

GELENEKSEL VE MODİFİYE EDİLMİŞ DUDAK ŞEKİLLİ RAE-M2129 HAVA ALĞININ KARARLI DURUM HAD ANALİZİ

Osman Veysel ÖZDEMİR*
Türk Havacılık ve Uzay
Sanayii A.Ş., Ankara

Human AMİRİ†
Sivas Bilim ve Teknoloji
Üniversitesi, Sivas

Umut Can KÜÇÜK‡
TÜBİTAK SAGE, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada, S-Şekilli RAE-M2129 hava alğı temel alınarak uygulanan farklı dudak şekillerinin hava alğı içerisindeki akış kalitesine etkisi değerlendirilmiştir. Kararlı durum turbülanslı akış analizleri, OpenFOAM ve ticari bir CFD yazılımı STAR-CCM+ kullanılarak gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Araştırma, geleneksel dairesel, dikdörtgen, kare, üçgen, ve elips şekilleri olmak üzere beş farklı dudak şeklini değerlendirmektedir. Sonuçlar, literatürde var olan, doğrulanmış deneysel çalışmaların ve hesaplamalı analizlerin sonuçlarıyla kıyaslamalı olarak verilmiştir. Değerlendirme yapılırken, hava alğı çıkışındaki toplam basınç geri kazanımı ve akış bozulması üzerine odaklanılmıştır. STAR-CCM+ basınç geri kazanımı anlamında daha iyimser sonuçlar verirken, OpenFOAM simülasyonları esnasında kullanılan rhoSimpleFoam çözücüsü sonuçları daha düşük elde etmiştir. Bu çalışmada, hava alıklarının aerodinamik açıdan verimliliğini kapsamlı bir şekilde anlamak için birden fazla hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanımının ve deneysel verilerle doğrulama yapılmasının önemi vurgulanmıştır, bu durum tasarlanan hava alğının kullanılacağı hava araçlarının performansını optimize etmek açısından kritik öneme sahiptir.

GİRİŞ

Son yıllarda savunma sanayisinde ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımlarından açık kaynak kodlu HAD yazılımlarına geçiş eğiliminin gözlemlendiği bilinmektedir. Özellikle havacılık ve uzay endüstrisinde, hava alğı aerotermal ve akışkan-yapısal etkileşimlerinin analizi için açık kaynak kodlu yazılımların kullanılması gerektiği kabul edilmektedir. Bu amaçla, literatürdeki problemlerin doğrulanmasını mümkün kılan bir prosedür oluşturulması ve daha sonra yeni tasarımların analizinin yapılması önerilmektedir. RAE M2129 hava alğı geometrisi, geometrik özelliklerine açık kaynaklardan erişilebilen bir hava alğı geometrisidir ve üzerinde yapılan deneysel çalışmaların ve hesaplamalı analizlerin sonuçları literatürde mevcuttur. Bu nedenle, bu çalışmada RAE-M2129

*Uzman Mühendis, E-posta: osmanveysel.ozdemir@tai.com.tr

†Dr. Öğr. Uyesi, Uçak Müh. Böl., E-posta: human.amiri@sivas.edu.tr

‡Başuzman Araştırmacı, E-posta: kucukumutcan@gmail.com

S-şekilli hava alığı geometrisi kullanılmıştır, çünkü bu geometri literatürde doğrulanmıştır ve açık kaynak kodlu HAD yazılımlarının analizine uygun bir örnektir.

İlk olarak, bu geometri üzerine bir çözüm ağı oluşturulmuş ve daha sonra OpenFOAM ve STAR-CCM+ yazılımları kullanılarak HAD analizi gerçekleştirilmiştir. Literatürde bulunan daha önce yapılmış çalışmalar gözden geçirilmiş ve bu geometriye yönelik deneysel çalışma sonuçları ile farklı HAD yazılımlarıyla yapılan analizlerin sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu bildiride sunulan analiz sonuçlarının, literatürdeki deneysel ve hesaplamalı çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu olduğu doğrulanmıştır. Bu doğrulama sürecinde, literatürdeki basınç geri kazanımı ve DC60 parametreleri açısından sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, hava alığı geometrisinin duvarındaki belirli noktalardan alınan basınç verileri, literatürde grafik olarak sunulan sonuçlarla da karşılaştırılmıştır.

LİTERATÜR

Hava alıkları, motor performansının artırılması için uygun bir akış kalitesi sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır [Seddon, Goldsmith, 1999]. Tasarım sürecinde, HAD sonuçlarına dayalı olarak hava alığı geometrisinin daha verimli hale getirilmesi mümkündür. Bu alandaki literatür incelendiğinde, Royal Aircraft Establishment model 2129 olarak bilinen ve yaygın olarak kullanılan bir hava alığı üzerinde yapılmış deneysel ve hesaplamalı çalışmaların sonuçlarına rastlanmaktadır [Sóbester, 2007]. Bu nedenle, bir hava alığı HAD analizi yapmak ve uygun bir prosedür oluşturmak için, ilk olarak literatürde yaygın olarak kullanılan bu modelin HAD analizi OpenFOAM ve STAR-CCM+ kullanılarak gerçekleştirilecektir. Elde edilen sonuçların, literatürdeki deneysel ve hesaplamalı analizlerin bulgularıyla karşılaştırılması, HAD metodolojisini doğrulamak için önemli bir adım olacaktır.

RAE M2129 hava alığı, Birleşik Krallık'taki Royal Aircraft Establishment (RAE) tarafından geliştirilmiştir. Havacılık ve Uzay Araştırma ve Geliştirme Danışma Grubu (AGARD), 1991 yılında RAE M2129'un bazı deneysel sonuçlarını ve HAD analizi sonuçlarını yayınlamıştır [AGARD, 1991]. Daha sonrasında, bu hava alığı üzerinde bir dizi hem kararlı durum hem de zamana bağlı analizler olmak üzere çok sayıda hesaplamalı simülasyon gerçekleştirilmiştir [Menzies, Badcock, Barakos, ve Richards, 2002]. Bununla birlikte, literatürde aynı geometriye dayalı olarak farklı tasarım gereksinimlerine uygun olarak modifikasyonlar yapılmış ve bu yeni tasarımların HAD analizleri de gerçekleştirilerek paylaşılmıştır. [Mohler, 2004; Hamstra, Miller, Truax, Anderson ve Wendt, 2000].

YÖNTEM

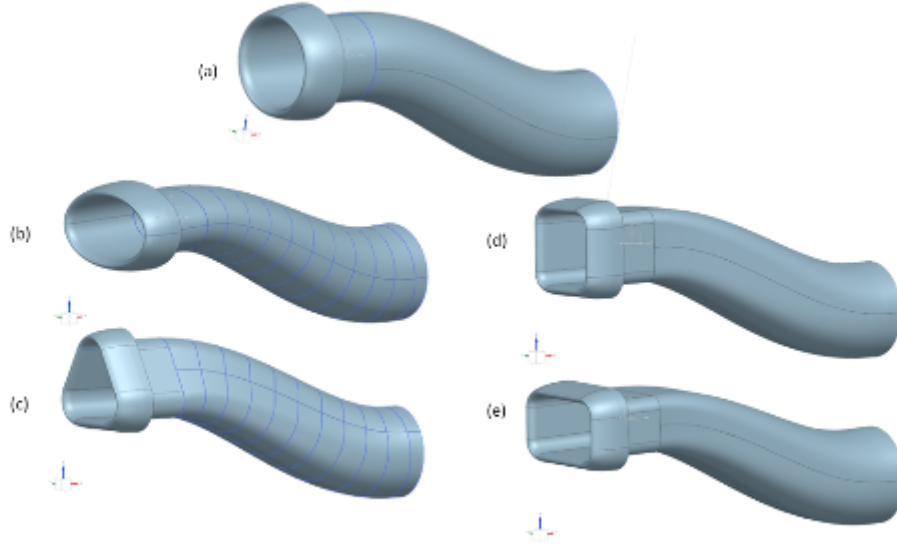
RAE M2129 Hava Alığı Geometrisi ve Modifikasyonları

RAE M2129 hava alığı, üç temel bileşene ayrılabilir: dudak, difüzör (S-duct), ve aerodinamik arayüz düzlemi (AIP). Bu hava alığı geometrisi, genişleyen bir çapa sahip olup, baştan sona kadar dairesel bir kesite sahiptir. Kıvrımlı difüzörün merkez hattı eğrisi ve yarıçap dağılımı, aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilmektedir.

$$Z = -0.15L[(1 - \cos\pi(X/L))$$

$$D = D_{throat} + (D_{AIP} - D_c)[3(1 - x/L)^4 - 4(1 - x/L)^3 + 1]$$

Diğer dudak şekilleri, hava alığı girişinde alanın sabit tutulması sağlanarak motor giriş arayüzü düzleminde gereken dairesel kesite pürüzsüz bir geçişin sağlanabileceği bir şekilde tasarlanmıştır. Bu işlem, merkez hattı eğrisi boyunca alan dağılımı bilindiği için, belirli aralıklarla eğri üzerinde düzlemler oluşturularak çizilmiştir. Oluşturulan düzlemler üzerinde çizilecek kesit geometrisinin ölçüleri hesaplanarak çizilmiştir ve çizimin yapıldığı CAD programındaki loft komutu kullanılarak bu



Şekil 1: Farklı dudak şekilli hava alıkları, (a) geleneksel daire, (b) elips, (c) üçgen, (d) kare, ve (e) dikdörtgen

kesitlerden yeni hava alığı geometrisi oluşturulmuştur. Bu yöntemle oluşturulan farklı hava alığı geometrileri Şekil 1'de sunulmuştur.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölüm, ayrıntılı sonuçlar, karşılaştırmalı analizler ve değerlendirmelerle birlikte bu çalışmada incelenen tüm uygulamaların kapsamlı bir özetini sunmaktadır.

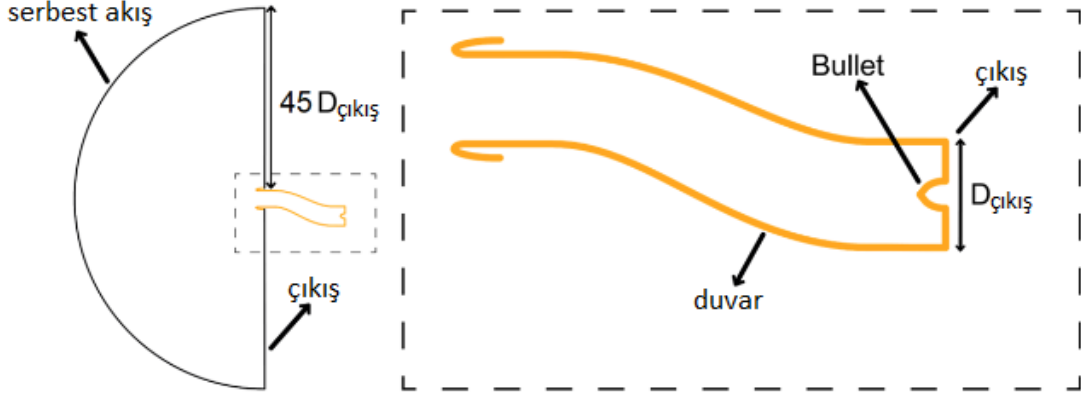
HAD ANALİZİ

Çözüm Ağı ve Sınır Koşulları

Hava alığının girişi için yarım küre kullanılarak bir atmosferik akış alanı oluşturulmuştur. Bu yarım kürenin çapı hava alığı çıkış çapının 30 katı olacak şekilde belirlenmiştir. Çözüm ağının sınır koşulları Şekil 2'de verildiği şekilde isimlendirilmiştir, hava alığı geometrisi sarı renkli olarak gösterilmiştir.

Atmosferik akış sınırının kavisli kısmı hız girişi olarak, atmosferik akış sınırının düz kısmı basınç çıkışı olarak ve hava alığı geometrisi ile bullet isimli konik yapı ise duvar olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, hava alığı geometrisinin çıkışı basınç çıkışı olarak tanımlanmıştır. Sınır koşulları ve akış özellikleri GARTEUR Report'tan [9] alınmıştır. Sınır koşulları Tablo 1'de, akış özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

Bu çalışmada, yüzey çözüm ağı üçgen olarak hazırlanmıştır ve geometri duvarındaki sınır tabakasını kapsayacak şekilde belirli bir büyüme oranı ile ilerleyen üçgen prizma çözüm ağı tercih edilmiştir. Duvarlardan itibaren hava alığı boşluğunun belirli bir kısmına kadar üçgen prizma ile çözüm ağı oluşturulduktan sonra ise arada kalan akış alanı ve atmosferik akış alanı için ise dört yüzlü



Şekil 2: Çözüm Ağı ve Sınır Koşulları

(tetrahedral) elemanlar ile çözüm ağı oluşturulmuştur. Hazırlanan çözüm ağının sınır koşulları Şekil 2'de verilmiştir.

Çözüm ağı hazırlanırken STAR-CCM+ ticari yazılımı kullanılmıştır. Daha sonraki çalışmalarda ise açık kaynak çözüm ağı araçları ve OpenFOAM'in snappyHexMesh aracı kullanılarak çözüm ağı hazırlanması planlanmaktadır.

HAD çözücü ayarları

Bu çalışmada, atmosferik akış girişindeki hız 0,2 Mach civarında ses altıdır, ancak akış hızı hava alığı içerisinde yükselmektedir [9]. Bu nedenle, HAD analizi ile ilgili çözücü ve türbülans modeli seçimi yapılırken bu vakanın ses altı, sıkıştırılabilir ve türbülans etkileri de dikkate alınmıştır. Farklı senaryolar için OpenFOAM'in çeşitli çözücüleri vardır, rhoSimpleFoam çözücüsü ise kararlı durum ve sıkıştırılabilir akışlar için kullanılan, ısı transferi ve türbülans etkilerini de içeren bir çözücüdür. Sonuç olarak, bu çalışmada kararlı durum analizi yapılacağı için rhoSimpleFoam çözücüsünün kullanılmasına karar verilmiştir.

OpenFOAM'in rhoSimpleFoam çözücüsü ile birlikte duvar etkilerini ve türbülanslı akış koşullarının etkilerini yakalayabilmek için yaygın bir türbülans modeli olan $k-\omega$ SST türbülans modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu model iki denklemlilik bir modeldir, yani korunum denklemlerine ek olarak iki taşıma denklemini de çözmektedir. Bu taşıma denklemleri türbülanslı enerjinin konveksiyon ve difüzyon etkileri içindir. Türbülanstaki enerjiyi tanımlayan türbülans kinetik enerjisi (k) ve birim türbülans kinetik enerjisi başına dağılım oranını belirleyen özel türbülans dağılım oranı (ω) taşınan iki değişkendir. ω genellikle türbülans ölçeği olarak adlandırılır [wilcox, 1988].

Hava Alığının Performans Özellikleri ve Akış Parametreleri

Hava alığının performansını değerlendirirken, aerodinamik arayüz düzlemindeki (AIP) birkaç kritik parametre değerlendirilir. Bu parametreler, toplam basınç geri kazanımı, basınç bozulma katsayısı (distortion coefficient), Mach sayısı ve kütle akış hızı gibi temel unsurları içerir.

Toplam Basınç Geri Kazanımı: Toplam basınç geri kazanımı, hava alığının verimliliğini değerlendirmede önemli bir kriterdir. AIP'deki toplam basınç, atmosferik akıştaki toplam basınca oranını ölçer. Yüksek basınç geri kazanımı, hava alığının gelen hava akışının kinetik enerjisini basınca etkin bir şekilde dönüştürdüğünü ve kayıpları en aza indirdiğini gösterir. Bu parametre, motorun yeterli toplam basınca sahip havayı almasını sağlamak için kritik olup, genel motor performansı ve verimliliğine katkıda bulunur. Toplam basınç geri kazanımı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$PR = P_{total,AIP} / P_{total,giris}$$

burada $P_{total,AIP}$ ve $P_{total,giris}$ AIP'deki ve atmosferdeki ortalama toplam basınçlardır[Seddon, Goldsmith, 1999].

Basınç Bozulması: AIP'deki basınç bozulması da önemli bir performans parametresidir ve genellikle basınç bozulma katsayısı (DC60) ile karakterize edilir. Bu katsayı, AIP boyunca basınç dağılımındaki düzensizliği nicelendirir ve hava alığının akış koşullarını ne kadar iyi koruduğunu gösterir. Yüksek bozulma değerleri, basınç değişkenliklerinin fazla olduğunu, bu durumun ise motor performansını ve kararlılığını olumsuz etkileyebileceğini gösterir. Bozulma katsayısı şu şekilde hesaplanır:

$$DC60 = (P_{total,AIP} - P_{total,AIP60}) / q_{AIP}$$

Burada $P_{total,AIP60}$ AIP'de en düşük toplam basınca sahip olan 60° açılı bir sektördeki ortalama toplam basıncı göstermektedir, q_{AIP} ise AIP'nin ortalama dinamik basıncıdır[Seddon, Goldsmith, 1999].

Mach Sayısı ve Kütle Akış Hızı: Mach sayısı ve kütle akış hızı, AIP'deki akış özelliklerini anlamak için birbirleriyle bağlantılı olan parametrelerdir. Mach sayısı, akış hızının ses hızına oranını temsil eder ve hava alığı içerisindeki sıkıştırılabilirlik etkilerini anlamada kritik bir parametredir.

Kütle akış hızı ise, AIP'den geçen hava miktarını birim zaman başına ölçer. Hava alığı geometrisi ve çalışma koşulları tarafından doğrudan etkilenir. Mach sayısı ile kütle akış hızı arasındaki ilişki, hava alığının giriş alanı ve akış koşulları ile ilişkilidir, genellikle Mach sayısındaki artışın kütle akış hızında da bir artışa sebep olduğu tutarlı bir davranış gösterir.

Her iki parametre de, hava alığının verimli çalışmasını ve motor için yeterli kütle akış hızını sağlamasını garanti etmek için değerlendirilir. Mach sayısı ve kütle akış hızı arasındaki bağıntı genel olarak şu şekilde tanımlanabilir:

$$MFR = f(A_{AIP}, P_{total,AIP}, T_{total,AIP}, \gamma, R, M)$$

burada MFR kütle akış hızını ifade eder. Dolayısıyla değişkenlerin geri kalanının bilindiğini varsayarsak, Mach sayısı ile kütle akış hızı arasında bire bir ilişki vardır. Mach sayısının bir fonksiyonudur.

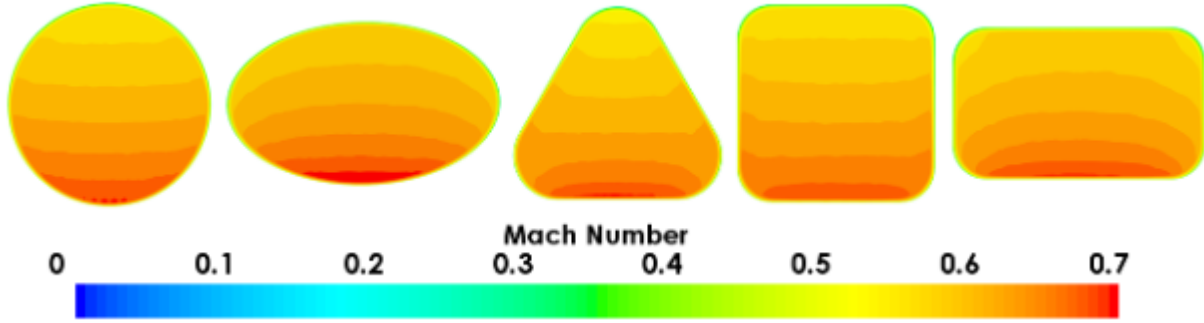
BULGULAR

Bu çalışmada, RAE M2129 hava alığı geometrisi üzerinde üç farklı çözüm ağı hazırlanarak ses altı, sıkıştırılabilir, türbülanslı ve daimi akış özelliklerine sahip bir vaka için HAD analizleri yapılmıştır. Çözüm ağı özellikleri verilerek ağdan bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Kütleli debi ve yakınsama sonuçları kullanılarak doğrulama ve geçerli kılma tamamlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde OpenFOAM'ın rhoSimpleFoam çözücüsünün hava alığı HAD analizleri için kullanılacak geçerli bir çözücü olduğu görülmüştür.

CFD analizinin doğrulanması için OpenFOAM ve STAR-CCM+ sonuçlarını GARTEUR'da rapor edilen deneylerle ve önceki RANS simülasyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca karşılaştırma amacıyla Atasoy RANS simülasyonlarının sonuçları da dahil edilmiştir. Temel model (dairesel dudaklı M2129 ağızlı), Tablo 1'deki önceki deneysel ve hesaplamalı sonuçlarla doğrulanmıştır.

Veri	Çözücü	MFR(kg/s)	AIP Mach	PR	DC60
Deneyssel	-	2.692	0.419	0.9744	0.313
GARTEUR 1	RANS $k-\omega$	2.663	0.38	0.9843	0.2643
GARTEUR 2	RANS $k-kl$ EARSM	2.636	0.3812	0.9756	0.4654
Atasoy[Atasoy, 2022]	RANS $k-\epsilon$	2.720	0.4232	0.979	0.2971
Star-CCM+	RANS $k-\omega$ SST	2.682	0.4185	0.9837	0.2332
OpenFOAM	RANS $k-\omega$ SST	2.586	0.4228	0.9436	0.4707

Table 1: Temel durum sonuçlarının önceki deneysel ve sayısal çalışmalarla karşılaştırılması



Şekil 3: Farklı şekilli hava alıklarının boğazındaki Mach sayısı

Farklı dudak şekline sahip hava alıklarının boğaz kesitinden alınan Mach sayısı konturları Şekil 3'te sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere hava alığı boğazındaki Mach konturları açısından dudakların etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu düşünülmüştür.

Ancak Şekil 4'te verilen simetri eksenindeki Mach sayısı konturları incelendiğinde elips dudak yapısına sahip geometrideki akış ayrılmasının daha büyük olduğu net bir şekilde görülmektedir.

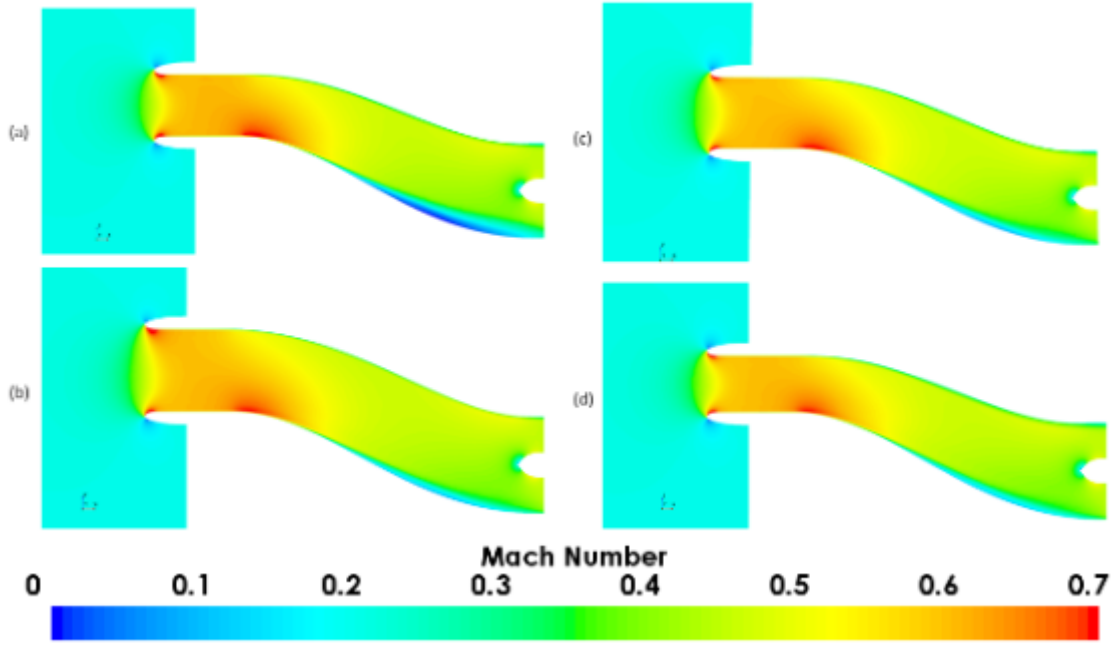
Şekil 4'te sunulan sonuçlar incelendiğinde sonuçlar gösteriyor ki, dudak yapısının hava alığı çıkışındaki kesitten alınan basınç geri kazanımı konturları ve düşük basınçlı bölgeler anlamında, sonuçlar arasında belirgin farklılıkların bulunduğu görülmektedir.

Farklı Dudak Şekillerinin Performansı

M2129 hava alığı için farklı dudak şekillerinin incelenmesi, havacılık uygulamalarında hava alığı performansını optimize etmek için kritik bulgular ortaya koymuştur. Her geometri elipsten-daireye, dikdörtgenden-daireye, kareden-daireye ve üçgenden-daireye basınç geri kazanımı (PR), bozulma katsayısı (DC60) ve aerodinamik arayüz düzlemindeki (AIP) Mach sayısı gibi temel performans metriklerini etkileyen benzersiz aerodinamik özellikler sergilemiştir.

Burada kıyaslamalar yapılırken Tablo 1'de verildiği üzere STAR-CCM+ ve OpenFOAM sonuçları farklılık gösterdiğinden farklı dudak şekillerine sahip geometriler ile yapılan analizlerin kıyaslaması yapılırken kendi analiz sonuçları arasında kıyaslamalar yapılmıştır. Yani STAR-CCM+ ile yapılan geleneksel daire şekline sahip RAE M2129 hava alığının sonuçları ile yine STAR-CCM+ ile analizi yapılan diğer dudak şekillerine sahip geometrilerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Yine OpenFOAM ile yapılan analizler de kendi arasında kıyaslanmıştır. Bu sonuçlar ise Şekil 6 ve 7'de verilmiştir.

Elipsten-daireye geçiş yapan hava alığı geometrisi, RAE M2129 temel şekline kıyasla basınç geri kazanımında hafif bir iyileşme göstermiştir. Bu şekil, 0.9844 PR değeri ile yüksek bir basınç geri kazanımı sağlamıştır, bu da temel şekle göre küçük bir iyileşmedir. Ancak, DC60 değeri önemli ölçüde azalmış ve bozulmanın belirgin bir şekilde azaldığını göstermiştir. Basınç geri kazanımını korurken bozulmayı azaltma dengesi, elipsten-daireye geometrisini yüksek verimlilik ve düzgün hava



Şekil 4: Farklı hava girişlerinin merkez düzlemindeki Mach sayısı dağılımı (a) elips, (b) üçgen, (c) kare, ve (d) dikdörtgen

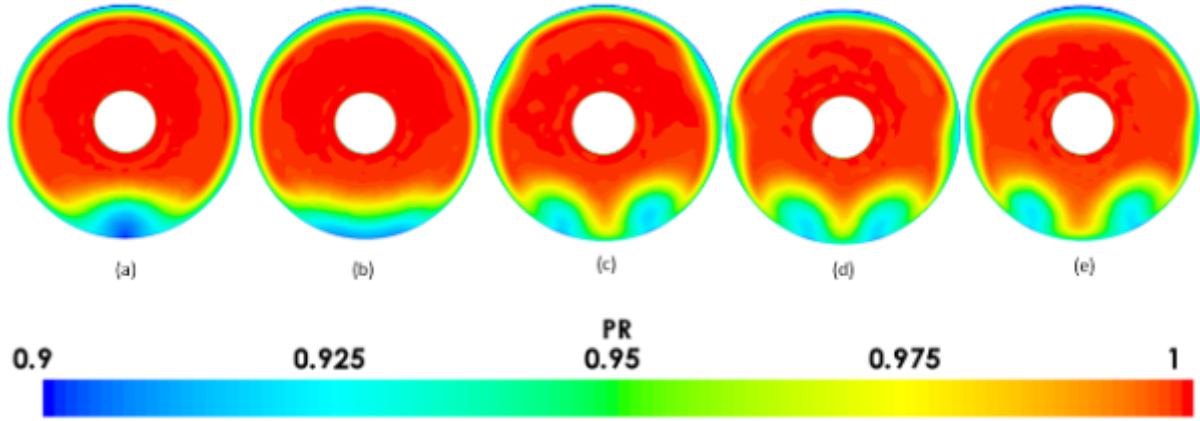
akışı gerektiren uygulamalar için uygun bir seçenek haline getirmektedir. Bu geometri, özellikle verimli ve kesintisiz hava akışı sağlamak için önemlidir ve motor performansını olumlu yönde etkileyebilir.

Dikdörtgenden-daireye geçiş yapan hava alığı geometrisi, bozulma katsayısında belirgin bir azalma sergileyerek 0.1192 DC60 değeri elde etmiştir, bu değer temel şekle göre önemli ölçüde daha düşüktür. Bu önemli bozulma azalması, basınç geri kazanımında hafif bir ödün verme ile birlikte gelmiştir ve bu da hava alığı tasarımlarını optimize ederken yönetilmesi gereken ödün verilecek özellikleri vurgulamaktadır. Dikdörtgenden-daireye şekli, hava akışının daha düzenli olmasını sağlar ve bu da motor performansını ve yakıt verimliliğini iyileştirebilir. Ancak, basınç geri kazanımındaki hafif düşüş, belirli uygulamalar için bu şeklin kullanımını sınırlayabilir.

Kareden-daireye geçiş yapan hava alığı geometrisi, dikdörtgenden-daireye geometrisiyle benzer bir eğilim izlemiş ve basınç geri kazanımında hafif bir azalma ile bozulma katsayısında iyileşmeler sunmuştur. Kare şeklin DC60 değeri olan 0.1799, temele göre önemli ölçüde daha düşük olup, daha iyi hava akışı kalitesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, basınç geri kazanımı biraz düşmüştür, bu da bu geometrinin hava akışı uniformitesini iyileştirirken hava alığının genel verimliliğini biraz etkileyebileceğini göstermektedir. Bu geometri, aerodinamik performansı iyileştirirken belirli operasyonel koşullarda motorun verimliliğini etkileyebilir.

Üçgenden-daireye geçiş yapan hava alığı geometrisi dengeli bir performans sunmuş ancak elipse kıyasla daha yüksek bozulmaya sahip olmuştur. Bu şekil 0.9832 PR ve 0.1448 DC60 değerlerine ulaşmış ve bu da makul bir basınç geri kazanımını korurken bozulmayı diğer geometriler kadar etkili bir şekilde azaltmadığını göstermektedir. Bu bulgular, farklı havacılık uygulamaları için gereken özel performans kriterlerine dayalı olarak uygun dudak şeklinin seçiminin önemini vurgulamaktadır. Üçgenden-daireye şekli, belirli aerodinamik performans hedeflerine ulaşırken yapısal ve operasyonel gereksinimleri dengeleyebilir.

Yukarıda bahsedildiği gibi farklı dudak yapılarının genel performansı aşağıdaki grafiklerde karşılaştırılmıştır.



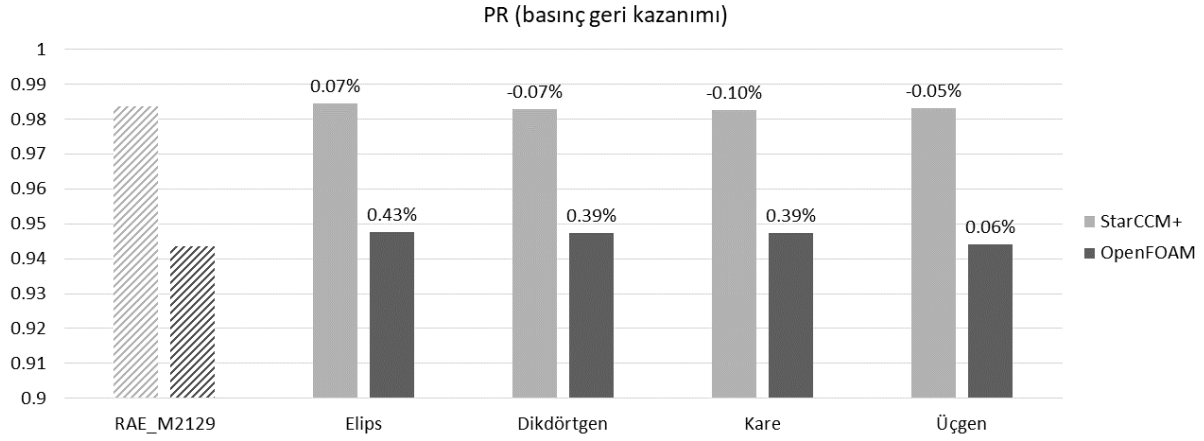
Şekil 5: Farklı hava girişlerinin kanal çıkış kesitindeki toplam basınç geri kazanım dağılımı, (a) geleneksel daire, (b) elipse, (c) üçgen, (d) kare, ve (e) dikdörtgen

SONUÇ

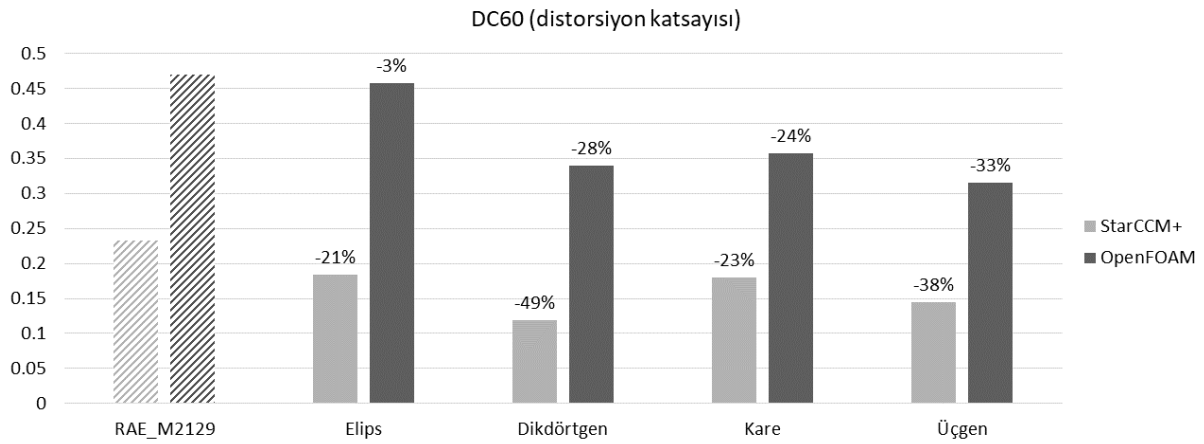
Bu çalışma, dudak şeklinin dikkatlice değerlendirilmesinin hava alığı performansında önemli iyileşmelere yol açabileceğini göstermektedir. STAR-CCM+ ve OpenFOAM gibi ileri CFD araçları kullanılarak yapılan bu çalışmada, geometrik değişikliklerin temel aerodinamik parametreleri nasıl etkilediğine dair kapsamlı bir analiz sunulmaktadır. Elipsten-daireye, dikdörtgenden-daireye, kareden-daireye ve üçgenden-daireye geometrilerinin her biri, belirli uygulamalar için farklı avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır. Elips şekli genel olarak en dengeli performansı sağlarken, dikdörtgen şekli bozulma katsayısını önemli ölçüde azaltmakta, ancak basınç geri kazanımında hafif bir ödün vermektedir. Kare şekli, hava akışı kalitesini iyileştirirken, üçgen şekli daha dengeli bir performans sunmaktadır ancak bozulma oranı daha yüksektir.

Bu bulgular, modern havacılık mühendisliğinde hava alığı sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için çok değerlidir ve performans, verimlilik ve operasyonel güvenilirliğin artırılmasını sağlamaktadır. Gelecek çalışmalar, bu bulguları daha da derinlemesine inceleyebilir ve hava alığı performansını daha da optimize etmek için yeni geometrik tasarımlar ve yenilikçi çözümler geliştirebilir. Bu çalışma, havacılık endüstrisinde daha verimli ve güvenilir hava alığı sistemleri tasarlamak için önemli bir adım olarak kabul edilebilir.

Ayrıca yapılan analizlerde STAR-CCM+'ın akış ayrılmasını daha az hesapladığı ve sonuçları daha iyi tahmin ettiği görülürken, OpenFOAM rhoSimpleFoam çözücüsü ise daha kötümser sonuçlar elde ederek deney verilerinden daha fazla uzaklaşmıştır. Literatürdeki çalışmalardan bir tanesi HİSA OpenFOAM kullanarak RAE M2129 geometrisinin analizlerini yapmış ve sonuçları deney verileriyle kıyaslamıştır. [Erdemli, Metin, Sert ve Baş, 2021] Bu çalışmaya dayanılarak HİSA OpenFOAM çözücüsünün sıkıştırılabilir türbülanslı akışlar için daha uygun olduğu görülmüştür, dolayısıyla bu çalışmanın devamında yapılacak çalışmalarda HİSA OpenFOAM'ın da kullanılması gelecek çalışmalar olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6: Farklı hava giriş dudak şekilleri için basınç geri kazanım değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7: Farklı hava giriş dudak şekilleri için basınç bozulma katsayısı değerlerinin karşılaştırılması

Kaynaklar

Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD), 2007. *Air Intakes for High Speed Vehicles*, AGARD-AR-270, September 1991.

Atasoy M., *Design Optimization of An S-Shaped Subsonic Intake Using Bayesian Approach and Bezier Curves*, M.Sc. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, 2022.

Erdemli, M., Metin, Ç.A.S., Sert, İ.O. ve Baş, O., 2021. *Investigation of RAE-M2129 S-Shaped Intake with Computational Fluid Dynamics*, 11th Ankara International Aerospace Conference (AIAC-2021), Ankara, September 2021.

Hamstra, J.W., Miller, D.N., Truax, P.P., Anderson, B.A. ve Wendt, B.J., 2000. *Active inlet flow control technology demonstration*, The Aeronautical Journal, vol. 104, no. 1040, pp. 473–479, 2000.

Menzies, R., Badcock, K., Barakos, G. ve Richards, B., 2002. *Validation of the simulation of flow in an S-duct*, 20th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2002.

Mohler, S., 2004. *Wind-US flow calculations for the M2129 S-duct using structured and unstructured grids*, 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.

- Seddon, J., Goldsmith, E.L., 1999. *Intake aerodynamics, Second Edition*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- Sóbester, A., 2007. *Tradeoffs in jet inlet design: A historical perspective*, Journal of Aircraft, vol. 44, no. 3, pp. 705–717, 2007.
- Wilcox D.C. , " Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models," *AIAA Journal*, vol. 26, no. 11, pp. 1299-1310, 1988.