

TURBOFAN MOTORU İÇİN ART YAKICI TASARIMI VE HAD ANALİZİ

Serhat Aydemir¹, Hasan Berkan Çakır², Mert Karataş³, Cihan Gurur⁴ ve Muammer Ozgoren⁵,
Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya

ÖZET

Bu çalışmada F110 gaz türbini motoru için uygun art yakıcının geometrik tasarımı, itki hesaplamaları, bir boyutlu analitik yanma hesabı ve sonrasında Ansys Fluent programıyla iki ve üç boyutlu yanma analizi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metotları ile incelenmiştir. Yanma analizi sonucunda Brayton çevriminde temel elemanların giriş ve çıkış konumlarında sıkışmış akışın basınç sıcaklık değerleri izentropik şartlarda hesaplandı. Bir boyutlu olarak yapılan bu hesaplamaların sonucunda art yakıcı giriş şartları %16 oksijen içeriği ve 1206.3 K sıcaklığındaki egzoz gazı içeriye tekrar kerosen sıvı yakıtı püskürtülerek yakıldı. Art yakıcı çıkışında böylelikle artan sıcaklık, basınç ve kütleli debi hesaplamalarından itki değeri art yakıcı olmayan duruma göre %44 oranında arttığı hesaplandı. Geometrik tasarım Aircraft Engine Design [Mattingly,2002] kitabından faydalanılarak yapılmış olup kitabın içeriği kullanılarak oluşturulmuş olan AEDsys yazılımı kullanılmıştır. KINETX modülü kimyasal reaksiyon sonuçları için AFTRBRN modülü ise geometrik boyutlandırma için kullanılmıştır. Kütleli hava ve yakıt debisi ise F110 motorunun debilerinden çekilmiştir [Mattingly,2006]. 59 cm yarıçap 170 cm nozul uzunluklarına sahip art yakıcı elde edilmiştir. Yanma sonucu kimyasal hesaplamalarda ve ANSYS Fluent çözümüyle maksimum sıcaklık alev tutucu art izi bölgesinde yaklaşık olarak 2400K civarı sıcaklıklar görülmüştür. Hesaplama için ekstenel simetrik sınırlara sahip olan art yakıcının merkez eksenini kullanılmış olup iki ve üç boyutlu analiz geometrisi oluşturulmuştur. Kerosen sıvı yakıtı sonlu hacim alanına Lagrange tanecikleri olarak enjekte edilip atomizasyon süreci de incelenmiştir. Alev türbülans etkileşimi, species transport sonlu eddy sönmüleme modeli aracılığıyla modellenmiş olup türbülans ise 2 denklemlilik k-ε modeli realizeable yaklaşımıyla modellenmiştir. Soğuk akış ve ıslak akış analizleri ile atomize tanecik etkileşimleri ve boyutları buharlaşma, karışım ve yanma için uygun varsayımlar yapılarak modellenmiştir.

GİRİŞ

Hava araçlarının hareketini sağlamak için güç sistemi, itme kuvveti üretir. Modern savaş uçaklarının çoğu, itme gücünü artırmak için düşük geçişli turbofan veya turbojet motorlarında art yakıcı sistemler kullanır. Bu tercih, savaş uçaklarının ses hızına yakın hızlara ulaşabilmesi için gerekli olan ani hız artışlarını karşılamak içindir. Bu ek itme gücünü elde etmenin bir yolu, temel bir turbojet motora art yakıcı eklemektir. Temel bir turbojet motorunda, yanma odasından çıkan egzoz enerjisinin bir kısmı türbini döndürmek için kullanılır. Art yakıcı sistemi, yakıtın doğrudan sıcak egzoz akışına enjekte edilerek enerji geri kazanımını sağlar. Art yakıcı etkinleştirildiğinde, halkalardan ve turbojetin sıcak egzoz akışına ek yakıt enjekte edilir. Bu ek yakıtın yanması, ek itme kuvveti üretir, ancak temel turbojet motorundaki yanmadan daha az verimlidir. Bu nedenle, daha fazla itme kuvveti sağlamak için daha fazla yakıt tüketilir. Art yakıcı devre dışı bırakıldığında, motor temel bir turbojet motoru gibi çalışır. Ana yanma odası egzozundan kaynaklanan bozulmuş gazda yaklaşık %15 oksijen bulunmaktadır. Bu oksijen, ek yakıt yanması için kullanılabilir. Yüksek basınçlı ve düşük basınçlı türbinlerde genişledikten sonra, bozulmuş egzoz gazına ek yakıt eklenir ve daha fazla enerji açığa çıkarılır. Bu ek enerji, egzoz nozul basınç oranını artırarak egzoz gazlarına daha yüksek hızlar kazandırır. Böylece, uçağa daha fazla itki sağlanırken uçağın kütlesine daha fazla bileşen eklenmemiş olur.

Prof. Dr. Muammer Özgören, Uçak Müh. Böl., E-posta: mozgoren@erbakan.edu.tr

Serhat Aydemir , E-posta: aydemirserhat370@gmail.com

Hasan Berkan Çakır , E-posta: hberkancakir@gmail.com

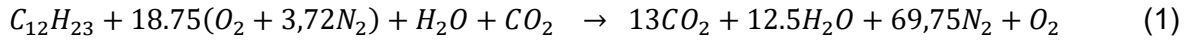
Mert Karataş , E-posta: merktaratas4104@gmail.com

Cihan Gurur,E-posta: cihangurur06@gmail.com

YÖNTEM

Jet A yakıtının bileşimi ve birincil yanma odasından çıkan gazların bileşimi, yanma tepkimesinin dengesi çözülerek belirlenmiştir [Halliwell,2018]. Tam yanma için atom dengesi kullanılarak aşağıdaki yanma denklemi oluşturulmuştur:

Yanma denklemi;



Bu tepkime sonucunda gaz bileşimindeki kütleli değişim, moleküler ağırlıklı değerler ve yanma reaksiyonunun ifade ettiği kimyasal denkleme göre yakıt debisinin hesaplamaları yapılmıştır.

Türbülans Kinetik Enerjisi (k) Denklemi:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (2)$$

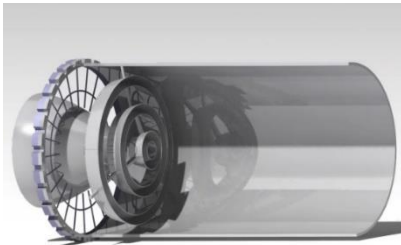
Dissipasyon (epsilon) Denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon_2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

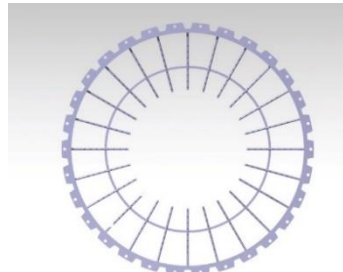
UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

Geometrik Hesaplamalar

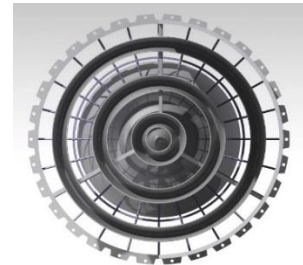
Geometrik tasarımda hesaplanan 408.3 kpa giriş toplam basıncı, 1206.3 K giriş toplam sıcaklığı 0.346 m² giriş alanı ile yayıcı geometrisi belirlendi. V-oluk tipi alev tutucu boyutları için deneysel verilerle optimum blokaj oranı olarak verilen 0.314 kullanılarak boyutlandırılmıştır. Sprey bar ve delik sayısı kavitasyonlu enjeksiyon akış rejimini yakalamak için HAD analizleriyle güncellenerek 24 bar ve sprej bar başına 8 yakıt enjeksiyon deliğiyle güncel halini bulmuştur. Geometriye ait 3 boyutlu şekiller aşağıda verilmiştir.



(a) 3 boyutlu art yakıcı geometrisi



(b) Sprey bar



(c) Nozul çıkışı açısı art yakıcı geometrisi

Şekil 1: Art yakıcının iki ve üç boyutlu görseli

Tablo 1. Geometrik sonuçlar

Yayıcı	Dış çap , r_o (cm)	59
	İç çap , r_i (cm)	39.91
	Giriş dikey uzunluk , H_1 (cm)	19.09
	Bitiş dikey uzunluk , H_m (cm)	30.99
	Yatay uzunluk , L_m (cm)	75.61
	Yayıcı-Alev tutucu arası yatay uzunluk , L_d (cm)	28.01
Alev Tutucu	Açı , θ (der)	15
	Dikey uzunluk (cm)	6.18
	Yatay uzunluk (cm)	9.2
	Kanal genişliği , H (cm)	19.67
Sprey Bar	Bar sayısı	24
	Bar başı delik sayısı	8
	Delik çapı , (mm)	0.9
	Bar uzunluğu , (mm)	50
	Bar çapı , (mm)	10
	Delikler arası mesafe, (mm)	30
Nozul	Uzunluk , (cm)	175

Sınır Koşulları Ve HAD Hesaplama Alanı

Yapılan analizde sistem için atılan mesh parametreye bağlı olup mesh faktörü ile hızlıca element boyutları değiştirilip farklı mesh sistemleri için sonuç karşılaştırması hedeflenmiş olup ansys workbench mesh parametre bağlantısı yukardaki görseldeki gibi olup oluşturulan ağ yapılarının kalite standartları içerisinde olduğu kontrol edildikten sonra bu ağ yapıları için de 2 boyutlu eksenel simetrik analizler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. Ağ yapısı için kalite kriterleri

Kalite	Mesh Kalite Çalışma Sayfası	Mesh Kalite Çalışma Sayfası
Mesh Kalitesini Kontrol Et		
Hedef Eğiklik	Varsayılan (0.9)	Varsayılan (0.9)
Yumuşatma	Orta	Orta
Mesh Metrik	Eğiklik	Orthogonal kalite

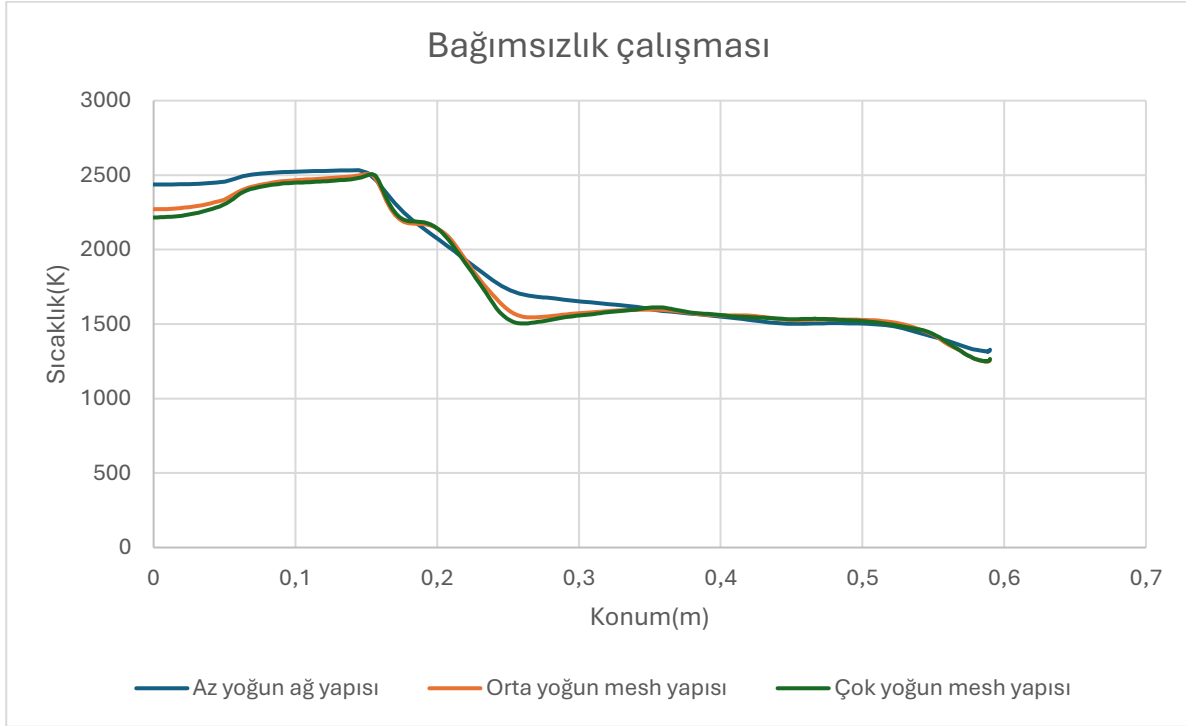
Min	1.3057e-010	0.53172
Maks	0.58969	1
Ortalama	8.0454e-002	0.96552
Standart Sapma	6.8295e-002	3.6407e-002

Ağ yapısı için kalite kriterleri skewness ve orthogonal kalite olarak incelenmiş olup yukarıda verilen ağ yapısı kalite istatistiklerine baktığımız zaman maksimum skewness değerinin 0.58 olması ve minimum orthogonal kalitenin de 0.53 olması mesh yapısının element kalitesi açısından oldukça yeterli olduğu konusunda dikkat edilmesi gereken kalite kriterleridir ve ağ yapımız analiz için kullanılmasında sakınca bulunmamaktadır.Ağ yapısının sınır tabakayı tam anlamıyla çözümlemesi oldukça önemli olduğundan dolayı y^+ değerlerinin incelenmesi gerekmektedir. Seçilen türbülans modeli için aşağıda verilen y^+ tablosu incelendiği takdirde değerlerin analize başlama noktasında oldukça iyi olduğu söylenebilir.

Tablo 3. y^+ değerleri

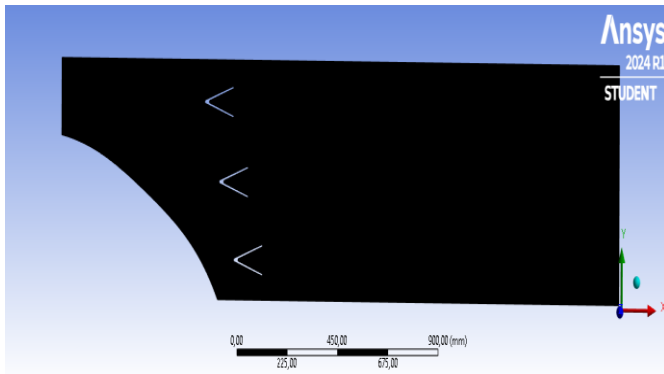
Yayıcı(difüzör)	4.4040911
Alev tutucu yukarı	0.60266955
Alev tutucu orta	0.83008652
Alev tutucu aşağı	0.99790762

175000 mesh elemanı ile sayısal tutarlılık 2 boyutlu analiz için sağlanmaya çalışılmış olup grid bağımsızlığı ile sonuçların değişmediği farklı mesh yapıları ve boyutlarıyla gözlemlenmiştir. Zamana bağlı analizin hesaplama kolaylığı açısından grid element sayısının yeterli düzeyde olduğu 175000 mesh elemanı ile proje geliştirilme aşamasına geçilmiş olup sistem güncellemeleri bu ağ yapısı kullanılarak yapılmıştır ve sonuçlar alınmıştır. Element sayılarını içeren tablo aşağıda verilmiştir.Eleman sayılarının değişimi mesh faktörü sayıları olarak 0.8,1 ve 2 değerleri girilmiş ve elde edilen mesh eleman sayısı tablosu aşağıda verilmiş olup bu farklı mesh yapıları için analizler tekrardan yapılmıştır.Yapılan analizler sonucu ağ bağımsızlığının büyük oranda sağlandığı aşağıdaki tabloda 3 ayrı çalışma için tek tablo üzerinde karşılaştırılmıştır ve analiz sonuçlarının ağ yapısından bağımsızlığı konusu somutlaştırılmıştır. Bu çalışma sırasında alev tutucunun arka tarafında kalan karışım bölgesi olarak adlandırdığımız bölgeden geçen çizgi üzerinden sıcaklık değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır ve bu sayede en çok akış ayrılması ve farkın beklendiği bölge üzerinde çalışma yapıp bağımsızlık çalışması hakkında soru işareti kalmamıştır.

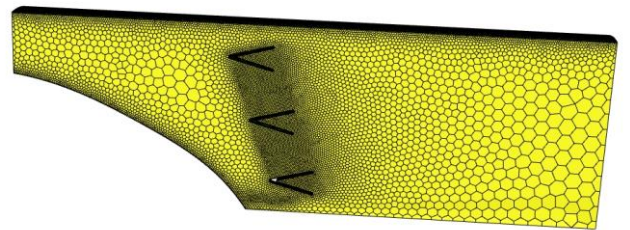
Tablo 4. Bağımsızlık çalışması**Tablo 5.** Mesh eleman sayısı

Kafes Boyutu	Eleman Sayısı
Az yoğun	95970
Orta yoğun	208917
Fazla yoğun	293671

Tasarım hesaplamaları sonucu sınır koşulları Tablo6'da verilmiştir. Euler alanına verilen gaz kompozisyonunun aksine sıvı kerosen girişi, lagrangian parçacıklar olarak enjekte edilmiştir. Art yakıcı gömlek duvarları ikincil akıştan ötürü kayma duvarları olarak belirlenmiş ve alev tutucu duvarlar için standart duvar modellemesi ile kaymaz duvar kullanılmıştır.



(a) 2 boyutlu art yakıcı mesh geometrisi



(b) 3 boyutlu art yakıcı mesh geometrisi

Şekil 1: Art yakıcının iki ve üç boyutlu mesh görseli

Tablo 6: Sınır Koşulları

Sınır Koşul	Basınç (kPa)	Hız (m/s)	Sıcaklık (K)	Ayrıklaşmış Faz
Giriş	408.3	244.4	1206.3	Kaçış
Çıkış	101.3	-	298	Kaçış
Alev tutucu	Gradyan yok	Kayma yok	Adyabatik	Yansıtma
İç gömlek	Gradyan yok	Kayma	Adyabatik	Yansıtma
Yayıcı	Gradyan yok	Kayma	Adyabatik	Yansıtma

Yakıt Enjeksiyonu

Kerosen yakıtı ($C_{12}H_{23}$), eulerian alanda lagrangian parçacıklar olarak akış hacmine dik olacak şekilde enjekte edilip parçacıkların teker teker takibi ayrıklaşmış faz modellemesi ile ANSYS Fluent'te yapılmış olup her bir parçacık için sürekli faz ile etkileşimi dikkate alınarak ve süresiz parçacıklar da ayrıca takibi akış zaman adımlarıyla eş olarak alınmıştır. Enjeksiyon sonucu takip edilen parçacıkların fiziksel parçalanma süreci ise dikkatlice hesaplanmış olup gerekli parametreler literatür taramasıyla sağlanmıştır. Yapılan analizde ayrılma modeli olarak TAB (Taylor Analogy Breakup) kullanılmıştır. Düşük We sayılarına uyumluluğuyla bilinen modelde damlacık boyutu kritik bir değere ulaştığında, ana damlacık birkaç yeni damlacığa ayrışır ve süreç boyunca momentum transferinde küresel sürüklenme yasası uygulanmıştır. Yakıtın atomizasyon süreci basınç atomizeri kullanım gereksiniminden dolayı yalın orifiz atomizer modeliyle yapılmıştır. Yakıt jeti için 3 ayrı faz oluşumu gözlenmektedir ve tasarımımda optimum enjeksiyon için kavitasyon fazında olmasına dikkat edilmiş olup ANSYS Fluent'te gerekli enjektör boyutlandırması yapılmıştır.

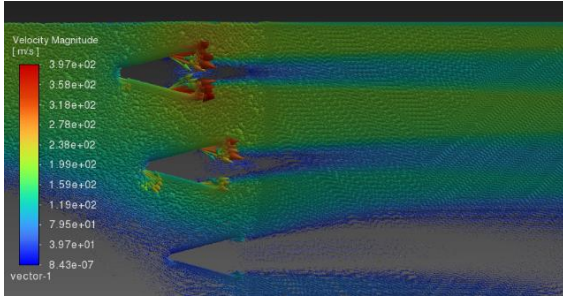
Türbülans Modelleme ve Ayrıklaştırma Şeması

Türbülansın modellenmesi $k-\varepsilon$ realizable viskozite modeli aracılığıyla yapılmış olup, yakın duvar fonksiyonları kaymazlık şartları gereğince standart duvar modellemesi aracılığıyla modellenmiştir. Tür taşınımı ile kerosen hava karışımı sağlanmış olup yanma modellemesi için hacimsel yanma yapılmıştır. Yanma kimyası ve türbülans etkileşimi ise girdap - sönümlenme modeliyle takibi yapılmaktadır. Kimyasal çözücü olarak da doğrudan kaynak çözümü yapılmıştır. Oluşan basınç - hız eşleşmesi için ise PISO algoritması kullanılmış olup basınç PRESTO! Olarak özel olarak modellenmiştir. Kullanılan ayrıklaştırma şemaları birincil derece doğrulukta seçilmiş olup yerel zaman adımları kullanılarak reaksiyon ve karışım için gerekli zaman adımları tahmin edilmiştir.

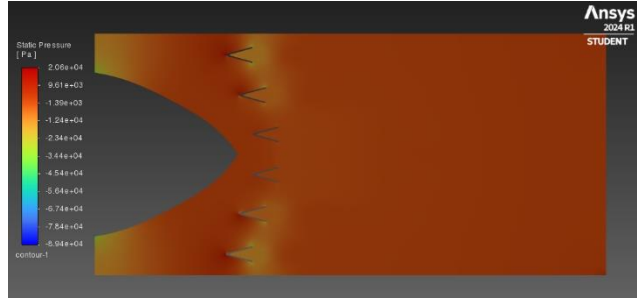
SONUÇLAR

Soğuk Akış Sonuçları

Art yakıcının deaktif olduğu yani kuru itki durumunda art yakıcı karakteristiğinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Yakıt enjeksiyonunun olmadığı sadece sıcak hava akışında hız ve basınç konturları aracılığıyla alev tutucu ve yayıcı etrafında oluşan hava akımları art izi bölgelerindeki yavaşlama ve alev tutunumu için öngörü oluşturmaları hedeflenmektedir. Yapılan analiz sonuçlarıyla yerel hızların bölgesel farklılığı ve alev tutucu bölgelerinde sürtünme kaynaklı hız ve basınç gradyanlarındaki değişimler dikkat çekmektedir.

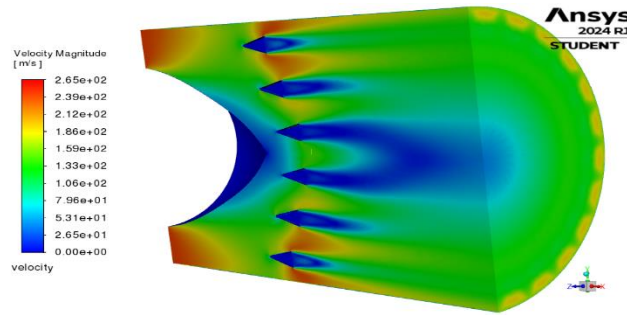


(a): Hız Gradyanları

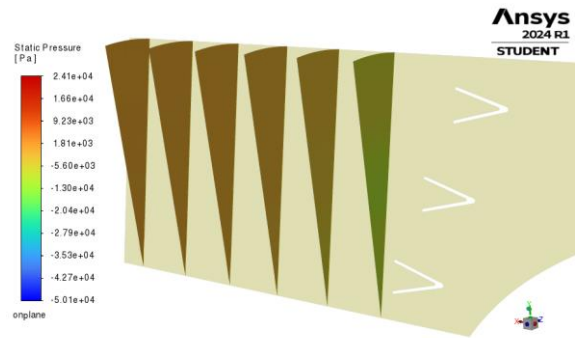


(b): Basınç Gradyanları

Şekil 2.İki Boyutlu Soğuk Akış Sonuçları Hız Gradyanları ve Statik Basınç Değişimi



(a): Hız Gradyanları

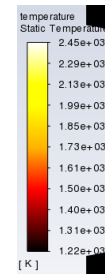
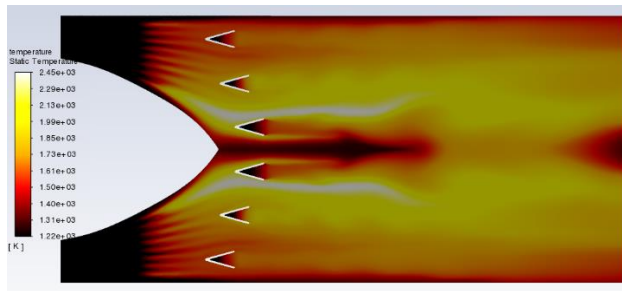


(b): Basınç Gradyanları

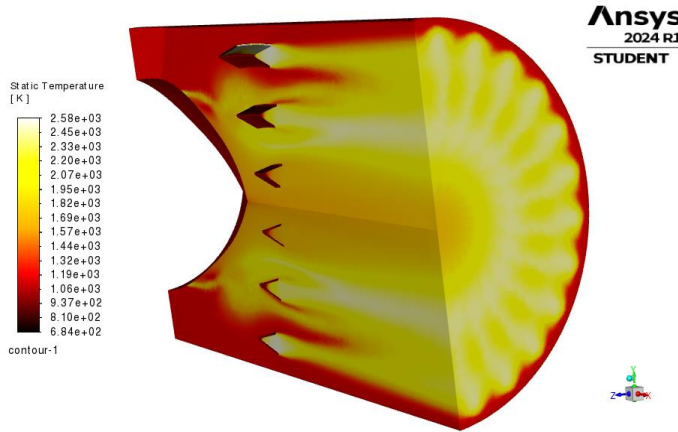
Şekil 3.Üç Boyutlu Soğuk Akış Sonuçları Hız Gradyanları ve Statik Basınç Değişimi

Reaksiyon Akış Sonuçları

Başlangıç şartları için kuru itki durumundaki akış şartları yerine getirilip ortam ısısı ve şartları yerine getirildikten sonra yakıt enjeksiyonu belirlenen zaman aralığı için gerçekleştirilmiş olup zamana bağlı analiz sonuçları incelenmiştir. Hava art izi oluşumu ve stabil hale gelen duruma göre başlatılan enjeksiyon işlemi sonrası akış yönünde alev ilerlemesi ve sıcaklık yükselmeleri gözlemlenmiş olup maksimum sıcaklık hesaplandığı gibi 2500 K civarında alev çekirdeğinde gözlemlenmiştir.

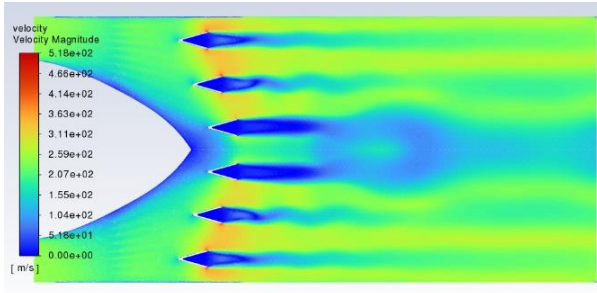


Şekil 4: Reaksiyon Akış Sonuçları Sıcaklık Konturu

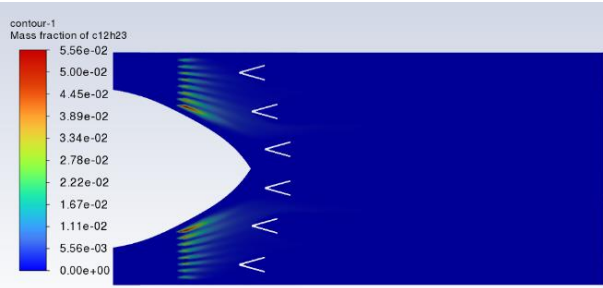


Şekil 5: Reaksiyon Akış Sonuçları Sıcaklık Konturu

Reaksiyon akışı için sıcaklık konturları incelenirse yoğunlaşmış reaksiyon bölgesinin alev tutucuların arkasında olduğu gözlenmekte olup bu bölgelerde yakıt kompozisyonu bakımından tamamen yanma ürünlerinin bulunduğunu ve atomize edilen sıvı kerosenin tamamen yandığı gözlemlenmektedir. Yanma etkisiyle reaksiyon akışı ve soğuk akış hız gradyanlarının karşılaştırılması yapılırsa art yakıcının aktif edilmesi ile birlikte çıkış hız ortalamasının kontur grafiğinde (Şekil 3) gözütüğü gibi artması beklenmektedir.

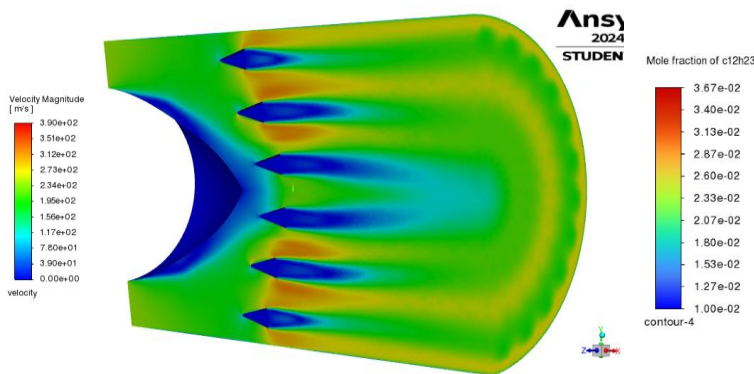


(a): Hız Konturu

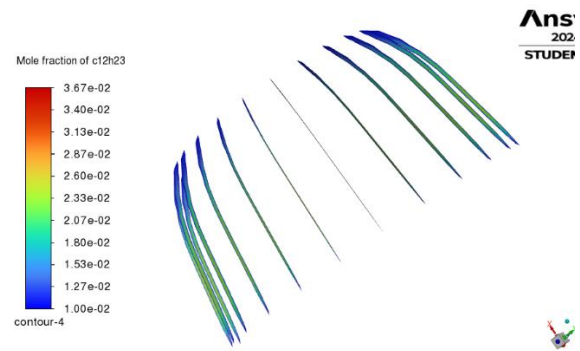


(b): Reaksiyon Akış Sonuçları Yakıt Kütle Kesri

Şekil 6. İki Boyutlu Reaksiyon Akış Hız Konturu ve Yakıt Kütle Kesri



(a): Hız Konturu



(b): Reaksiyon Akış Sonuçları Yakıt Kütle Kesri

Şekil 6. Üç Boyutlu Reaksiyon Akış Hız Konturu ve Yakıt Kütle Kesri

Çalışmanın amacı, seçilen motor için reaksiyonlu ve reaksiyonsuz koşullar altında hesaplamaların gerçekleştirilip elde edilen HAD değerlerine göre tasarımın en iyi hale getirilmesidir. Reaksiyon akışlarda yalın orifis bölgesi civarında enjekte edilen parçacıklarının fiziksel yasalar aracılığıyla ayrışmasını ve yanma sürecinin modellenmesi gerçekleştirilmiş olup beklenmekte olan sıcaklık, basınç ve hız kontür gradyanları yardımıyla optimum tasarımın elde edilmesi hedeflenmiştir. Nozul boyu, yayıcı geometrisi tasarımları iki boyutlu HAD analizleri ile en uygun hale getirilmiştir. Elde edilen nahai geometri ve tasarımın üç boyutlu analizleri yapılmış olup art yakıcı sisteminin tüm analizi literatüre kazandırılmıştır.

Tablo 7. Tasarım - analiz validasyonu

	Hesaplamalar	HAD sonuçları	Bağıl fark(%)
Uzunluk, cm	175	169	3.4
Art yakıcıda kalma süresi, s	7.699E – 04	7.28E-04	5.4
Çıkış sıcaklık, K	2000	2132	6.19
Mach sayısı	0.364	0.381	4.4
Ortalama sıcaklık, K	1713	1761	2.72

Yukardaki tabloda alev tutucu tasarımı sonucu elde edilen yanma süreciyle ilgili hesaplanan değerler, HAD sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve hesaplanan değerler arası yakın ilişkiler HAD doğrulaması ile yapılmış olup yapılmış olan analizin tasarım beklentilerini doğruladığı ve optimizasyonu konusunda fikir vermiştir. Yapılan analiz sonucunda nozul geometrisi 169 cm olarak bulunup tekrardan en uygun hale getirilmiştir. Yanma sürecinde art yakıcıda kalma süresi de kimyasal reaksiyonun tamamlanması açısından önemine dikkat edilmiş ve optimum enjeksiyon konumlandırılması , enjeksiyon parametreleri optimum olacak şekilde iteratif analizlerle optimum tasarıma yaklaşılmaya çalışılmıştır. Yapılan analizlerin iki ve üç boyut için de benzer sonuçlar vermesi ve analiz doğrulamasının farklı durum ve boyutlar ile karşılaştırılması sonuç doğrulaması için ayrıca göz önüne alınmıştır.

Öneriler

Yapılan hesaplamalar ve analizler sonucu tasarlanan sistemin bileşen bazlı en uygun hale getirilmesi gerekebilir ve farklı çalışma şartlarına ve coğrafyasına göre değişebilir. Bu sayede optimum tasarım konusunda ilerleme kaydedilip farklı modeller geliştirilebilir. Modülün farklı hava aracı motorlarına entegrasyonu ve gerekli emisyon güncellemeleri de farklı çalışma koşulları için yapılabilirliği unutulmamalı ve şimdilik belirli şartlara göre tasarım yapılmıştır. Farklı yakıt tipleri için de sistem tepkisi ve uygunluğu artırılıp ayrıca farklı motor modellerine entegrasyonu düşünülebilir. Bu tarz bir güncelleme için ayrıca enjeksiyon çalışması yapılması gerekliliği unutulmamalı ve bileşen bazlı optimizasyonun tam anlamıyla

gerçekleştiği düşünülebilir. Yapılan tüm optimizasyonlar sonucunda güvenlik kriterleri de ayrıca raporlanıp üretime hazır bir model elde edilebilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar 1919B012302360 nolu proje ile TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programının desteğine teşekkür ederler. Arş. Gör. Mustafa Karabacak'a yapmış olduğu yardımlarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Anonim, 2024 ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide

Halliwell, I., Kurzke, J.n.d.). *Propulsion and Power An Exploration of Gas Turbine Performance Modeling*

Mattingly, J. D., 2002. *Aircraft engine design*. Aiaa.

Mattingly, J. D., 2006. *Elements of propulsion: gas turbines and rockets*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

SÖNMEZ, M. C., KARABACAK, M., & OZGOREN, M. (2023). Preliminary design and analysis of an afterburner module. *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, 4(2), 80–102. <https://doi.org/10.55212/ijaa.1391886>