

GÖZENEKLİ TAHLİYE SİSTEMLERİNİN SES-ÜSTÜ HIZLARDA HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE ANALİZLERİ

Gökhan Akar*
Roketsan A.Ş., Ankara

Sinan Eyi†
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Şok dalgası / Sınır tabaka etkileşimi ses-üstü hızlarda hava-alığı tasarımı çalışmalarında dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Şok dalgası / sınır tabaka etkileşiminden kaynaklı sınır tabaka ayrılmalarını engelleyerek kütle akışını artırmak ve toplam basınç kayıplarını azaltmak amacı ile sınır tabakadaki düşük momentuma sahip akışın tahliye delikleri ile alınması yaygın olarak kullanılan bir çözümdür. Bu çalışmada tek ve çok gözenekli tahliye sistemleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile incelenmiştir. Doğrulama çalışmaları kapsamında farklı seviyelerdeki çözüm ağı yoğunlukları ile Spalart-Allmaras, Realizable k-ε ve SST k-ω türbülans modelleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından uygun türbülans modeli ile çözüm ağı yoğunluğu belirlenmiştir. Farklı basınç oranı parametresine (P_p/P_t) göre sonik akış katsayısı HAD analiz sonuçları, deney verileri ile karşılaştırılarak HAD yöntemlerinin tahliye sistemi analiz ve tasarım çalışmalarında kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

SEMBOLLER

A	=	Alan
γ	=	Özgül ısı sabit oranı
M	=	Mach sayısı
P	=	Basınç
Q_{sonic}	=	Sonic akış katsayısı
ρ	=	Yoğunluk
R	=	R gaz sabiti
T	=	Sıcaklık
W	=	Kütle debisi (kg/s)
D	=	Delik çapı
L	=	Delik derinliği

Alt Simgeler

t	=	Toplam
s	=	Statik
w	=	Duvar
pl	=	Tahliye odası
bl	=	Tahliye
e	=	Sınır tabaka çizgisi

GİRİŞ

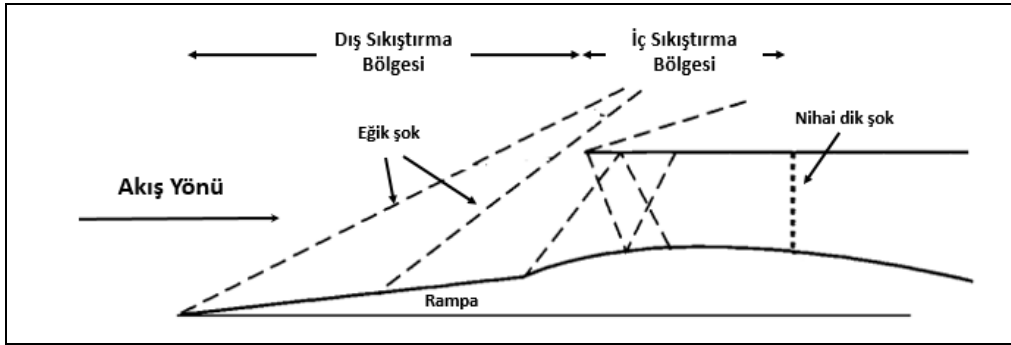
Hava solumalı itki sistemlerinde hava alığı tasarımı motor performansı, kararlılığında önemli rol oynamaktadır. Hava alığı, serbest akış koşullarında motor için uygun olan koşullarda ve miktardaki havayı tasarım ve tasarım dışı tüm koşullarda yüksek verim ve düşük akış bozuntusu ile sağlamakla görevlidir.

* Kıd. Uzm. Mühendis, Aerodinamik Tasarım ve Analiz Müdürlüğü, E-posta: gakar@roketsan.com.tr

† Doç. Dr., Orta Doğu Teknik Üniversitesi, E-posta: seyi@metu.edu.tr

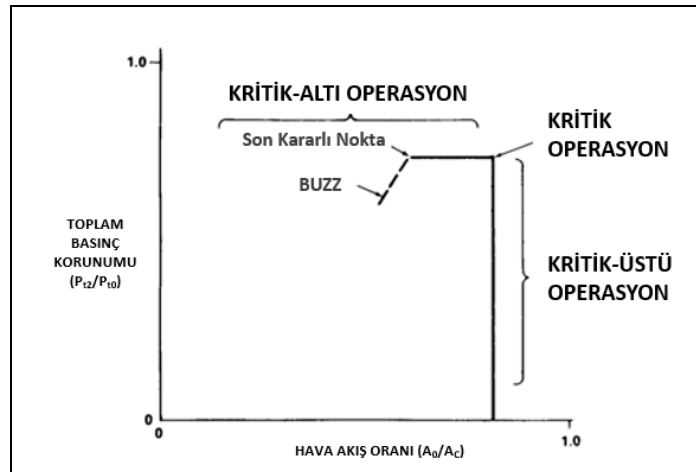
Hava alığı tasarımı akışın karakteristiğinden dolayı ses-altı ve ses-üstü olmasına göre farklılıklar göstermektedir. Ses-altı hızlarda, ses-altı difüzör yardımı ile motora istenen hız ve miktarda akış sağlanır. Ses üstü hızlarda ise akış öncelikle ses-üstü sıkıştırma bölgesinde yavaşlatılması gerekir. Boğaz bölgesinde son bir dik şok oluşturularak akış hızı ses-altına indirilir.

Ses-üstü sıkıştırma bölgesinde toplam basınç korunumunun yüksek tutulması motor verimi ile birebir ilişkili olduğundan dolayı tek bir dik şok yerine kademeli açılı rampa geometrisi ile birden fazla eğik şok oluşturularak basınç korunumunun yüksek tutulması amaçlanır. Boğaz alanında nihai dik şok (*ing: "terminal normal shock"*) ile ses-altı hızlara indirilerek yanma odasına istenen hızda hava sağlanır. Fakat ses-üstü hız artıktıkça rampa üzerinde bulunan kama açısı giderek artarak boğaz bölgesindeki dönüş açısının artmasına sebep olur. Bu nedenle Şekil 1'de gösterildiği gibi Mach 2.5 hızından itibaren eğik şoklar kanal (*ing: "duct"*) içine düşürülerek ses-üstü sıkıştırma kanal içinde de devam etmesi sağlanır. Bu sayede daha ortalama bir boğaz açısı elde edilmiş olur. Bu tip hava-alıklarına karma sıkıştırmalı (*ing: "mixed compression"*) hava alığı denir [Mattingly, Heiser ve Pratt, 2002].



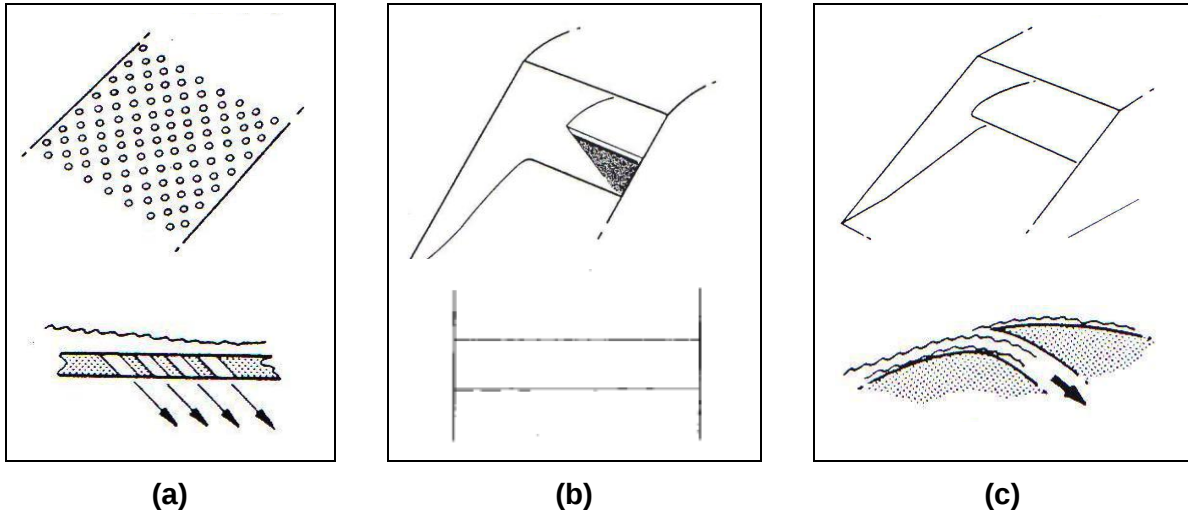
Şekil 1: Karma Sıkıştırmalı Hava alığı [Mattingly, Heiser ve Pratt, 2002]

Akış ters basınç gradyanı etkisi ile kısa tutulmuş bir rampa boyunca ve karma hava alıkları için şok-sınır tabaka etkileşiminden dolayı kanal iç yüzeylerinden ayrılabilir. Akış ayrılması, ayılmanın gerisindeki bölgenin alanını azaltarak istenen miktarda akışın girmesini engeller ve nihai dik şokun boğaz bölgesinden rampa bölgesine öne doğru hareket etmesine sebep olur. Bu durumda akışın bir kısmı hava alığı kaportasının (*ing: "cowl"*) etrafına taşarak sürüklemeyi hızla arttıracaktır. Ayrıca karma sıkıştırmalı hava alıklarında kritik-altı operasyonda başlama problemi vardır. Hava alığını tekrar başlatmak için hareketli boğaz bölgesine ihtiyaç duyulur. Eğer akış miktarı Şekil 2'de görüldüğü gibi belli bir değerin altına gerilirse "Buzz" denilen düşük frekanslı, yüksek genlikli basınç salınımları meydana gelir. "Buzz" durumunda nihai şok boğaz kısmından öne, arkaya doğru hareket eder [Fluid Dynamics Panel Working Group 13, 1991]. Eğer "buzz" durumuna sebep olan durumlar ortadan kaldırılmaz ise bu döngü motor hasar görene kadar devam edecektir. "Buzz" durumu genellikle büyük miktarda akış kopması ile ilişkilidir [Mattingly, Heiser ve Pratt, 2002].



Şekil 2: Ses-üstü hava alığı çalışma modları [Mahoney, 1990]

Ses-üstü hava alıklarında sınır tabaka ayrılmalarından kaynaklı sorunları engellemek ve kararlılık aralığını arttırmak amacı ile sınır tabaka tahliye sistemi (*ing: "boundary layer bleed systems"*) kullanımı yaygın bir çözümdür. Sınır tabakanın kalınlaştığı ve ters basınç gradyanı etkisindeki bölgelerdeki sınır tabakadaki düşük momentuma sahip akış emilerek akışın yüzeyden ayrılması engellenmeye çalışılır. Emilen akış tahliye odası denilen basınçlanmış bölgeye alınarak farklı alt sistemlerde kullanılır veya hava alığının dışına atılır [Mattingly, Heiser ve Pratt, 2002]. Tahliye sistemlerinde gözenekli (*ing: "porous"*), yarık (*ing: "slot"*) veya çıkıntılı (*ing: "ram"*) tip modeller kullanılabilir. Farklı tahliye sistemi görselleri Şekil 3'te verilmiştir. Gözenekli tahliye sistemleri, istenilen boyutta delik delme imkanı ve rüzgar tüneli testlerinde istenen delikler kapatılarak farklı model oluşturma esnekliğinden dolayı genellikle diğer sistemler yerine tercih edilirler [Mahoney, 1990]. Ayrıca şok / sınır tabaka etkileşim bölgesinin hareketli olduğu sistemlerde gözenekli tahliye sisteminin kullanımı geniş bölgede kontrol imkanı sağlar. Bu nedenle nihai dik şok ve şok yansımasından kaynaklı etkileşimleri engellemek için karma sıkıştırımlı sistemlerde yaygın olarak kullanılır [Mattingly, Heiser ve Pratt, 2002].



Şekil 3: (a) Gözenekli, (b) yarık ve (c) çıkıntılı tahliye sistemi

Tahliye sistemi tasarımı uygun seviyede akış emilimi önemlidir. Çünkü gereken miktardan fazla akış alındığında sınır tabakanın üzerindeki yüksek momentuma sahip akış da emilerek toplam motor performansında kayıplar meydana gelir. Ayrıca tahliye sisteminin sürüklenme kuvvetini ve ağırlığını arttıracaktır. Bu nedenlerle tahliye sistemini etkin kullanmak için akış miktarı ve konumunun dikkatli tasarımı gerekir. Özellikle iç sıkıştırıma sahip olan hava alıklarında tasarım süreci daha karmaşık hale gelir. Farklı formlardaki çoklu şok/sınır tabaka etkileşiminden dolayı kanalın içindeki tüm yüzeyler göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla beraber tahliye edilen akışın sistemin dışına atılması da tasarım sürecine ilave zorluklar getirir [Seddon ve Goldsmith, 1999].

Tahliye sistemi tasarımı geçmişte ağırlıklı olarak rüzgar tüneli testleri ile gerçekleştirilmekteydi. Rüzgar tüneli testlerinin karmaşık, pahalı ve fazla süre almasından dolayı analitik yöntemler kullanılmaya başlanmıştır [Syberg ve Hickcox, 1973]. Ayrıca tahliye sistemi analizlerinde her gözenekğin analizi zor ve fazla miktarda bilgisayar kaynağı gerektirdiğinden dolayı gözeneklerin olduğu bölgeye gerçekçi sınır koşulu tanımlamak için HAD alanında çalışmalar yapılmıştır [Abrahamson ve Brower, 1998; Dambara, Yamamoto ve Honami, 1998; Doerffer ve Bohning, 2000; Mayer ve Paynter, 1994; Slater, 2009]. NASA tarafından Yüksek Hız Araştırma Programı dahilinde gündeme gelen ekonomik ve çevreci ses-üstü sivil taşımacılık çalışmaları kapsamında gözenekli tahliye sistemleri için 90'lı yıllarda birtakım testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler ile tahliye sistemlerine etki eden parametrelerin akış yapısına etkilerinin detaylıca incelenmesi, geniş çaplı model geliştirme ve test çalışmaları için veri elde edilmesi amaçlanmıştır [Willis, Davis ve Hingst, 1995]. Ayrıca bu veriler hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çalışmalarında doğrulama ve geçerleme çalışmalarına girdi sağlayacaktır [Bodner, Greber, Davis, ve Hingst, 1996]. Bu test verileri HAD çalışmalarında sınır koşulu oluşturma ve doğrulama, analiz çalışmalarında yoğun olarak kullanılmıştır [Flores, Shih, Davis ve Willis, 1999; Hamed ve Li, 2008; Hamed, Li ve Manavasi, 2009; Hamed, Manavasi, Shin, Morell ve Nelson, 2011; Slater, 2009].

Bu çalışmada tek ve çok gözenekli tahliye sistemleri için farklı türbülans modelleri ve farklı seviyelerdeki çözüm ağı yoğunlukları ile HAD analizleri sonuçlarının doğruluğu araştırılmıştır. Çözüm ağına literatürdeki çalışmalardan farklı olarak karmaşık geometrilerde modelleme ve uygulama kolaylığına sahip yapısız (ing: “unstructured”) ağı modellemenin sonuçlara etkisi değerlendirilmiştir. Çözüm ağı oluşturmada ticari Gambit ve Tgrid yazılımları; akış çözümünde ise ticari Fluent yazılımı kullanılmıştır. HAD analiz sonuçlarından elde edilen sonik akış katsayısı ve referans noktalardan elde edilen toplam basınç profilleri deney verileri ile karşılaştırılarak sunulmuştur.

YÖNTEM

Tahliye sisteminin akış boşaltma kapasiteleri sonik akış katsayısı Q_{sonic} (ing: “sonic flow coefficient”) ile temsil edilir. Tahliye akışı debisi, farklı Mach hızı ve sınır tabaka profilleri için rüzgar tünellerinden ölçülen sonik akış katsayısı ile belirlenir.

$$Q_{sonic} = \frac{W_{bl}}{W_{sonic}}$$

Kütle debisinin W genel formu;

$$W = \rho A V = A P_t M \left(\frac{\gamma}{R T_t} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{-(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}}$$

Tahliye deliklerinden boşaltılan gerçek kütle debisi W_{bl} aşağıdaki gibi tanımlanır.

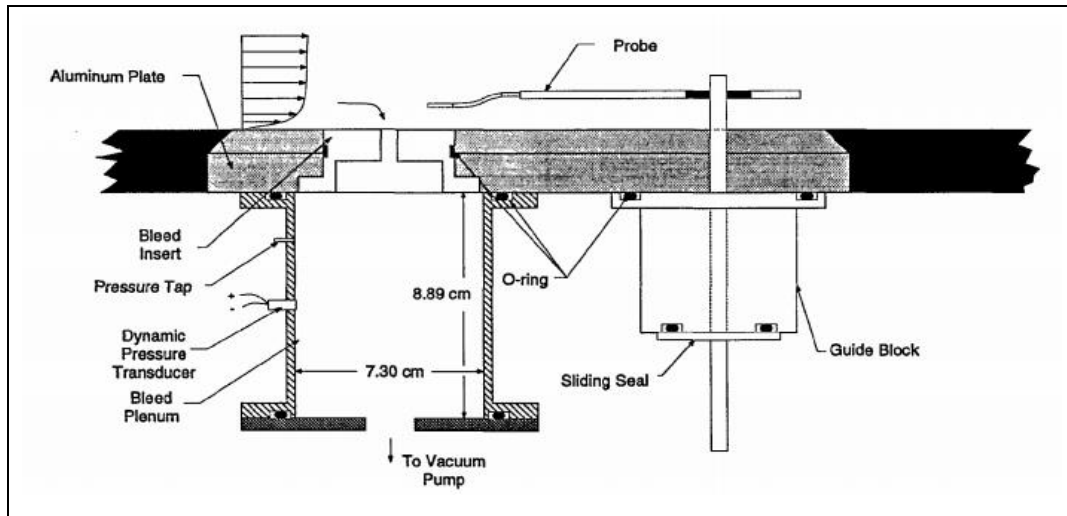
$$W_{bl} = A_{bl} P_{t,bl} M_{bl} \left(\frac{\gamma}{R T_{t,bl}} \right)^{1/2} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{bl}^2 \right)^{\frac{-(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}}$$

Referans kütle debisi W_{sonic} tahliye deliklerinde sonik hızdaki ($M = 1$) akışın izentropik akış koşulu kabulü ile hesaplanır.

$$W_{sonic} = A_{bl} P_{t,e} \left(\frac{\gamma}{R T_{t,e}} \right)^{1/2} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{-(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}}$$

TEK GÖZENEKLİ TAHLİYE SİSTEMİ

NASA Lewis Araştırma Merkezi ses-üstü tüneline tek tahliye deliğinin düze levha üzerindeki ses-üstü sınır tabakaya etkilerini incelemek amacı ile yüzeye 90° (normal delik) ve 20° açı verilerek Mach 2.46 hızında testler gerçekleştirilmiştir. Test bölümü 15x15 cm kesit boyutlarına sahip olup akış 7.3 cm çapa 8.89 cm uzunluğa sahip tahliye odasına emilmektedir. Bu çalışma kapsamında yüzeye 90° konumlandırılmış normal delik modeli incelenecektir. Tahliye deliğinin çapı 6 mm olup uzunluk-çap (L/D) oranı ikidir [Bodner, Greber, Davis ve Hingst, 1996].



Şekil 4: Tek Gözenekli Tahliye Sistemi Test Kurulumu [Bodner, Greber, Davis ve Hingst, 1996].

Rüzgar tüneli test bölümü alt yüzeyinde sınır tabaka doğal olarak oluşmaktadır. Sınır tabaka referans değerleri delik merkezinden 6.25 cm geride (akış geliş yönünde) hareketli pitot tüp yardımı ile ölçülmüştür. Test koşulları ile referans sınır tabaka değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Test Koşulları

Mach	2.46
P_t	172368 Pa
T_t	300 K
δ	1.29 cm
δ^*	0.34 cm
Re	$1.69 \times 10^7 / m$

Test verisi belirsizlik değerleri toplam basınç ölçümleri için %1.5, sonik akış katsayısı (Q_{sonic}) için %1 olarak raporlanmıştır.

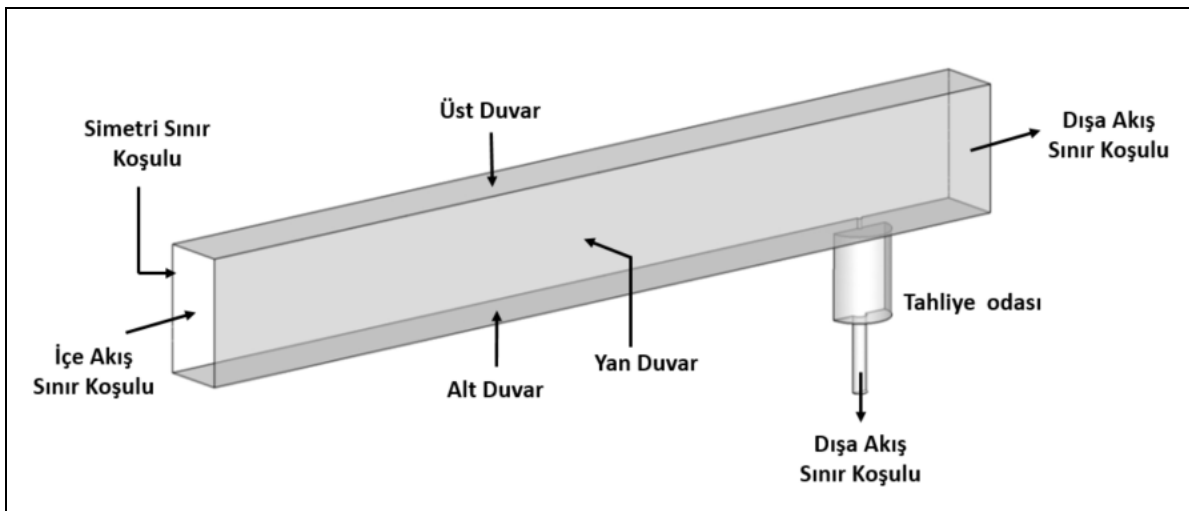
Akış Çözücüsü ve Çözüm Stratejisi

Gözenekli tahliye modeli HAD analizleri Reynolds-Average Navier-Stokes denklem çözücüsü olan ticari FLUENT yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri mükemmel gaz kabulü yapılarak zamandan bağımsız, üç boyutlu ve ağdalı akış olarak gerçekleştirilmiştir. Çözücü ayarları nokta bazlı sonlu hacimler metoduna dayalı Roe akı ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Analizler başlangıçta birinci derece ayrıklaştırma ile başlatılmış belirli bir özyinelemeden sonra ikinci dereceden ayrıklaştırmaya geçilerek sonuçlar yakınsatılmıştır.

HAD analizler için yakınsama kriteri olarak artıkların logaritmik ölçekteki değişimi on üzeri eksi beş seviyelerine ve tahliye edilen kütle debisi miktarı yüzdesel değişiminin ise son 1000 özyinelemede % 1’in altına düşmesi dikkate alınmıştır.

Katı Model, Çözüm Ağı ve Sınır Koşulları

Rüzgar tüneli test referans çizgisindeki sınır tabaka özelliklerini sağlamak amacı ile hava giriş sınır koşulu referans çizginin 91.5 cm gerisine tanımlanacak şekilde model oluşturulmuştur. Referans çizgi boyunca normalize edilmiş hız profili karşılaştırması Şekil 8(a)’da gösterilmektedir. Analizde kullanılan katı model ve tanımlanan sınır koşulları Şekil 5’te gösterilmektedir. Analiz modelinde çözüm ağı eleman sayısını azaltmak amacı ile simetri yüzeyi tanımlanmıştır. Çözüm ağına alt, yan, delik ve tahliye odası duvarları ısı geçirmez (ing: “*adiabatic wall*”) ve kaymaz (ing: “*no-slip wall*”) yüzey sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Üst duvar delik etrafındaki akışı etkilemeyeceği varsayımı yapılarak kayar (ing: “*slip wall*”) yüzey sınır koşulu tanımlanarak ağ eleman sayısı azaltılması amaçlanmıştır.



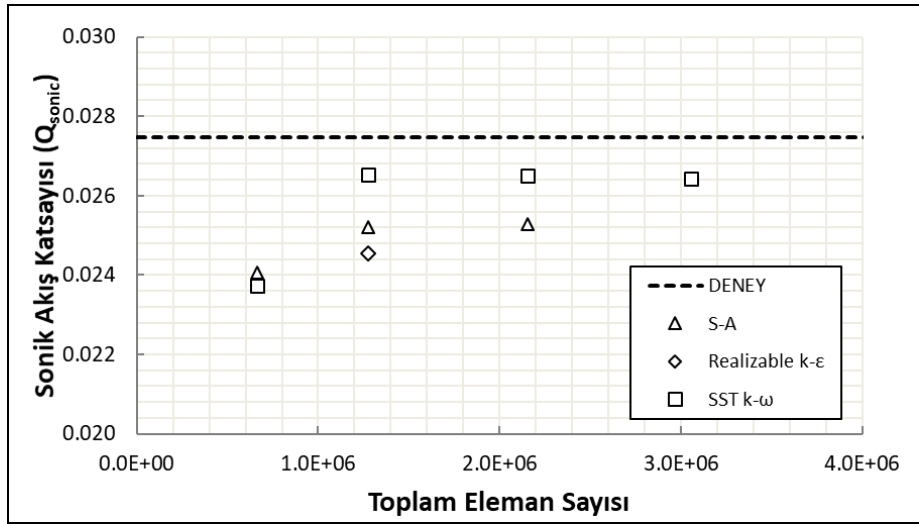
Şekil 5: Tek Gözenekli Tahliye Sistemi Analiz Modeli ve Sınır Koşulları

Çözüm eniyileme çalışmalarında yapısız elemanlara sahip 4 farklı yoğunluktaki çözüm ağı, ticari Gambit ve Tgrid programları ile oluşturulmuştur. Çözüm ağları için toplam eleman sayıları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2: Çözüm Ağı Toplam Eleman Sayısı

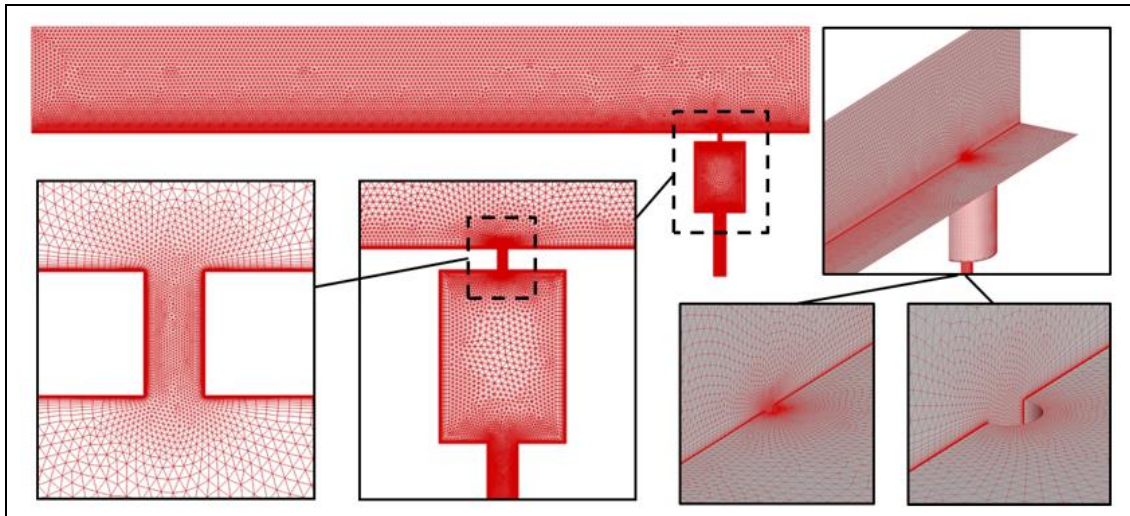
	Min. Eleman Büyüklüğü [D]	Toplam Eleman Sayısı
Seyrek	0.06	0.6×10^6
Normal	0.04	1.3×10^6
Yoğun	0.03	2.2×10^6
Çok Yoğun	0.025	3.1×10^6

Çözüm yöntemi belirleme ve çözüm ağı eniyileme çalışmalarında basınç oranı parametresinin $P_{pl}/P_t=0.0348$ olduğu durumun analizleri değerlendirilmiştir. Çözüm yöntemi belirleme çalışmalarında Spalart-Allmaras (S-A), Realizable k- ϵ ve SST k- ω türbülans modelleri denenmiştir. Şekil 6’da sonik akış katsayısının eleman sayısına ve çözüm yöntemine göre değişimi gösterilmiştir. Literatürdeki sonuçlar ile uyumlu olarak SST k- ω türbülans modeli analiz sonuçlarına en yakın sonucu vermiştir.



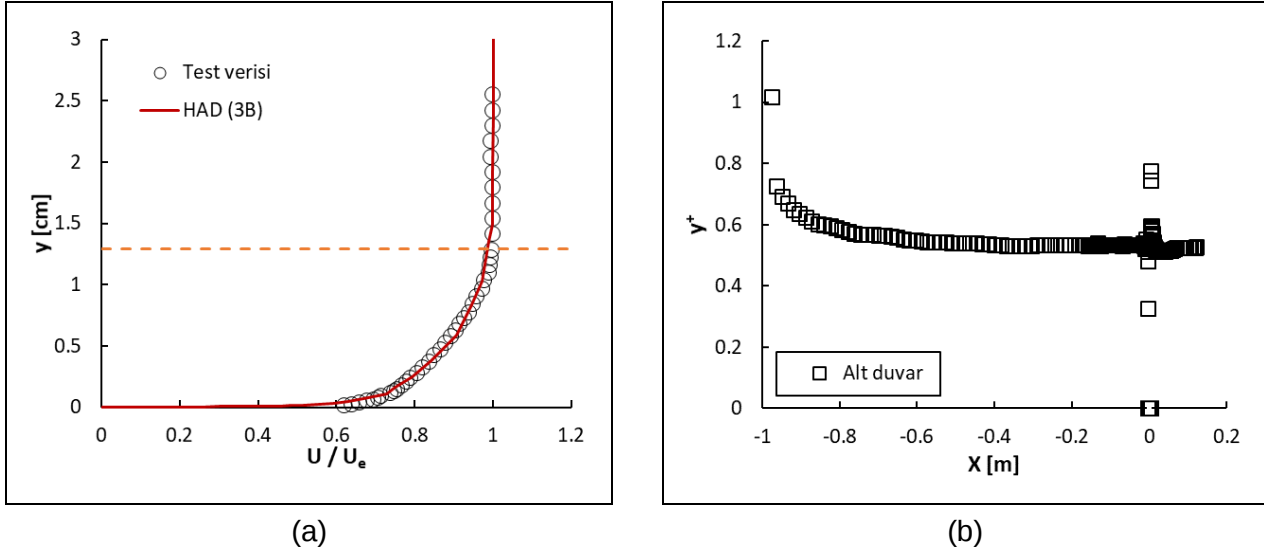
Şekil 6: Sonik Akış Katsayısının Toplam Eleman Sayısı ile Değişimi

Çözüm ağı eniyileme çalışmaları sonucunda; çok yoğun, yoğun ve normal çözüm ağı birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiğinden dolayı 1.3×10^6 elemana sahip normal yoğunluktaki çözüm ağı, HAD analizlerinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Normal çözüm ağı modeli görselleri Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7: Tek Gözenekli Tahliye Sistemi Çözüm Ağı

Çözüm ağı, dikdörtgen ağ yapısında oluşturulmuş sınır tabaka ve düzgün geçişli yapısız elemanlar ile modellenmiştir. Çözüm sonucunda alt duvar boyunca $y^+ \approx 1$ değerini sağlamak için ilk yükseklik 0.0061 mm olarak belirlenmiştir. Farklı yoğunluktaki çözüm ağları için aynı ilk yükseklik değeri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarındaki ilk yükseklik değeri kontrol edilerek uygunluğu doğrulanmıştır. Analiz sonucunda alt duvar boyunca elde edilen y^+ değeri Şekil 8(b)'de gösterilmektedir.

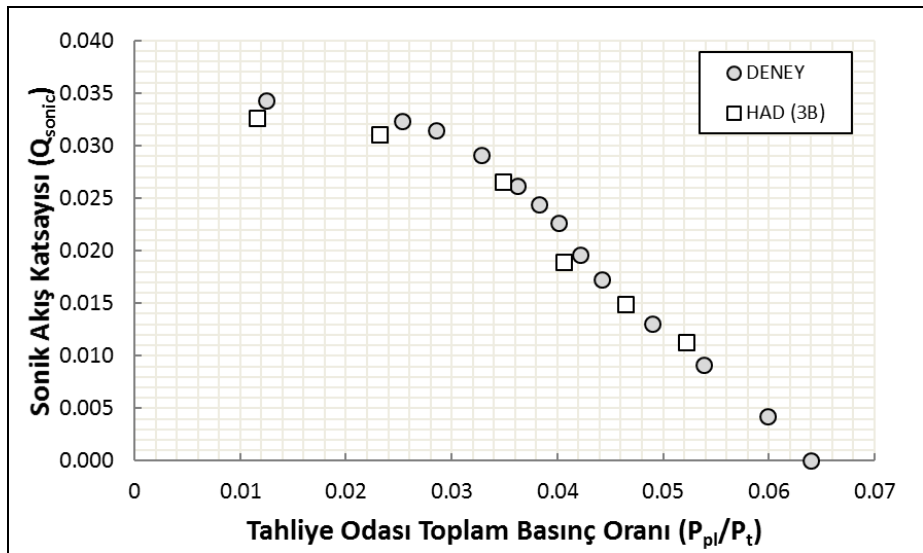


Şekil 8: (a) Referans Çizgi Boyunca Hız Profili Karşılaştırması (b) Alt Duvardaki y^+ Değeri

Analiz Sonuçları:

Çözüm ağı eniyileme çalışmaları verileri doğrultusunda normal yoğunluktaki yapısız çözüm ağı ile türbülans modellemesinde SST $k-\omega$ çözüm yöntemi seçilmiştir. HAD analizleri üç boyutlu, ağdalı, sıkıştırılabilir ve zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir.

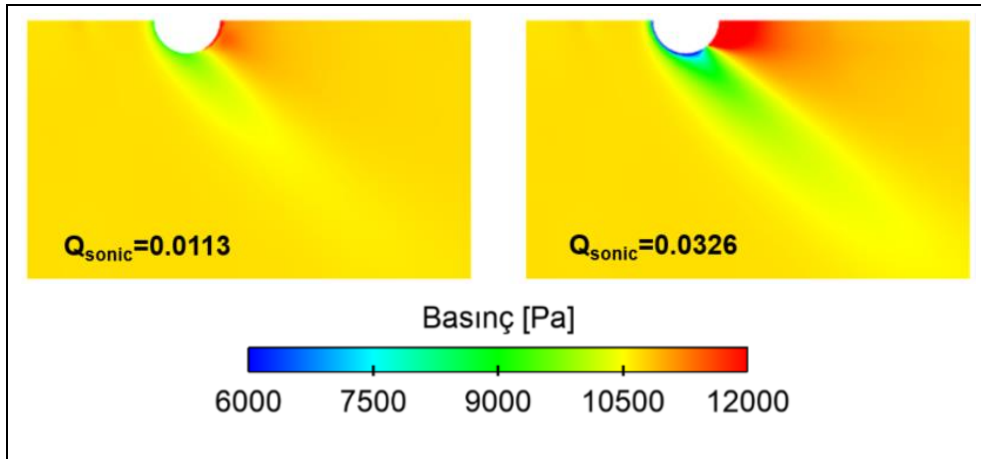
Analiz sonuçları rüzgar tüneli test verileri ile oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir (Şekil 9). Bu nedenle tek gözenekli tahliye sistemleri tasarım ve doğrulama çalışmalarında, test verisinin mevcut olmadığı durumlarda HAD analizleri kullanılabileceği değerlendirilmektedir.



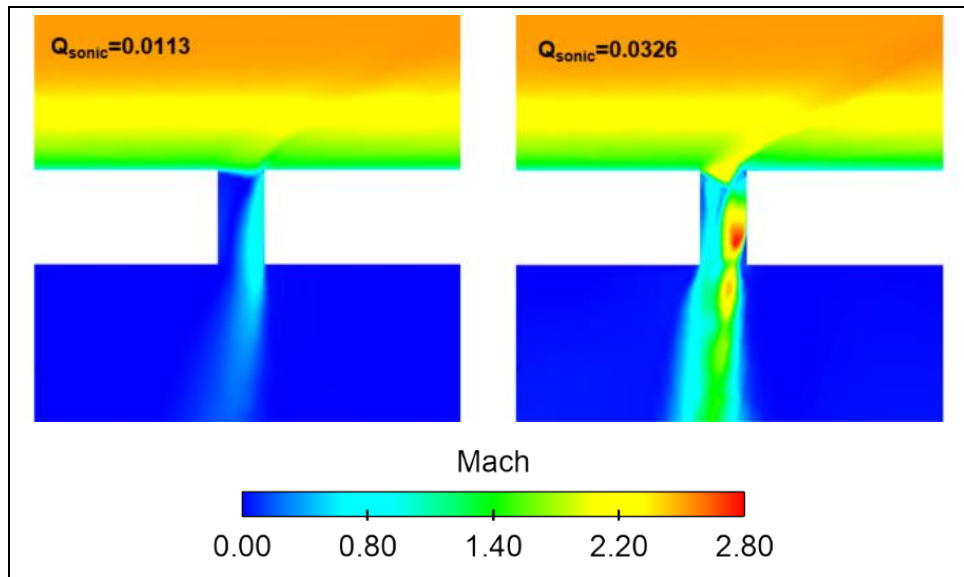
Şekil 9: Tek Gözenekli Tahliye Sistemi Analiz Sonuçları

Akış Alanı Görüntüleme:

Tek gözenekli tahliye sistemi sonik akış parametresinin $Q_{sonic}=0.0113$ ve $Q_{sonic}=0.0326$ olduğu durumlarda alt duvar üzerinde delik etrafındaki eşdeğer basınç yüzeyleri Şekil 10'da verilmektedir. Ayrıca simetri eksenine eşdeğer Mach yüzeyleri Şekil 11'de gösterilmiştir.



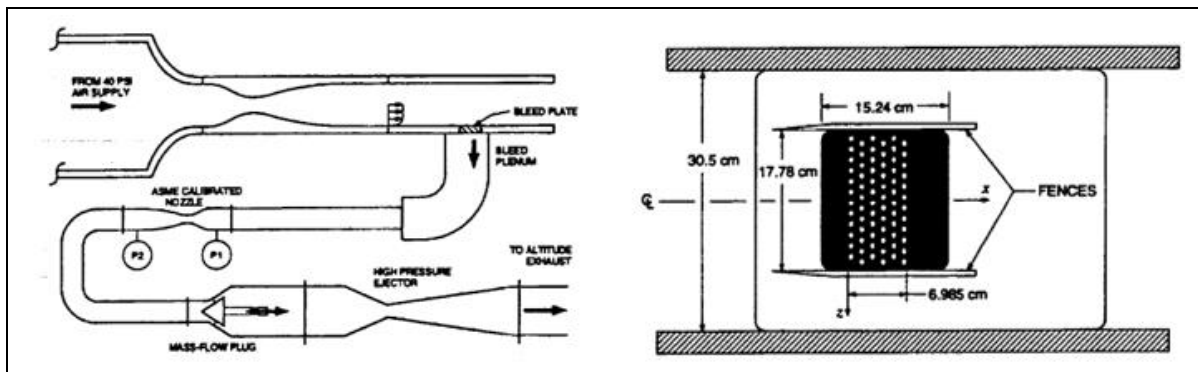
Şekil 10: Tek Gözenekli Tahliye Sistemi $Q_{\text{sonic}}=0.0113$ ve $Q_{\text{sonic}}=0.0326$ Durumu Eşdeğer Basınç Yüzeyleri



Şekil 11: Tek Gözenekli Tahliye Sistemi $Q_{\text{sonic}}=0.0113$ ve $Q_{\text{sonic}}=0.0326$ Durumu Eşdeğer Mach Yüzeyleri

ÇOK GÖZENEKLİ TAHLİYE SİSTEMİ

NASA Lewis Araştırma Merkezi ses-üstü tüneline düz levha üzerinde farklı geometri ve yüzeye farklı açılarda konumlandırılan çok gözenekli tahliye sistemleri için Mach 1.27, 1.58, 1.98 ve 2.46 hızlarında testler gerçekleştirilmiştir. Test bölümü 30x30 cm kesit boyutlarına sahip olup test kurulum görseli Şekil 12’de verilmiştir. Bu çalışma kapsamında Mach 2.46 hızında testleri gerçekleştirilen normal delik modeli (C1 modeli) incelenmiştir. Tahliye deliklerinin çapı 6.35 mm olup uzunluk-çap (L/D) oranı birdir [Willis, Davis ve Hingst, 1995].



Şekil 12: Çok Gözenekli Tahliye Sistemi Testi Kurulumu [Willis, Davis ve Hingst, 1995].

Rüzgar tüneli test bölümü alt yüzeyinde sınır tabaka doğal olarak oluşmaktadır. Sınır tabaka referans değerleri delik merkezinden 81.915 mm geride (akış geliş yönünde) hareketli pitot tüp yardımı ile ölçülmüştür. Test koşulları ile referans sınır tabaka değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Test Koşulları

Mach	2.46
P_t	172400 Pa
T_t	293 K
δ	2.63 cm
δ^*	0.717 cm
Re	$1.75 \times 10^7 / m$

Test verisi belirsizlik değerleri toplam basınç ölçümleri için 0.045 psi, sonik akış katsayısı (Q_{sonic}) için %2.4 ve Mach 2.46 hızı için basınç oranı parametresi (P_{pl}/P_t) için %1.8 olarak raporlanmıştır.

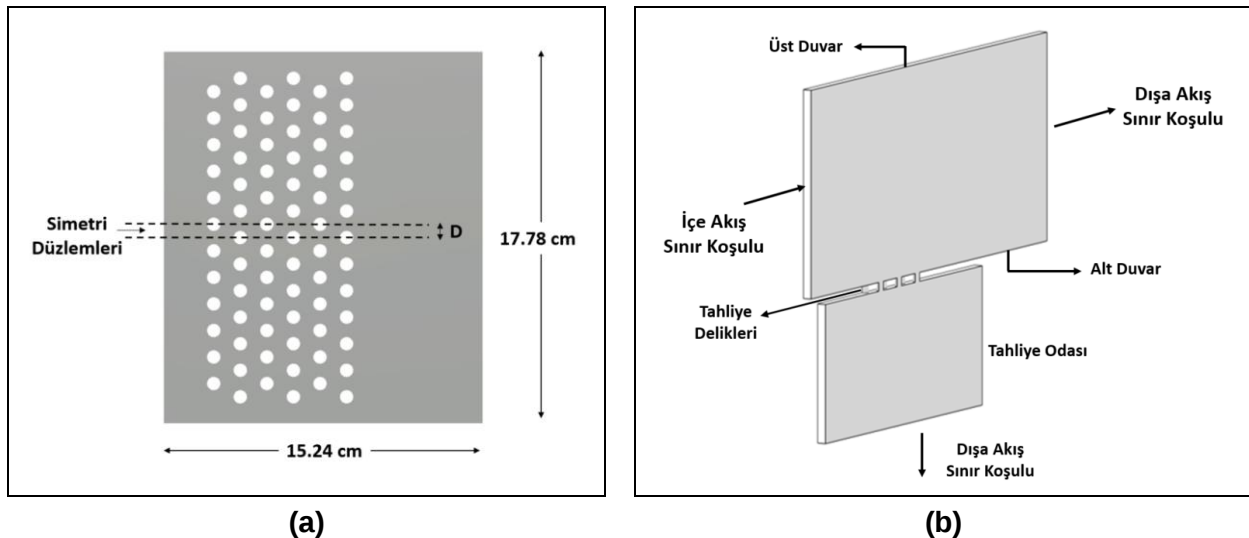
Akış Çözücüsü ve Çözüm Stratejisi

Gözenekli tahliye modeli HAD analizleri Reynolds-Average Navier-Stokes denklem çözücüsü olan ticari FLUENT yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri mükemmel gaz kabulü yapılarak zamandan bağımsız, üç boyutlu ve ağdalı akış olarak gerçekleştirilmiştir. Çözücü ayarları nokta bazlı sonlu hacimler metoduna dayalı Roe akı ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Analizler başlangıçta birinci derece ayrıklaştırma ile başlatılmış belirli bir özyinelemeden sonra ikinci dereceden ayrıklaştırmaya geçilerek sonuçlar yakınsatılmıştır.

HAD analizler için yakınsama kriteri olarak artıkların logaritmik ölçekteki değişimi on üzeri eksi beş seviyelerine ve tahliye edilen kütle debisi miktarı yüzdesel değişiminin ise son 1000 özyinelemede % 1'in altına düşmesi dikkate alınmıştır.

Katı Model, Çözüm Ağı ve Sınır Koşulları

Rüzgar tüneli test referans çizgisindeki sınır tabaka özelliklerini sağlamak amacı ile düz duvar üzerinde analizler yapılmıştır. Referans çizgi boyunca normalize edilmiş hız profili karşılaştırması Şekil 16(a)'da gösterilmektedir. Sınır tabaka özelliği uygun olan düzlem seçilerek içe sınır koşulu olarak girdi sağlanmıştır. Analizde kullanılan katı model ve tanımlanan sınır koşulları Şekil 13'te gösterilmektedir. Analiz modelinde çözüm ağı eleman sayısını azaltmak amacı ile tekrar eden delik düzeninden faydalanılarak simetri yüzeyleri belirlenmiştir. Çözüm ağına alt, delik ve tahliye odası duvarları ısı geçirmez (*ing: "adiabatic wall"*) ve kaymaz (*ing: "no-slip wall"*) yüzey sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Üst duvar delik etrafındaki akışı etkilemeyeceği varsayımı yapılarak kayar (*ing: "slip wall"*) yüzey sınır koşulu tanımlanarak ağ eleman sayısı azaltılması amaçlanmıştır.



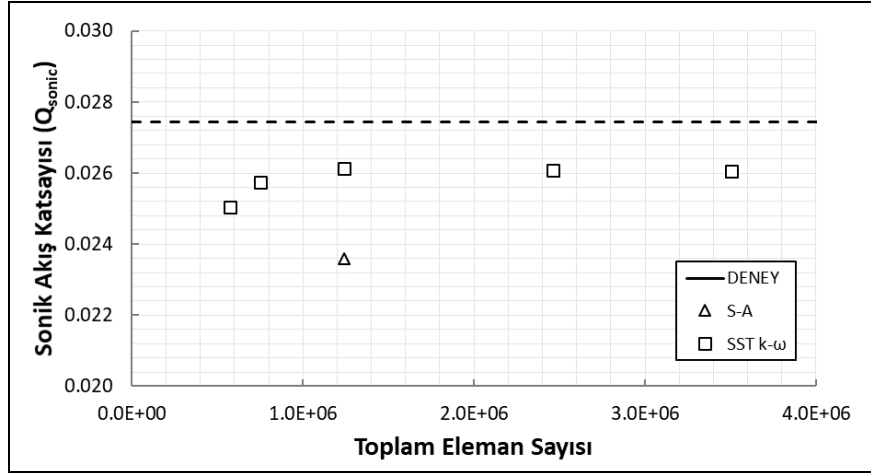
Şekil 13: Çok Gözenekli Tahliye Sistemi için (a) Simetri Düzlemleri (b) Analiz Modeli ve Sınır Koşulları

Çözüm eniyileme çalışmalarında yapısız elemanlara sahip 5 farklı yoğunluktaki çözüm ağı, ticari Gambit ve Tgrid programları ile oluşturulmuştur. Çözüm ağları için toplam eleman sayıları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: Çözüm Ağı Toplam Eleman Sayısı

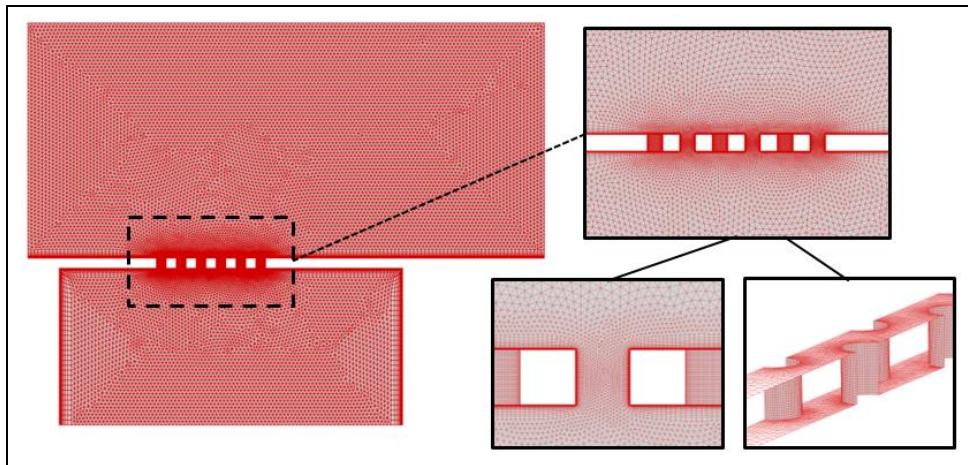
	Min. Eleman Büyüklüğü [D]	Toplam Eleman Sayısı
Çok Seyrek	0.08	0.5×10^6
Seyrek	0.06	0.75×10^6
Normal	0.04	1.2×10^6
Yoğun	0.03	2.5×10^6
Çok Yoğun	0.02	3.5×10^6

Çözüm yöntemi belirleme ve çözüm ağı eniyileme çalışmalarında basınç oranı parametresinin $P_{pl}/P_t=0.0348$ olduğu durumun analizleri değerlendirilmiştir. Çözüm yöntemi belirleme çalışmalarında normal yoğunluktaki çözüm ağı için Spalart-Allmaras (S-A), Realizable k- ϵ ve SST k- ω türbülans modelleri denenmiştir. Şekil 14'de sonik akış katsayısının eleman sayısına göre değişimi gösterilmiştir. Realizable k- ϵ modeli için yapılan analiz çalışmalarında yakınsamaya ulaşan güvenilir bir sunuca ulaşamamıştır. Bu nedenle grafikte gösterilmemiştir. Tek gözenekli tahliye sistemi analiz çalışmalarında olduğu gibi SST k- ω türbülans modeli test verilerine en yakın sonucu vermiştir.



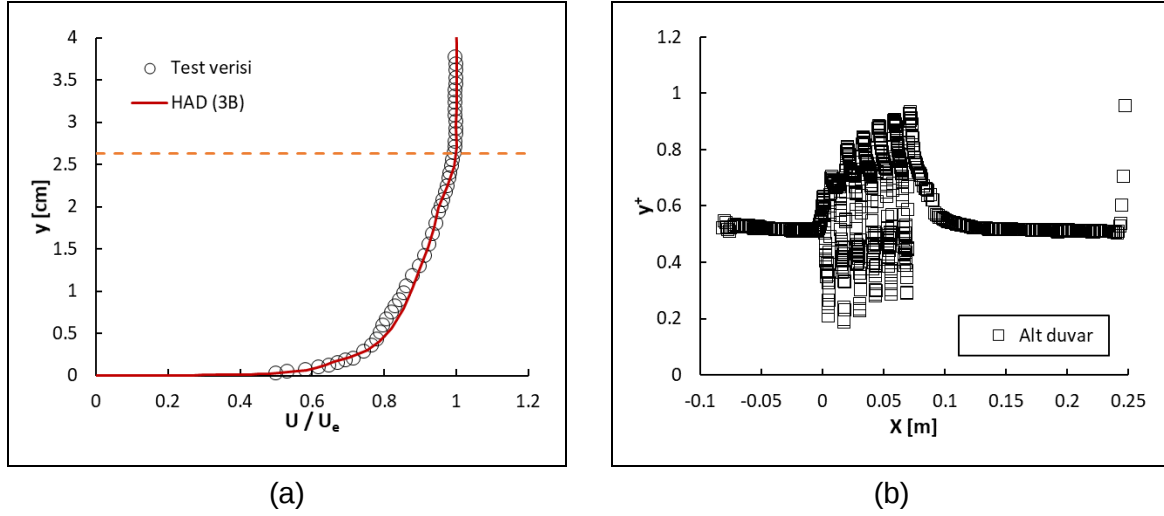
Şekil 14: Sonik Akış Katsayısının Toplam Eleman Sayısı ile Değişimi

Çözüm ağı eniyileme çalışmaları sonucunda; çok yoğun, yoğun ve normal çözüm ağı birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiği için dolaylı olarak 1.2×10^6 elemana sahip normal yoğunluktaki çözüm ağı, HAD analizlerinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Çözüm ağı minimum eleman büyüklüğü ile analiz sonuçları değerlendirildiğinde tek gözenekli tahliye sistemi analizleri ile benzer davranış görülmektedir. Seçilen normal yoğunluktaki çözüm ağı görselleri Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15: Çok Gözenekli Tahliye Sistemi Çözüm Ağı

Çözüm ağı, dikdörtgen ağ yapısında oluşturulmuş sınır tabaka ve düzgün geçişli yapısız elemanlar ile modellenmiştir. Çözüm sonucunda alt duvar boyunca $y^+ \approx 1$ değerini sağlamak için ilk yükseklik 0.007 mm olarak belirlenmiştir. Farklı yoğunluktaki çözüm ağları için aynı ilk yükseklik değeri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarındaki ilk yükseklik değeri kontrol edilerek uygunluğu doğrulanmıştır. Analiz sonucunda alt duvar boyunca elde edilen y^+ değeri Şekil 16(b)'de gösterilmektedir.

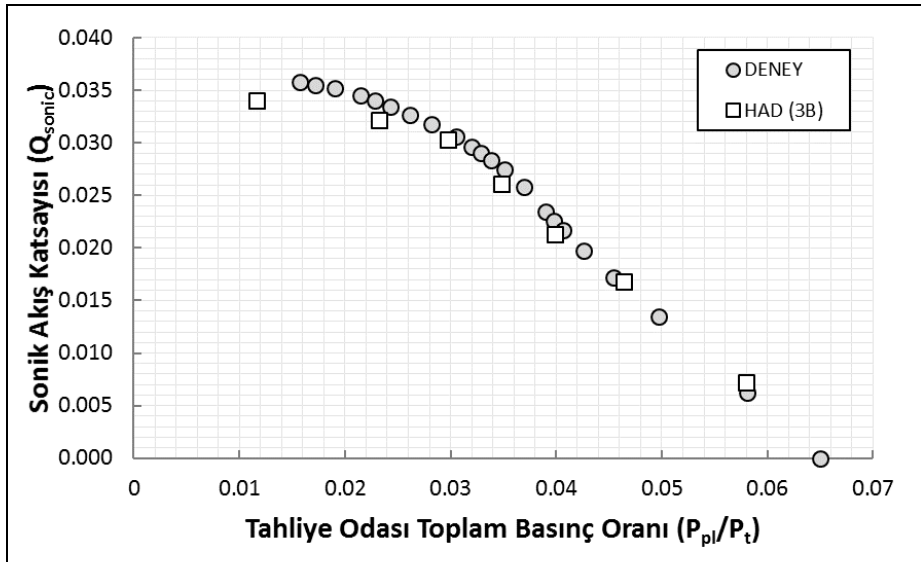


Şekil 16: (a) Referans Çizgi Boyunca Hız Profili Karşılaştırması (b) Alt Duvardaki y^+ Değeri

Analiz Sonuçları:

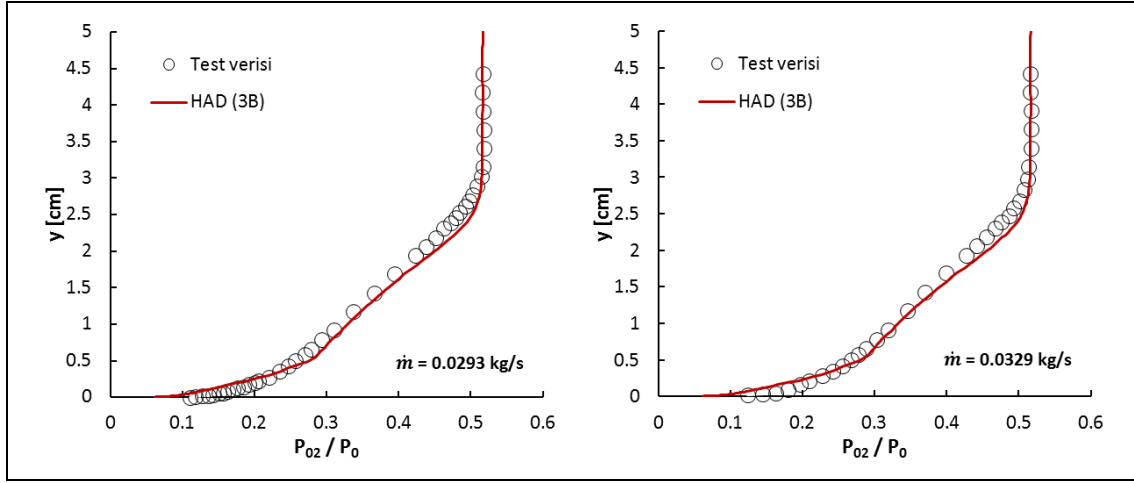
Çözüm ağı eniyileme çalışmaları verileri doğrultusunda normal yoğunluktaki yapısız çözüm ağı ile türbülans modellemesinde SST $k-\omega$ çözüm yöntemi seçilmiştir. HAD analizleri üç boyutlu, ağdalı, sıkıştırılabilir ve zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçları rüzgar tüneli test verileri ile oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir (Şekil 17). Bu nedenle çok gözenekli tahliye sistemleri tasarım ve doğrulama çalışmalarında, test verisinin mevcut olmadığı durumlarda HAD analizleri kullanılabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 17: Çok Gözenekli Tahliye Sistemi Analiz Sonuçları

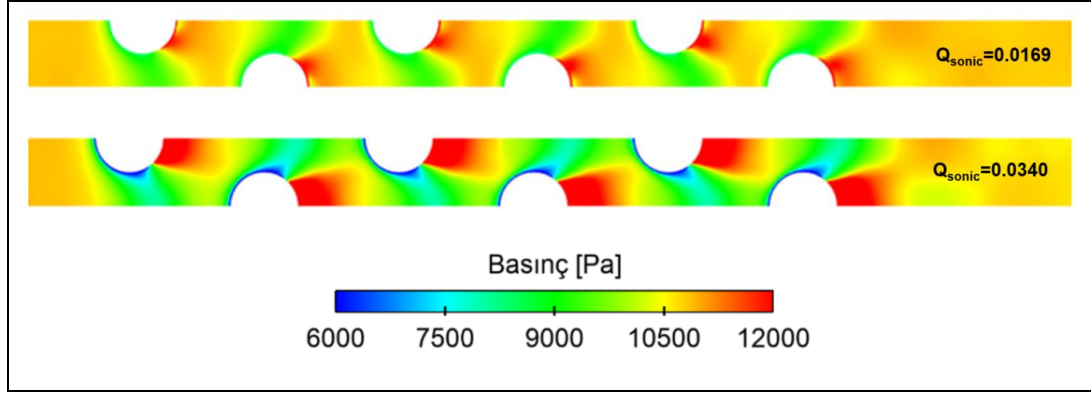
Test sırasında tahliye sistemi gerisinde farklı kütle debilerinde toplam basınç profili ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney verileri [Willis, Davis ve Hingst, 1996] ile HAD analiz sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 18'de verilmiştir. Analiz sonuçları deney verileri ile yeterli doğrulukta olduğu değerlendirilmektedir.



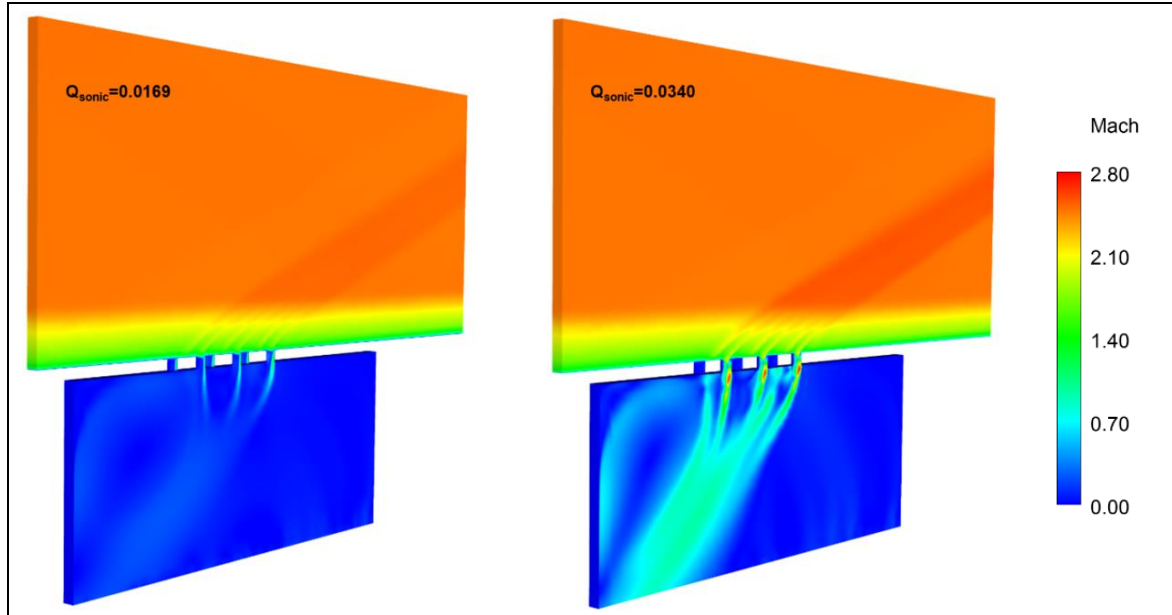
Şekil 18: Tahliye sistemi gerisinde normalize edilmiş toplam basınç profili karşılaştırması

Akış Alanı Görüntüleme:

Çok gözenekli tahliye sistemi sonik akış parametresinin $Q_{sonic}=0.0169$ ve $Q_{sonic}=0.0340$ olduğu durumlarda alt duvar üzerinde delik etrafındaki eşdeğer basınç yüzeyleri Şekil 19'da verilmektedir. Ayrıca simetri eksenine eşdeğer Mach yüzeyleri Şekil 20'de gösterilmiştir.



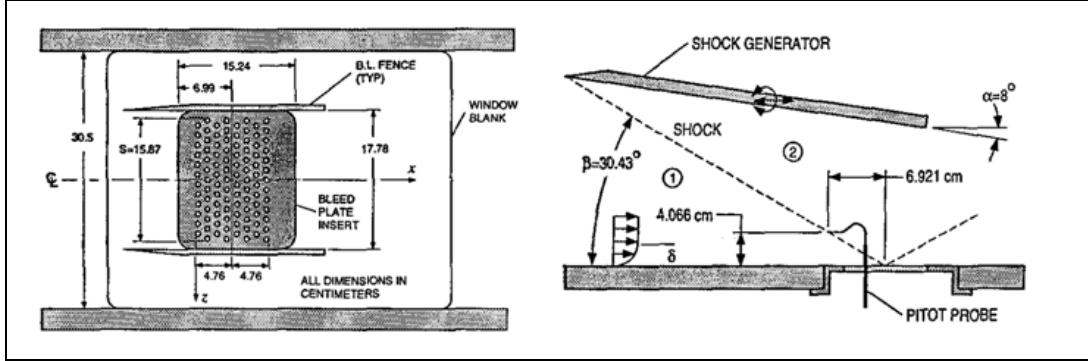
Şekil 19: Çok Gözenekli Tahliye Sistemi $Q_{sonic}=0.0169$ ve $Q_{sonic}=0.0340$ Durumu Eşdeğer Basınç Yüzeyleri



Şekil 20: Çok Gözenekli Tahliye Sistemi $Q_{sonic}=0.0169$ ve $Q_{sonic}=0.0340$ Durumu Eşdeğer Mach Yüzeyleri

ŞOK ETKİSİNDEKİ ÇOK GÖZENEKLİ TAHLİYE SİSTEMİ

NASA Lewis Araştırma Merkezi ses-üstü tüneline düz levha üzerinde çok gözenekli tahliye sistemi üzerine Mach 2.46 hızında eğik şok düşürülerek testler gerçekleştirilmiştir. Test bölümü 30x30 cm kesit boyutlarına sahip olup test kurulum görseli Şekil 21’de verilmiştir. Testler, şok dalgası/sınır tabaka etkileşiminin etkisindeki tahliye sisteminin akışı profiline etkisini inceleme amacı ile yapılmıştır. Tahliye deliklerinin çapı 6.35mm olup uzunluk-çap (L/D) oranı birdir [Willis, Davis ve Hingst, 1995].



Şekil 21: Şok Etkisindeki Çok Gözenekli Tahliye Sistemi Testi Kurulumu

Rüzgar tüneli test bölümü alt yüzeyinde sınır tabaka doğal olarak oluşmaktadır. Sınır tabaka referans değerleri delik merkezinden 81.915 mm geride (akış geliş yönünde) hareketli pitot tüp yardımı ile ölçülmüştür. Test koşulları ile referans sınır tabaka değerleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5: Test Koşulları

Mach	2.46
P_t	172400 Pa
T_t	292 K
δ	2.63 cm
δ^*	0.727 cm
Re	$1.81 \times 10^7 / m$

Test verisi belirsizlik değerleri toplam basınç ölçümleri için 0.021 psi ve sonik akış katsayısı (Q_{sonic}) için %2.2 olarak raporlanmıştır.

Akış Çözücüsü ve Çözüm Stratejisi

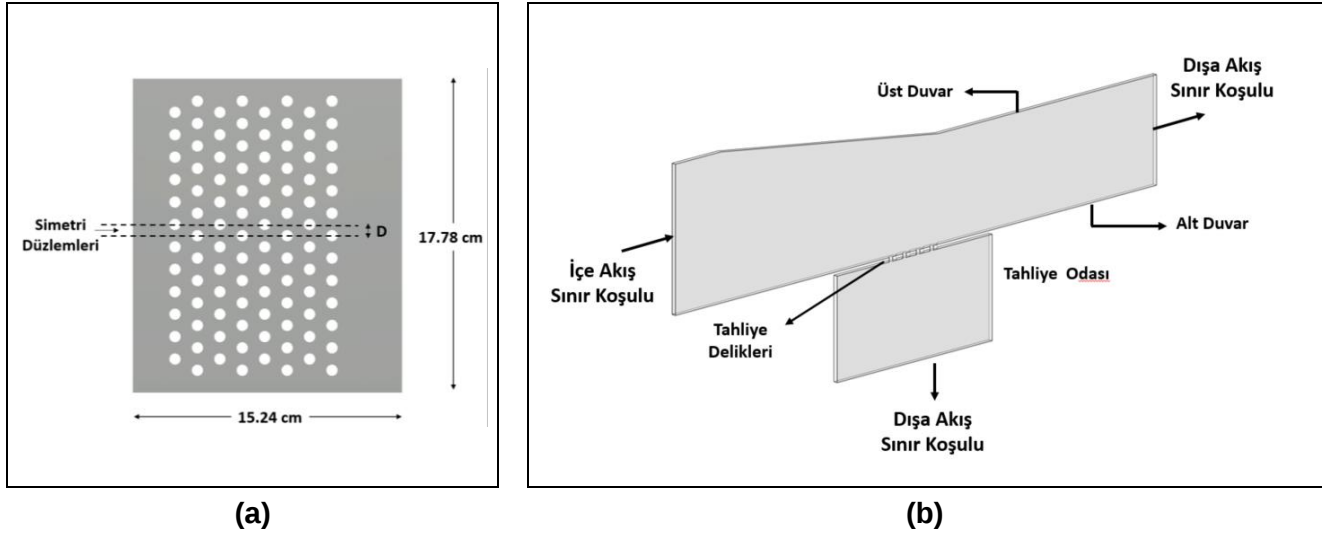
Gözenekli tahliye modeli HAD analizleri Reynolds-Average Navier-Stokes denklem çözücüsü olan ticari FLUENT yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri mükemmel gaz kabulü yapılarak zamandan bağımsız, üç boyutlu ve ağdalı akış olarak gerçekleştirilmiştir. Çözücü ayarları nokta bazlı sonlu hacimler metoduna dayalı Roe akı ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Analizler başlangıçta birinci derece ayrıklaştırma ile başlatılmış belirli bir özyinelemeden sonra ikinci dereceden ayrıklaştırmaya geçilerek sonuçlar yakınsatılmıştır.

HAD analizler için yakınsama kriteri olarak artıkların logaritmik ölçekteki değişimi on üzeri eksi beş seviyelerine ve tahliye edilen kütle debisi miktarı yüzdesel değişiminin ise son 1000 özyinelemede % 1’in altına düşmesi dikkate alınmıştır.

Katı Model, Çözüm Ağı ve Sınır Koşulları

Rüzgar tüneli test referans çizgisindeki sınır tabaka özelliklerini sağlamak amacı ile düz duvar üzerinde analizler yapılmıştır. Referans çizgi boyunca normalize edilmiş hız profili karşılaştırması Şekil 25(a)’da gösterilmektedir. Sınır tabaka özelliği uygun olan düzlem seçilerek içe sınır koşulu olarak girdi sağlanmıştır. Analizde kullanılan katı model ve tanımlanan sınır koşulları Şekil 22’de gösterilmektedir. Analiz modelinde çözüm ağı eleman sayısını azaltmak amacı ile tekrar eden delik düzeninden faydalanılarak simetri yüzeyleri belirlenmiştir. Çözüm ağına alt, delik ve tahliye odası duvarları ısı geçirmez (ing: “adiabatic wall”) ve kaymaz (ing: “no-slip wall”) yüzey sınır koşulu olarak

tanımlanmıştır. Üst duvar delik etrafındaki akışı etkilemeyeceği varsayımı yapılarak kayar (*ing: "slip wall"*) yüzey sınır koşulu tanımlanarak ağ eleman sayısı azaltılması amaçlanmıştır.



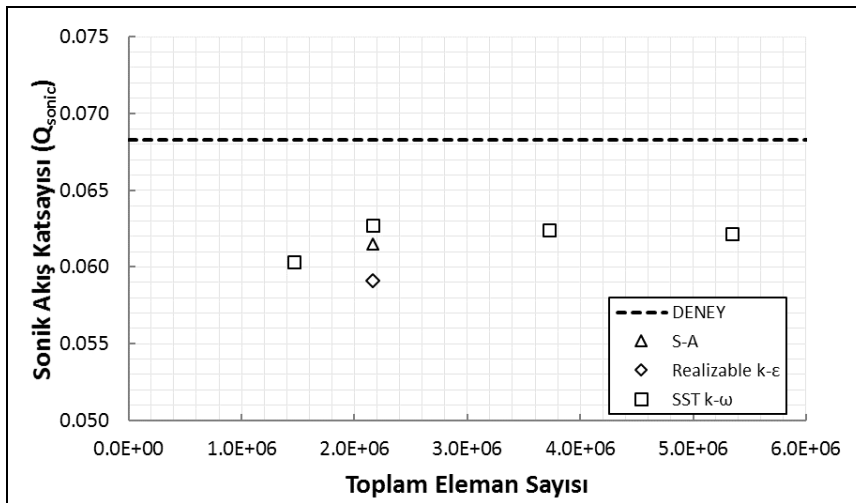
Şekil 22: Şok Etkisindeki Çok Gözenekli Tahliye Sistemi için (a) Simetri Düzlemleri (b) Analiz Modeli ve Sınır Koşulları

Çözüm eniyileme çalışmalarında yapısız elemanlara sahip 5 farklı yoğunluktaki çözüm ağı, ticari Gambit ve Tgrid programları ile oluşturulmuştur. Çözüm ağları için toplam eleman sayıları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Çözüm Ağı Toplam Eleman Sayısı

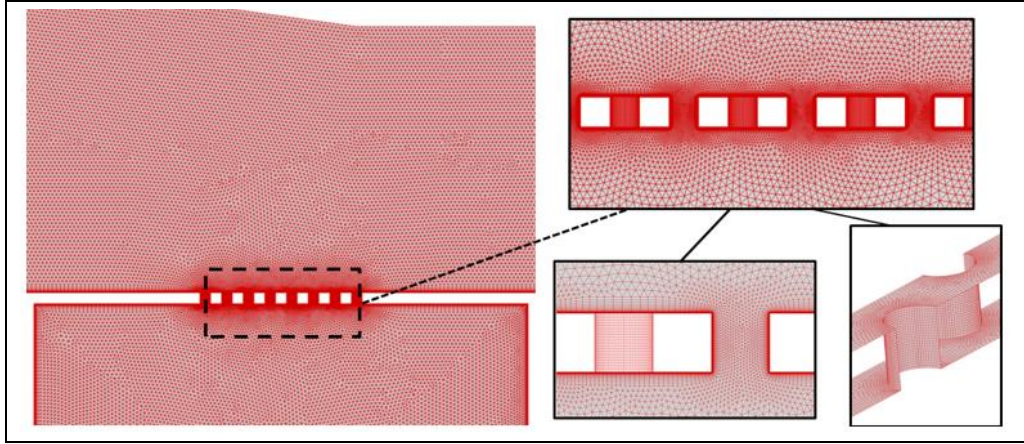
	Min. Eleman Büyüklüğü [D]	Toplam Eleman Sayısı
Seyrek	0.06	1.5×10^6
Normal	0.04	2.1×10^6
Yoğun	0.03	3.7×10^6
Çok Yoğun	0.02	5.3×10^6

Çözüm yöntemi belirleme ve çözüm ağı eniyileme çalışmalarında basınç oranı parametresinin $P_{pl}/P_t=0.0348$ olduğu durumun analizleri değerlendirilmiştir. Çözüm yöntemi belirleme çalışmalarında normal yoğunluktaki çözüm ağı için Spalart-Allmaras (S-A), Realizable k- ϵ ve SST k- ω türbülans modelleri denenmiştir. Şekil 23'te sonik akış katsayısının eleman sayısına göre değişimi gösterilmiştir. Tek ve çok gözenekli tahliye sistemi analiz çalışmalarında olduğu gibi SST k- ω türbülans modeli test verilerine en yakın sonucu vermiştir.



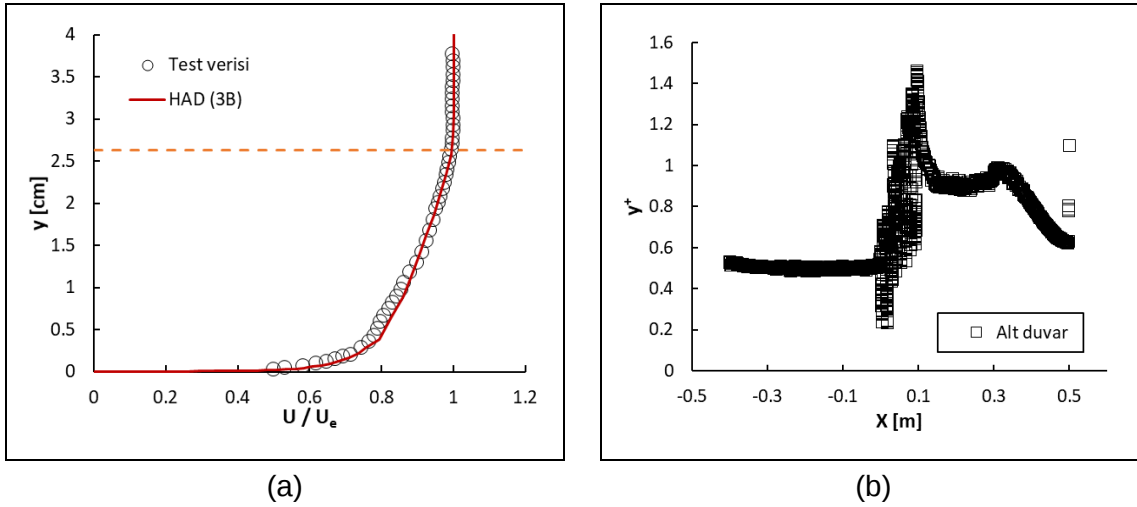
Şekil 23: Sonik Akış Katsayısının Toplam Eleman Sayısı ile Değişimi

Çözüm ağı eniyileme çalışmaları sonucunda; çok yoğun, yoğun ve normal çözüm ağı birbirlerine çok yakın sonuçlar verdiğinden dolayı 2.1×10^6 elemana sahip normal yoğunluktaki çözüm ağı, HAD analizlerinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Çözüm ağı minimum eleman büyüklüğü ile analiz sonuçları değerlendirildiğinde tek ve çok gözenekli tahliye sistemi analizleri ile benzer davranış görülmektedir. Seçilen normal yoğunluktaki çözüm ağı görselleri Şekil 24'te verilmiştir.



Şekil 24: Şok Etkisindeki Çok Gözenekli Tahliye Sistemi Çözüm Ağı

Çözüm ağı, dikdörtgen ağı yapısında oluşturulmuş sınır tabaka ve düzgün geçişli yapısız elemanlar ile modellenmiştir. Çözüm sonucunda alt duvar boyunca $y^+ \approx 1$ değerini sağlamak için ilk yükseklik 0.007 mm olarak belirlenmiştir. Farklı yoğunluktaki çözüm ağları için aynı ilk yükseklik değeri kullanılmıştır. Analiz sonuçlarındaki ilk yükseklik değeri kontrol edilerek uygunluğu doğrulanmıştır. Analiz sonucunda alt duvar boyunca elde edilen y^+ değeri Şekil 25(b)'de gösterilmektedir.

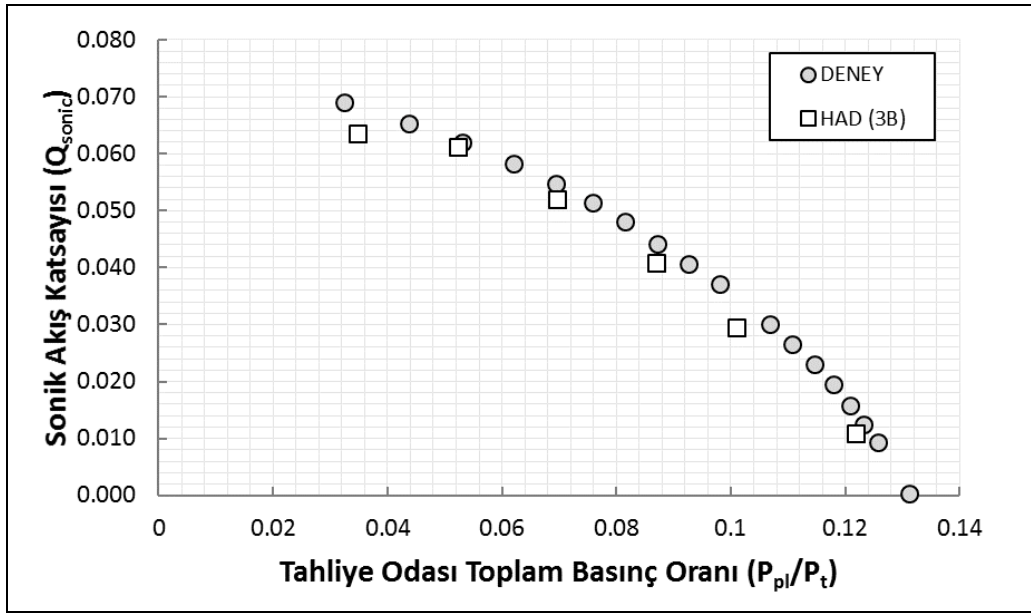


Şekil 25: (a) Referans Çizgi Boyunca Hız Profili Karşılaştırması (b) Alt Duvardaki y^+ Değeri

Analiz Sonuçları:

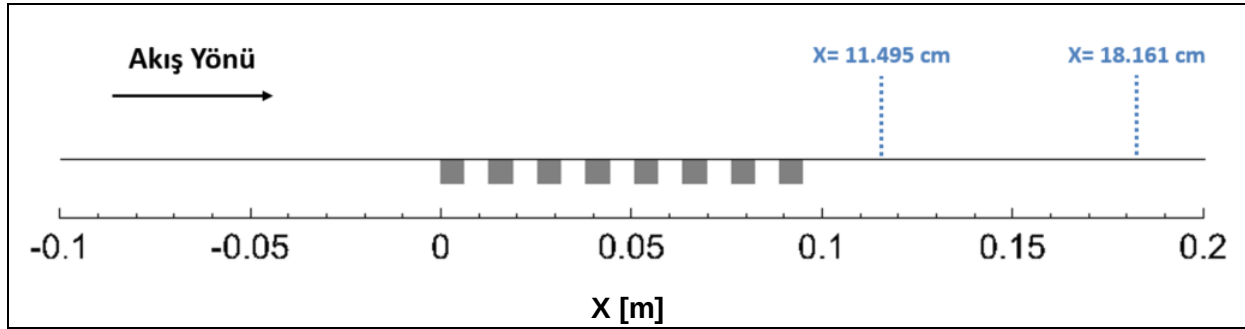
Çözüm ağı eniyileme çalışmaları verileri doğrultusunda normal yoğunluktaki yapısız çözüm ağı ile türbülans modellemesinde SST $k-\omega$ çözüm yöntemi seçilmiştir. HAD analizleri üç boyutlu, ağdalı, sıkıştırılabilir ve zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir.

Analiz sonuçları rüzgar tüneli test verileri ile oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir (Şekil 26). Bu nedenle şok etkisindeki çok gözenekli tahliye sistemleri tasarım ve doğrulama çalışmalarında, test verisinin mevcut olmadığı durumlarda HAD analizleri kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

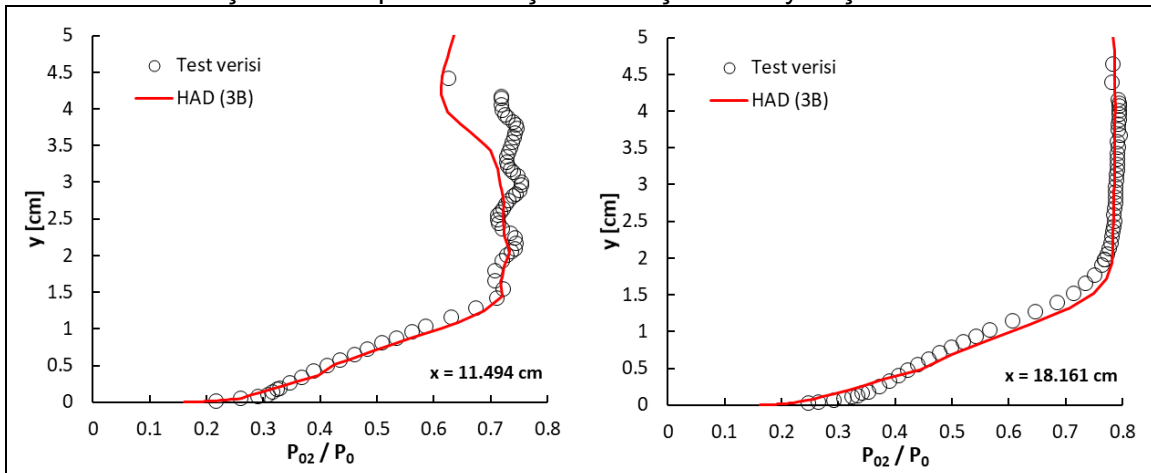


Şekil 26: Şok Etkisindeki Çok Gözenekli Tahliye Sistemi Analiz Sonuçları

Test sırasında tahliye sistemi gerisinde toplam basınç profili ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yapılan istasyonların konumları Şekil 27’de verilmiştir. Deney verileri ile HAD analiz sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 28’te verilmiştir. Analiz sonuçları deney verileri ile yeterli doğrulukta olduğu değerlendirilmektedir.



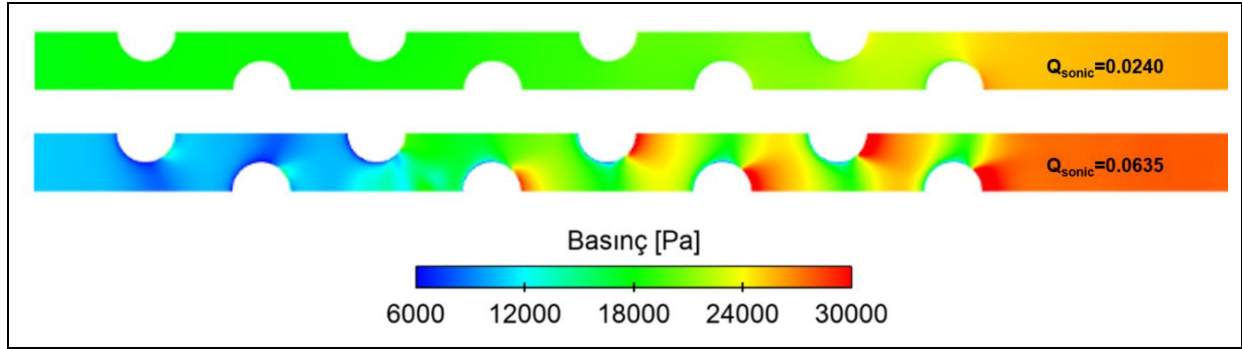
Şekil 27: Toplam Basınç Profili Ölçüm İstasyon Şeması



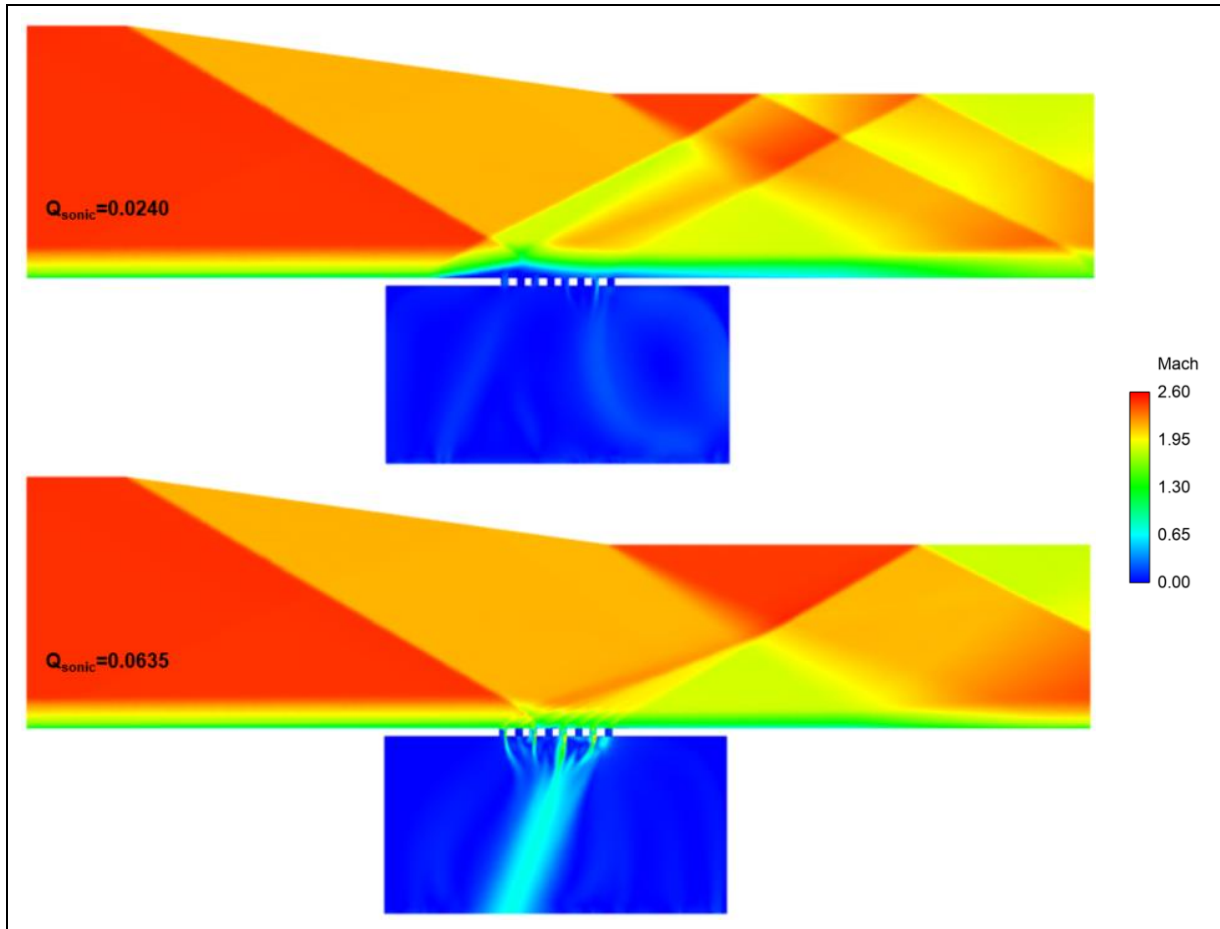
Şekil 28: “Choked” Durumu Normalize Edilmiş Toplam Basınç Profili Karşılaştırması

Akış Alanı Görüntüleme:

Şok etkisindeki çok gözenekli tahliye sistemi sonik akış parametresinin $Q_{sonic}=0.0240$ ve $Q_{sonic}=0.0635$ olduğu durumlarda alt duvar üzerinde delik etrafındaki eşdeğer basınç yüzeyleri Şekil 29’da verilmektedir. Ayrıca simetri eksenine eşdeğer Mach yüzeyleri Şekil 30’da gösterilmiştir. Eşdeğer Mach görselleri ile tahliye sisteminin sınır tabaka ayrılmasına etkisi açıkça görülmektedir.



Şekil 29: Şok Etkinde Çok Gözenekli Tahliye Sistemi $Q_{sonic}=0.0240$ ve $Q_{sonic}=0.0635$ Durumu Eşdeğer Basınç Yüzeyleri



Şekil 30: Şok Etkinde Çok Gözenekli Tahliye Sistemi $Q_{sonic}=0.0240$ ve $Q_{sonic}=0.0635$ Durumu Eşdeğer Mach Yüzeyleri

SONUÇ

Bu çalışmada, literatürde bulunan gözenekli tahliye sistemleri için HAD analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Delik çapı parametresine bağlı minimum eleman büyüklüğü ile farklı seviyelerde yapısız çözüm ağı üretilmiştir. Çözüm ağı eniyileme çalışmaları sonucunda tüm test modelleri için 0.04D büyüklüğüne sahip normal çözüm ağının delik akışı modelleme çalışmaları için uygun olduğu belirlenmiştir. Türbülans modeli seçimi çalışmaları kapsamında Spalart-Allmaras, Realizable k- ϵ ve SST k- ω türbülans modelleri kullanılmıştır. Deney verileri ile karşılaştırmalar sonucunda SST k- ω modeli tahliye sistemleri analizleri için başarıımı en yüksek türbülans modeli olarak seçilmiştir.

Farklı basınç parametresine bağlı sonik akış katsayısı karşılaştırmalarında HAD analiz sonuçlarının deney verileri ile oldukça yakın olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, tahliye delikleri arkasındaki toplam basınç profili karşılaştırmalarında HAD verilerinin deney ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma sonucunda, tahliye sistemi için yapısız çözüm ağı ile yapılan HAD analizlerinin yeterli doğruluğa sahip olduğu, tasarım ve analiz çalışmalarında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- Abrahamson, K.W. ve Brower, D.L., 1998. "An Empirical Boundary Condition for Numerical Simulation of Porous Plate Bleed Flows", AIAA-88-0306.
- Bodner, J. P., Greber, I., Davis, D. O. ve Hingst, W. R., 1996. "Experimental Investigation of the Effect of a Single Bleed Hole on a Supersonic Turbulent Boundary-Layer", AIAA-96-2797.
- Dambara, S., Yamamoto ve M. ve Honami, S., 1998. "Modeling of Boundary Condition for Turbulent Boundary Layer Bleed", AIAA-98-0926.
- Doerffer, P. P. ve Bohning, R., 2000. "Modelling of Perforated Plate Aerodynamics Performance", Tech. Rep. 8, Nov.
- Flores, A. J., Shih, T. I-P, Davis, D. O. ve Willis, B. P., 1999. "Bleed of Supersonic Boundary-Layer Flow Through Rows of Normal and Inclined Holes", AIAA-99-2112.
- Fluid Dynamics Panel Working Group 13, 1991. Air Intakes for High Speed Vehicles, AGARD-AR-270, September.
- Hamed, A. ve Li, Z., 2008. "Simulation of Bleed-Hole Rows for Supersonic Turbulent Boundary Layer Control", AIAA-2008-67.
- Hamed, A., Li, Z. ve Manavasi, S., 2009. "Flow characteristics through porous bleed in supersonic turbulent boundary layers", AIAA 2009-1260.
- Hamed, A., Manavasi, S., Shin, D, Morell, A. ve Nelson C., 2011. "Bleed Interactions in Supersonic Flow", International Journal of Flow Control 3(1):37-48.
- Mahoney, J.J., 1990. *Inlets for Supersonic Missiles*, AIAA Education Series, Washington, 1990.
- Mattingly, J. D., Heiser, W. H. ve Pratt, T. D., 2002. *Aircraft Engine Design*, 2nd ed., AIAA Education Series, Reston, Virginia.
- Mayer, D. W., ve Paynter, G. C., 1994. "Boundary Conditions for Unsteady Supersonic Inlet Analyses", AIAA J., vol. 32, no. 6, 1994, pp. 1200-1206.
- Seddon, J. ve Goldsmith E.L., 1999. *Intake Aerodynamics*, AIAA Education Series, 2nd ed., Oxford.
- Slater, J.W., 2009. "Improvements in Modeling 90-degree Bleed Holes for Supersonic Inlets", AIAA 2009-0710.
- Syberg, J. ve Hickcox, T. E., 1973. "Design of a Bleed System for a Mach 3.5 Inlet", NASA CR 2187, 1973.
- Willis, B. P., Davis, D. O. ve Hingst, W. R., 1995. "Flow Coefficient Behavior Boundary Layer Bleed Holes and Slots", AIAA-95-0031.
- Willis, B. P., Davis, D. O. ve Hingst, W. R., 1996. "Boundary Layer Development Downstream of a Bleed Mass Flow Removal Region", AIAA-96-3278.
- Willis, B. P., Davis, D. O. ve Hingst, W. R., 1995. "Flowfield Measurements in a Normal-Hole-Bled Oblique Shock-Wave and Turbulent Boundary-Layer Interaction", AIAA-95-2885.