden tutuşma üzerindeki etkisi incelenecektir. İlk olarak hava giriş sıcaklığının ateşleme üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Ateşleme ve alev oluşumu için yapılan tüm parametrik çalışmalarda LES yaklaşımı ve küçük ölçekli burgaçlar için WALE Ağ-altı modeli kullanılmıştır. CPU kaynakları, Residualler ve Courant sayısı göz önünde bulundurularak 10^{-6} ile 10^{-5} arasında değişen zaman adımları tercih edilmiştir. Gerçekçi ve tutarlı sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla Convective Courant sayısı tüm akış alanı boyunca 1'e yakın tutulmaya çalışılmıştır.

Yeniden tutuşma analizlerinde ateşleyici için 3mm çapında küresel bir model oluşturulmuştur. Ateşleyici sıcaklığı 2200K olarak belirlenmiştir.

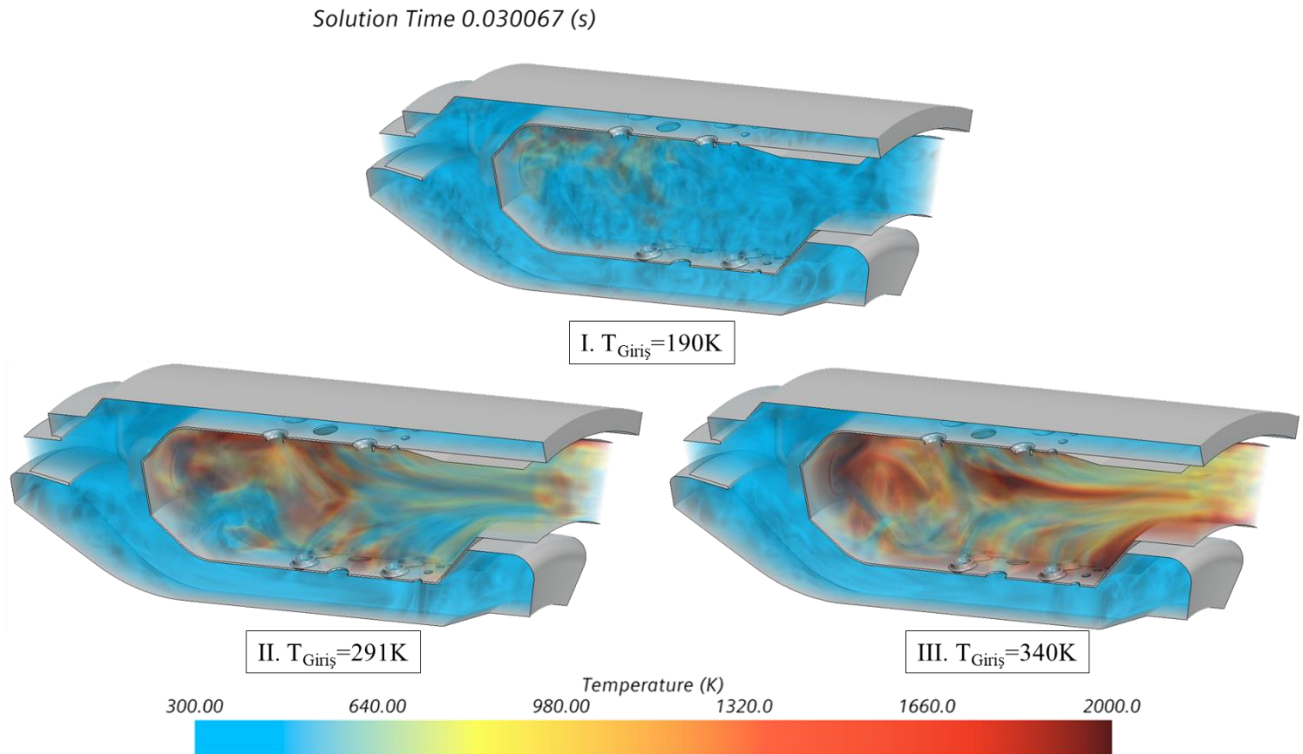
Hava Giriş Sıcaklığının Etkisi

Giriş sıcaklığının etkisini incelemek için ilk olarak deneylerde başarılı bir şekilde ateşlendiği bilinen, yakıt-hava oranının 0.02 olduğu ve 0.5 bar giriş basıncı ile 291K hava giriş sıcaklığı koşullarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra hava giriş sıcaklığı 340K, 240K ve 190K olacak şekilde HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve sıcaklığın ateşleme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çizelge 4’de sıcaklığın etkisini incelemek için gerçekleştirilen analizlere ait yüksek irtifa koşulları verilmiştir.

Çizelge 4. Sıcaklık Etkisi İçin Sınır Koşulları

Koşul	Giriş Sıcaklığı (K)	Giriş Basıncı (bar)	Hava Debisi (kg/s)	Yakıt-Hava Oranı
I	190	0.5	0.03	0.02
II	291	0.5	0.03	0.02
III	340	0.5	0.03	0.02

Çizelge 4’de verilen sınır koşulları kullanılarak gerçekleştirilen HAD analizlerinde 291K ve 340K sıcaklıklarında başarılı ateşleme ve tüm alev tüpü boyunca alev yayılımı gerçekleşirken, 190K giriş sıcaklığında alevin tüm alev tüpü boyunca yayılımı gerçekleşmemiştir. Şekil 12’de 30 ms sonra farklı giriş sıcaklığı koşullarında alev tüpü içerisindeki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 12. 30 Ms Sonra Alev Tüpü Boyunca Sıcaklık Dağılımları: I. 190K-II. 291K-III. 340K

Şekil 12’de verilen alev tüpü sıcaklık dağılımları incelendiğinde aynı sürede 291K ve 340K giriş sıcaklıklarında başta birincil bölge olmak üzere tüm alev tüpü boyunca alev oluşumu ve yayılımı görülürken, 190K giriş sıcaklığı için üst astar bölgesine yakın yerler dışında alev oluşumu ve yayılımı görülmediği için başarılı bir yeniden tutuşma gerçekleşmemiştir. Yanma odası giriş sıcaklığının artması ile alev oluşumu ve yayılımı net bir şekilde gözlenmiştir. Sıcaklığın artması ile daha kolay ve başarılı bir ateşleme gerçekleştirilebildiği yapılan HAD analizleri ile doğrulanmıştır.

Hava Giriş Basıncı Etkisi

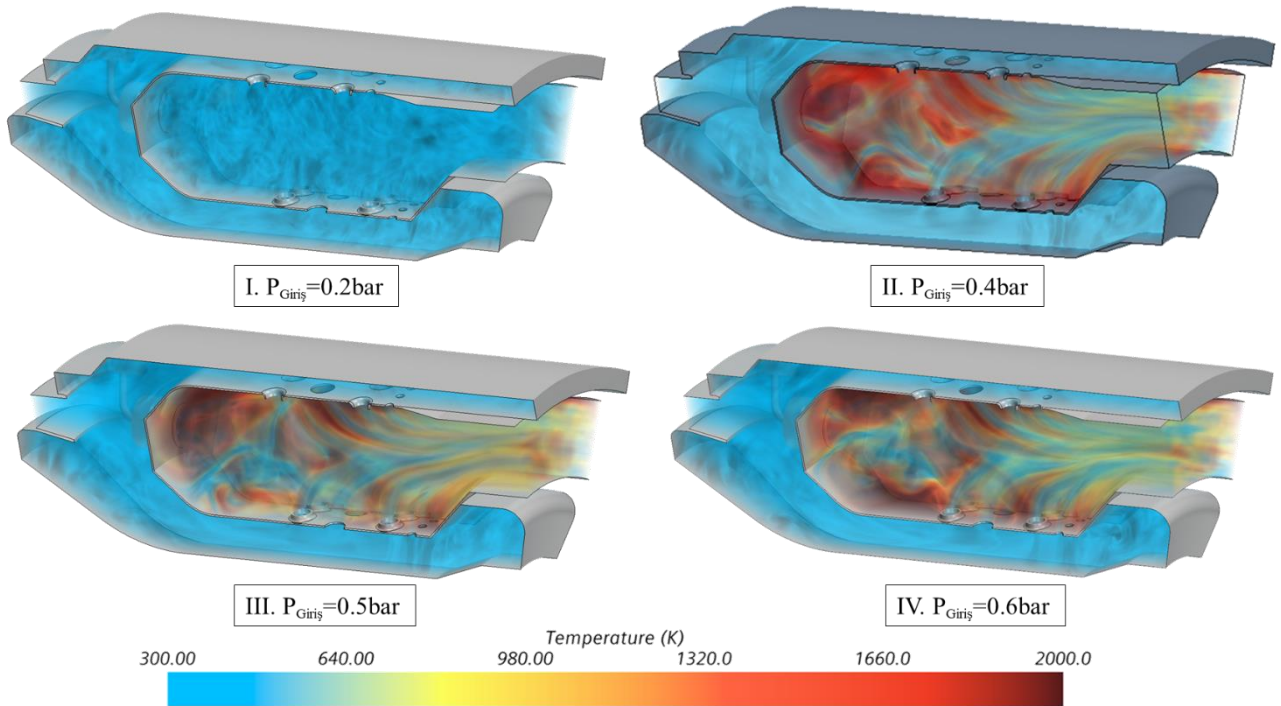
Giriş basıncının etkisini incelemek için sırasıyla 0.6bar, 0.5bar, 0.4bar ve 0.2bar basınç koşullarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5'te farklı giriş basıncı koşullarında gerçekleştirilen analizlere ait koşullar gösterilmiştir.

Çizelge 5. Basıncı Etkisi İçin Sınır Koşulları

Koşul	Giriş Sıcaklığı (K)	Giriş Basıncı (bar)	Hava Debisi (kg/s)	Yakıt-Hava Oranı
I	291	0.2	0.03	0.02
II	291	0.4	0.03	0.02
III	291	0.5	0.03	0.02
IV	291	0.6	0.03	0.02

Çizelge 5'te verilen sınır koşulları kullanılarak gerçekleştirilen HAD analizlerinde 0.4bar, 0.5bar ve 0.6bar giriş basıncı koşullarında başarılı ateşleme ve tüm alev tüpü boyunca alev yayılımı gerçekleşirken, giriş basıncının 0.2bar olduğu koşulda alev tüpü içerisinde alev çekirdeği oluşumu ve alev yayılımı gözlenmemiştir. Şekil 13'de 35 ms sonra farklı giriş basıncı koşulları altında alev tüpü içerisindeki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.

Solution Time 0.035011 (s)



Şekil 13. 35 Ms Sonra Alev Tüpü Boyunca Sıcaklık Dağılımları: I. 0.2bar-II. 0.4bar-III. 0.5bar-IV. 0.6bar

Giriş basıncı etkisi için yapılan çalışmalarda Şekil 13'te görüldüğü üzere 0.4bar, 0.5bar ve 0.6bar giriş basıncı koşulu altında birincil, ikincil ve seyreltme bölgesi olmak üzere tüm alev tüpü boyunca alev oluşumu ve yayılımı görülmüştür. Ancak 0.2bar giriş basıncı koşulunda alev tüpü içerisinde herhangi bir alev çekirdeği oluşumuna rastlanmamıştır. Yanma odasına giren havanın basıncındaki artışla alev oluşumu ve yayılımının arttığı belirlenmiştir. Daha güvenilir ve kolay bir yeniden tutuşma gerçekleştirebilmek için daha yüksek giriş basıncına ihtiyaç duyulduğu yapılan HAD analizleri ile doğrulanmıştır.

Yakıt-Hava Oranı Etkisi

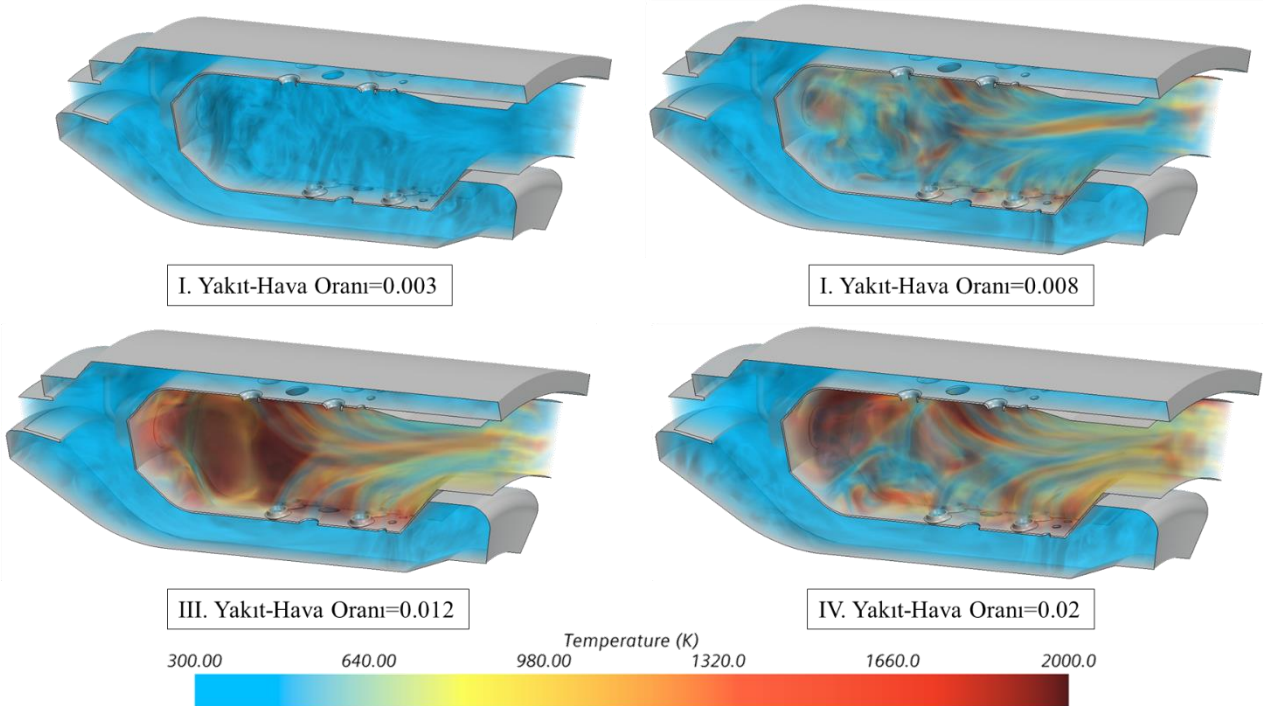
Yakıt-hava oranını incelemek için aynı basınç ve sıcaklık koşullarında farklı hava-yakıt oranları için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Lefebvre [Lefebvre, 2010], tarafından oluşturulan tipik bir yanma odasına ait ateşleme döngüsü ile karşılaştırılmış ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Çizelge 6'da farklı yakıt-hava debisi oranları için gerçekleştirilen analizlere ait sınır koşulları verilmiştir.

Çizelge 6. Yakıt-Hava Oranı Etkisi İçin Sınır Koşulları

Koşul	Giriş Sıcaklığı (K)	Giriş Basıncı (bar)	Hava Debisi (kg/s)	Yakıt-Hava Oranı
I	291	0.5	0.02	0.008
II	291	0.5	0.045	0.012
III	291	0.5	0.03	0.02
IV	291	0.5	0.07	0.003

Çizelge 6'te verilen sınır koşulları kullanılarak gerçekleştirilen HAD analizlerinde 0.003, 0.008, 0.012 ve 0.02 yakıt-hava oranı koşulları altında yeniden tutuşma karakteristiği incelenmiştir. Yapılan analizler neticesinde 0.003 yakıt-hava oranı koşulunda başarılı bir yeniden tutuşma gerçekleşmezken, 0.008, 0.012 ve 0.02 yakıt-hava oranı koşullarında başarılı bir yeniden tutuşmanın gerçekleştiği gözlenmiştir. Şekil 14'te 35 ms sonra farklı yakıt-hava oranı koşulları altında alev tüpü içerisindeki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.

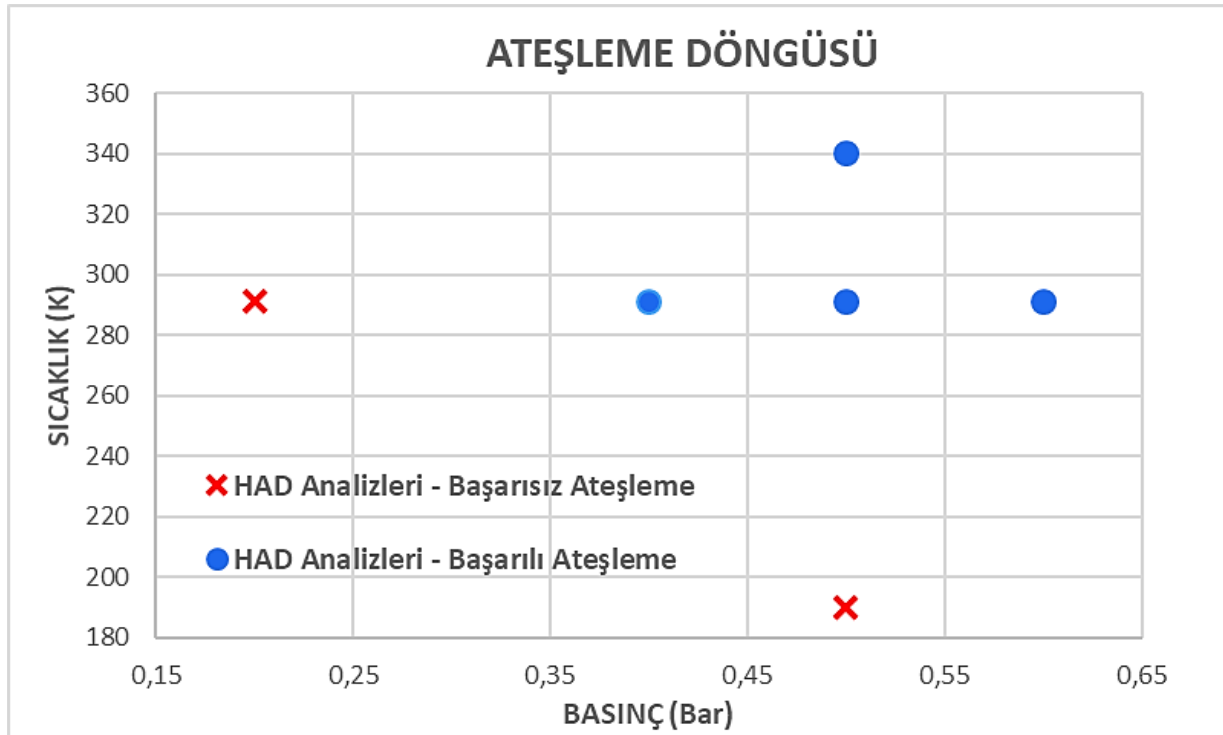
Solution Time 0.035037 (s)



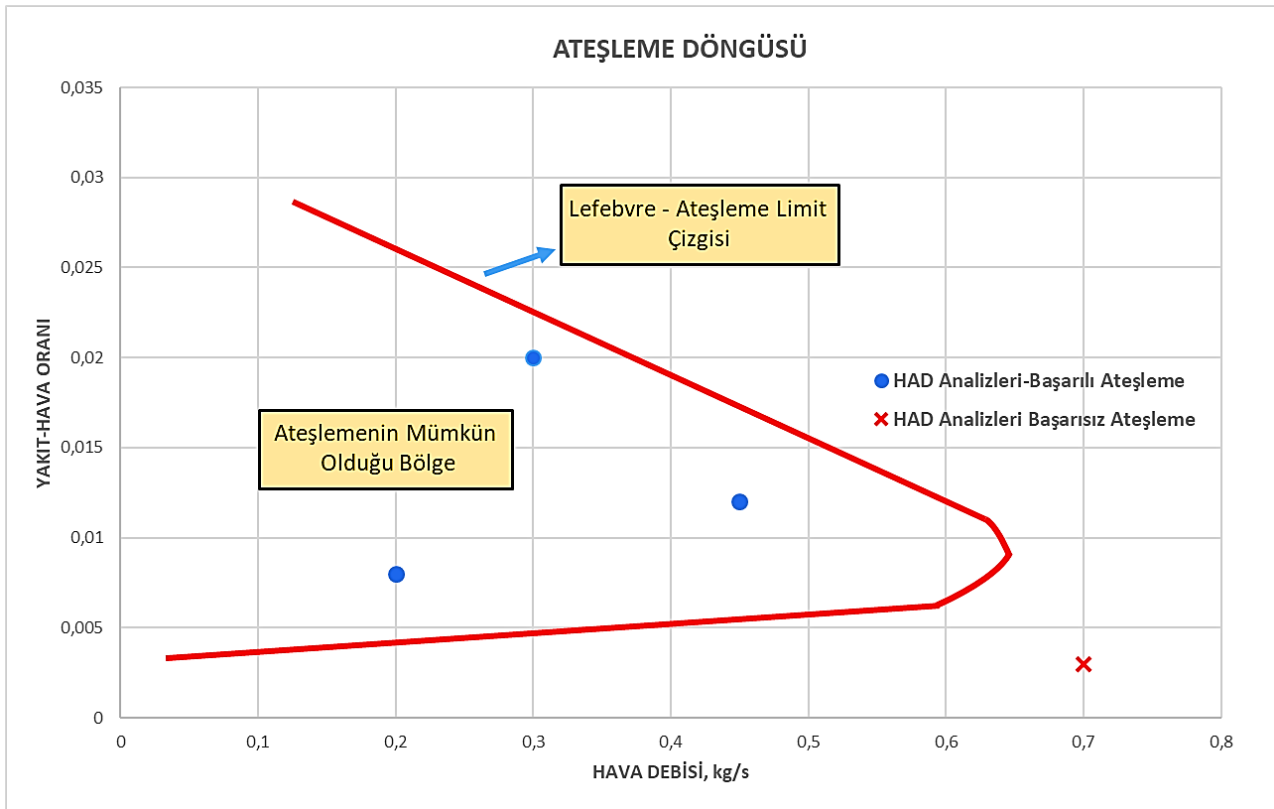
Şekil 14. 35 Ms Sonra Alev Tüpü Boyunca Sıcaklık Dağılımları: I. 0.003-II. 0.008-III. 0.012-IV. 0.02

Yakıt-hava oranı etkisini incelemek için yapılan HAD analizlerinde Şekil 14'te de görüldüğü üzere 0.003 yakıt-hava oranına sahip koşulda alev tüpü içerisinde alev oluşumu ve yayılımı gözlenmezken, 0.008, 0.012 ve 0.02 gibi yakıtça daha zengin koşullarda alev oluşumu ve yayılımı görülmektedir. Sıcaklık ve basıncın yanı sıra yakıt-hava oranı parametresinin de yanma odası içerisinde yeniden tutuşma ve alev oluşumu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan HAD analizleri ile doğrulanmıştır.

Şekil 15 ve Şekil 16'da sırasıyla yapılan analizler sonucunda belirtilen koşullarda ateşlemenin gerçekleştirilip, gerçekleştirilemediğine dair grafikler gösterilmiştir.



Şekil 15. Sıcaklık Ve Basınca Bağlı Oluşturulan Ateşleme Grafiği



Şekil 16. Yakıt-Hava Oranına Bağlı Oluşturulan Ateşleme Döngüsü

SONUÇ

Bu bildiride turbojet motora ait halka tipi yanma odasının serbest dönmeli yüksek irtifa koşullarında yeniden tutuşma karakteristiği Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile incelenmiştir. İlk olarak çözüm ağı modelleri oluşturulmuş ve bu modellere ait detaylı analiz sonuçları elde edilmiştir. Çözüm ağından bağımsızlaştırma çalışmaları kapsamında alev tüpü boyunca çizgiler oluşturularak bu çizgiler üzerinde sıcaklık ve eksenel hız dağılımları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan detaylı analizler sonucunda çözüm ağı II modelinin LES yaklaşımı ve ateşleme çalışmaları için yeterli çözünürlükte olduğu belirlenmiştir.

LES yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen soğuk akış analizinde hız, yakıt-hava eşlenik katsayısı ve hız vektörleri dağılımları incelenerek ateşleyici konumu için en uygun yer belirlenmiştir. Özellikle alev çekirdeği oluşumunu gerçekleştirebilmek ve oluşan alev çekirdeğinden başarılı bir şekilde yayılım sağlayabilmek için hız değerleri, yakıt-hava eşlenik katsayısı ve resirkülasyon bölgeleri göz önünde bulundurulmuştur.

Ateşleyici olarak 3mm çapında küresel bir model kullanılmıştır. Ateşleyici sıcaklığı 2200K olarak belirlenmiştir. Yeniden tutuşma analizlerinde courant sayısı ve residuallar dikkate alınarak 10^{-6} ile 10^{-5} arasında değişen zaman adımları kullanılmıştır. Yapılan analizlerde alev oluşumunu ve yayılımını daha net görebilmek için LES yaklaşımı kullanılmıştır.

Sıcaklık, basınç ve yakıt-hava oranının alev oluşumu ve yayılımı üzerindeki etkisini inceleyebilmek için farklı yüksek irtifa koşullarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak sıcaklığın etkisi incelenmiştir. 190K, 291K ve 340K giriş sıcaklık koşullarında ateşleyici kullanılarak yanma odası içerisinde alev oluşumu ve yayılımı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde aynı sürede 291K ve 340K giriş sıcaklıklarında başta birincil bölge olmak üzere tüm alev tüpü boyunca alev oluşumu ve yayılımı görülürken, 190K giriş sıcaklığı için üst astar bölgesine yakın yerler dışında alev oluşumu ve yayılımı görülmediği için başarılı bir yeniden tutuşma gerçekleşmemiştir. Giriş sıcaklığının artması ile yanma odası içerisinde yeniden tutuşma ve alev oluşumu ihtimalinin arttığı yapılan analizler ile doğrulanmıştır.

Giriş basıncı etkisini incelemek için 0.2bar, 0.4bar, 0.5bar ve 0.6bar olmak üzere 4 farklı basınç koşulunda HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 0.2bar giriş koşulunda alev tüpü içerisinde alev oluşumuna rastlanmazken, 0.4bar, 0.5bar ve 0.6bar giriş koşullarında birincil, ikincil ve seyreltme bölgeleri olmak üzere tüm alev tüpü boyunca alev oluşumu ve yayılımı gözlenmiştir. Başarılı ve kolay bir yeniden tutuşma gerçekleştirebilmek için daha yüksek giriş basıncına ihtiyaç duyulduğu yapılan HAD analizleri ile doğrulanmıştır.

Son olarak yakıt-hava oranı etkisini incelemek için yapılan HAD analizlerinde 4 farklı yakıt-hava oranı koşulu için incelemeler yapılmıştır. Lefebvre [Lefebvre, 2010], ateşleme döngüsü baz alınarak belirlenen sınır koşullarında 0.003 yakıt-hava oranına sahip durum için alev tüpü içerisinde alev oluşumu ve yayılımı gözlenmezken, 0.008, 0.012 ve 0.02 gibi yakıtça daha zengin koşullarda alev oluşumu ve yayılımı görülmüştür. Alev oluşumu ve yayılımı üzerinde sıcaklık ve basıncın yanı sıra yakıt-hava oranının da önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan HAD analizleri ile belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmış ve tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda turbojet motorun tutuşma karakteristiğinin belirlenmesinde HAD analizlerinin doğruluğu ve etkinliği incelenmiştir.

Kaynaklar

- Boileau, M., Staffelbach, G., Cuenot, B., Poinso, T., Berat, C., 2008. LES of an Ignition Sequence in a Gas Turbine Engine, Combustion and Flame, February
- Celik, I.B., Cehreli, Z.N., Yavuz, I., 2005. Index of Resolution Quality for Large Eddy Simulations, Journal of Fluids Engineering, cilt 127, pp. 949-958
- Denton, M. J., Tambe, S. B., Jeng, S., 2018. Experimental Investigation Into The High Altitude Relight of a Three Cup Combustor Sector, ASME Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Oslo, 11-15 June
- Franzelli, B., Riber, E., Sajose, M., Poinso, T., 2010. A two-step Chemical Scheme for Kerosene-Air Premixed Flames
- Fureby, C., 2008. Towards the use of Large Eddy Simulation in Engineering, Progress in Aerospace Sciences, s.381-396
- Guisti, A., Sitte, M. P., Borghesi, G., Mastorakos, E., 2018. Numerical Investigation of Kerosene Single Droplet Ignition at High-Altitude Relight Conditions, The Science and Technology of Fuel and Energy Journal, February
- Lefebvre, A., Ballal, D., 2010. Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions, CRC Press, Cilt.3, s.55-190
- Mishra, R. K., 2004. Altitude Relight Characteristics of an Aero Gas Turbine Combustor, 7th National Conference of Air Breathing Engines, India, November
- Nicoud, F., Ducros, F., 1999. Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor Flow, Turbulence and Combustion, cilt 62, no.3, s.183-200
- Read, R. W., Rogerson, J. W., Hochgreb S., 2010. Flame Imaging of Gas Turbine Relight, AIAA Journal, September
- Rosa, N.G., 2015. Experimental and Numerical Study of High-Altitude Ignition of a Turbojet Combustor
- Rowling, H., 1955. Ash Deposition-Petroleum Fuels, Gas Turbine Principles and Practice, Newnes, London, chap. 19, Sir Harold Roxbee Cox. Ed.
- Siemens, 2020. Star Ccm+ Documentation
- Şimşek, B., 2019. Aerodinamik Isınmanın ve Isıl Koruma Sistemlerinin Aerodinamik Isınmaya Bağlı Termo-Kimyasal Aşınmasının İncelenmesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Doktora Tezi, pp. 86-89