

## HİPERSONİK AKIŞLARDA FARKLI TÜRBÜLANS MODELLERİNİN İNCELENMESİ

Engin Usta<sup>1</sup> ve Hakan Arı<sup>2</sup>  
ROKETSAN, Ankara

Mahmut Arıcan<sup>3</sup> ve Kamil Özden<sup>4</sup>  
ROKETSAN, Ankara

### ÖZET

*Hipersonik hızlarda hava platformları yüksek aerodinamik yüklere ve sıcaklıklara maruz kaldığından dolayı bu hızlarda aerodinamik katsayıların ve ısınmanın tahmini yüksek öneme sahiptir. Yüksek hızlarda uçuşlu testlerin maliyetli olması ve uçuşlu testlerde oluşan yüksek entalpi seviyesi nedeniyle rüzgar tüneli testlerinde akış benzerliğinin yakalanmasının çoğu zaman mümkün olmaması nedeniyle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinin kullanılması zorunlu olmaktadır. Hipersonik akışların çözümünde kullanılan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile elde edilen kuvvet ve aerodinamik ısınma sonuçları ise kullanılan kimyasal denklemler modeli, ablasyon (ısıl aşınma) modeli ve türbülans modeline göre değişkenlik göstermektedir. HAD analizlerinde Navier Stokes denklemlerinin türbülans akış modellemesinde gerekli fiziksel bilgileri içermesine rağmen, DNS çözümlerinin henüz günümüz bilgisayar teknolojisi ile pratikte verimli olmaması nedeniyle analizlerde kullanılamamaktadır. Zaman ve bilgisayar gücü açısından hesaplamalı analiz araçlarındaki türbülans modelleri kullanılmaktadır, ancak bu türbülans modellerinden hipersonik akışlar için en uygun çözüm belirlenmemektedir. Hipersonik akışlar için uygun türbülans modeli bulunması araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Bu çalışmada diğer faktörler (kimyasal reaksiyonlar, ısıl aşınma gibi olaylar modellenmeden) sabit tutularak farklı türbülans modellerinin etkisi belirlenen denek taşı konfigürasyonları üzerinden incelenmiştir.*

### GİRİŞ

Literatürde yapılan çalışmalarda farklı türbülans modellerinin denek taşı konfigürasyonlarda kıyaslaması yapılmıştır. Bazı çalışmalarda ise türbülans modellerine ait parametreler modifiye edilerek hipersonik akışların çözümüne özel yaklaşımlar geliştirilmeye çalışılmıştır. Farklı türbülans modelleri ile elde edilen sonuçların kıyaslanmasında kullanılan parametrelerden yüzey sürtünme katsayısı, yüzey üzerindeki basınç, ısı akısı ve aerodinamik katsayıların öne çıktığı görülmüştür.

Literatürde hipersonik hızlarda türbülans modellemesine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların birçoğunda HAD analiz aracı içerisindeki türbülans modelleri kıyaslanmış veya hali hazırda türbülans modellerinde modifikasyonlar yapılarak iyileştirme sağlanmaya çalışılmıştır. 2006 yılında yapılan bir çalışmada hipersonik akışlarda türbülans modelinin doğrulanması sırasında dikkat edilmesi gereken prensipler ve 2 boyutlu deneysel çalışmaların derlenmesine yönelik 1991 tarihli Settles ve Dodson tarafından yapılan çalışmadaki deneysel içerik ve metodolojinin detayları yeni yapılan çalışmaları da kapsayacak şekilde güncellenmiştir. Bu çalışmada hipersonik akışlardan kastın Mach sayısının 5'ten büyük olduğu durumlar olduğu

<sup>1</sup> Mühendis, ROKETSAN Roket Sanayii ve Ticaret A.Ş. , E-posta: engin.usta@roketsan.com.tr

<sup>2</sup> Mühendis, ROKETSAN Roket Sanayii ve Ticaret A.Ş. , E-posta: hakan.ari@roketsan.com.tr

<sup>3</sup> Mühendis, ROKETSAN Roket Sanayii ve Ticaret A.Ş. , E-posta: mahmut.arican@roketsan.com.tr

<sup>4</sup> Mühendis, ROKETSAN Roket Sanayii ve Ticaret A.Ş. , E-posta: kamil.ozden@roketsan.com.tr

belirtilmiş ve duvar ile sınırlı akışları içeren problemler incelenmiştir. Aynı çalışmada hipersonik akışlara yönelik HAD analizlerinde Büyük Girdap Benzeşim (LES) gibi ileri türbülans modellerinin daha az sıklıkla kullanıldığı, literatürde çoğunlukla bir veya iki denklemlilik türbülans modelleri ile çalışmaların gerçekleştirildiği belirtilmektedir. Ayrıca türbülans modellerinde duvar fonksiyonu kullanılmamasının şok-sınır tabaka etkileşimlerini modellemede yetersiz kalması nedeniyle duvar fonksiyonu kullanılan çalışmaların dikkate alınmadığı belirtilmiştir. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçişin doğal olarak gerçekleştiği ve geçiş konumunun deney sonuçlarında belirtilmiş olduğu geçmiş çalışmaların özellikle seçildiği belirtilmiştir. Son olarak, ablasyon, yüzey pürüzlülüğü, kimyasal reaksiyonlar, gerçek gazlar gibi fenomenler ile ilgili yeterince veri olmadığı için bu durumların dikkate alınmadığı da ifade edilmektedir. Bu çalışmada bir türbülans modelinin doğrulanması için geniş bir geometri aralığı ve sadece yüksek hızlarda değil farklı hız rejimlerinde test edilmesi gerektiği ayrıca belirtilmiştir. Şok/sınır tabaka etkileşimlerine yönelik farklı türbülans modelleriyle yapılan HAD analizi çalışmalarında şok nedeniyle meydana gelen akış ayrılmalarının ve etkileşim bölgesindeki ısı akısının aşırı yüksek tahmin edilmesinin en çok karşılaşılan başarısızlıklar olduğu değerlendirilmiştir. [Roy & Blottner, 2006] Son olarak hipersonik denek taşı veri bankası Marvin, Brown ve Gnoffo tarafından Roy ve Blottner tarafından güncellenmiştir.

2021 yılında yapılan çalışmada [Buck ve Mundt, 2021] özellikle türbülanslı akışlarda ısı akısı değerlerinin laminer akışlara göre kat kat yüksek olduğu belirtilmiştir ve farklı RANS türbülans modelleri küt koni (blunt cone) üzeri dış akış modeli ile kıyaslanmıştır. Son olarak türbülans modellerine sıcaklık düzeltmesi uygulanarak etkisi incelenmiştir.

2021 yılında yapılan diğer bir çalışmada LES ve DES yöntemlerinin ilgilenilen akışların çok kısıtlı bir kısmına uygulanabildiği ve bu yöntemlerin hala geliştirmeye ihtiyaç bulunduğu, Reynolds-stress modelleri için geniş bir geliştirme çalışması, yüksek bilgisayar gücü ve kalibrasyon gerektiği, 2 denklemlilik türbülans modellerinin ise bilgisayar gücü ve uygulama kolaylığı açısından hala öne çıktıkları belirtilmiştir.  $k-\epsilon$  ve Menter Baseline türbülans modelleri bir grup yaygın denek taşı konfigürasyonlarına uygulanarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. [Prasad, C., Schwartz, M., Gaitonde, D. , 2021]

Hipersonik akışlarda türbülans modellerinin kıyaslanmasına yönelik 2022 tarihli makalede doğrusal olmayan 2 denklemlilik  $k-\epsilon$  türbülans modeli ile düşük Reynolds modellerinden doğrusal Launder-Sharma  $k-\epsilon$  ve doğrusal  $k-\omega$  SST modelleri OpenFOAM çözücüsü kullanılarak test edilmiştir. Farklı mihenk taşı problemlerinde şok dalgası ve sınır tabakası etkileşimi olan hipersonik akışların çözülmesi için analizler yapılmış ve deney verileriyle karşılaştırılmıştır. Belirtilen bu üç orijinal modelin duvar basınçlarını kabul edilebilir ölçülerde tahmin ettiği görülmüştür. Doğrusal olmayan  $k-\epsilon$  modeli diğer modellere göre akış ayrılmasını daha iyi tahmin etmiştir. Fakat denenen üç model etkileşim bölgesinde duvar ısı akısını beklenenden daha yüksek tahmin etmişlerdir. Aralarından yine doğrusal olmayan  $k-\epsilon$  modeli deney verilerine en yakın sonucu vermiştir. Şok dalgası ve sınır tabakası etkileşim bölgesindeki duvar ısı akısında oluşan sapmaların önüne geçmek için türbülans modellerinde dissipasyon oranı denklemlerine yeni kaynak terim eklenmiş ve etkileşim bölgesinde türbülans uzunluğu skalasının sınırlandırılması amaçlanmıştır. Modeldeki değişiklik sıkıştırılmayan akışları etkilememekle birlikte süpersonik akışlarda da az etki göstermektedir. Süpersonik ve hipersonik rejimlerdeki çeşitli geometriler için yapılan analizler, yeni kaynak terimi eklemenin en fazla hipersonik koşullardaki  $k-\epsilon$  modellerinin termal tahminlerini önemli derecelerde etkilediğini göstermiştir. Yapılan değişikliklerle birlikte doğrusal olmayan modelle elde edilen sonuçlar orijinal haline göre iyileşmiştir. Literatürde "cubic nonlinear  $k-\epsilon$  model" olarak da geçen bu modelin, yeni kaynak terimi eklenmesiyle RANS modellerinin kullanıldığı süpersonik ve hipersonik akışlar için güvenilir, uygulanabilir ve uygun maliyetli olduğu sonucu çıkarılmıştır. [Zhang, H., Craft, T., Iacovides, H. , 2022]

Literatürdeki çalışmalardaki bulgulara göre hipersonik akışların analiz edildiği farklı problemlerde öne çıkan türbülans modelleri farklılaşmaktadır. Bu nedenle hipersonik hızlarda türbülans modeli seçimi araştırma konusu olmaya devam etmektedir.

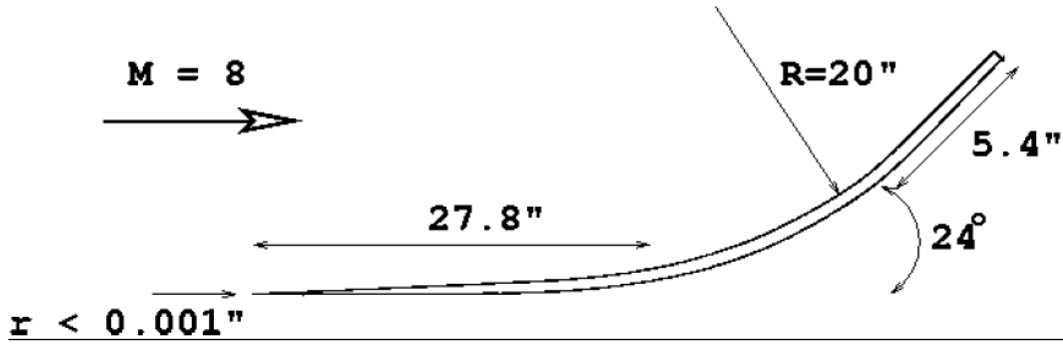
## YÖNTEM

Bu çalışmada, deney sonuçları bulunan iki boyutlu kavisli sıkıştırma köşesi, iki boyutlu yüksek açılı rampa problemi ve üç boyutlu HB-1 denek taşı akış problemi CFD++ ticari yazılımının 20.1 versiyonu kullanılarak farklı türbülans modelleri ile çözülmüştür. Denek taşı analizlerinin RANS denklemleri çözümünde üç boyutlu, ağdalı, sıkıştırılabilir, zamana bağlı olmayan, sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır. Literatürde yapılan iyileştirme çalışmalarındaki türbülans modeli modifikasyonları ticari yazılımlarda uygulanabilir olmadığından ve geniş uygulamalarda gösterilmemiş olmalarından dolayı dikkate alınmamış, CFD++ içerisindeki türbülans modelleri kıyaslanmıştır. Bu analizlerden elde edilen yüzey üzerindeki basınç, ısı akısı ve aerodinamik katsayıları uygun olan parametrelerde analiz sonuçları, deney sonuçları ile kıyaslanmıştır.

## UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

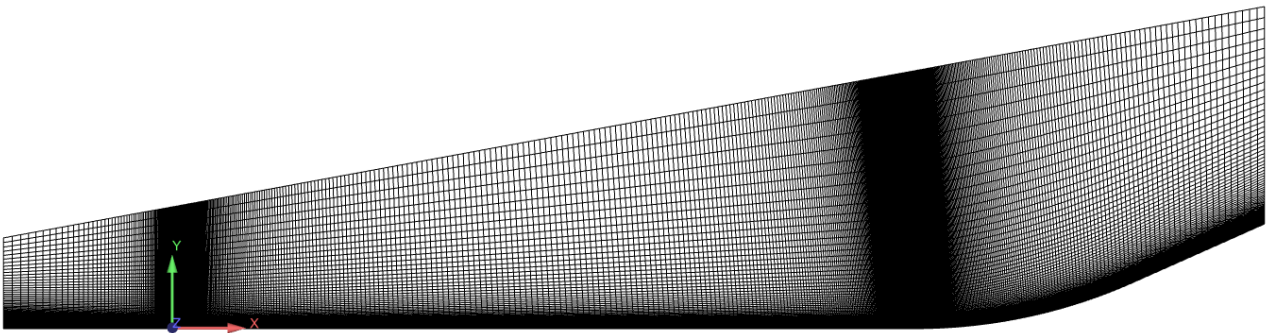
Bu bölümde, üç farklı denek taşının HAD analizleri ile çözüm detayları ve elde edilen sonuçların deney ile kıyaslaması yer almaktadır.

### İki Boyutlu Kavisli Sıkıştırma Köşesi Problemi



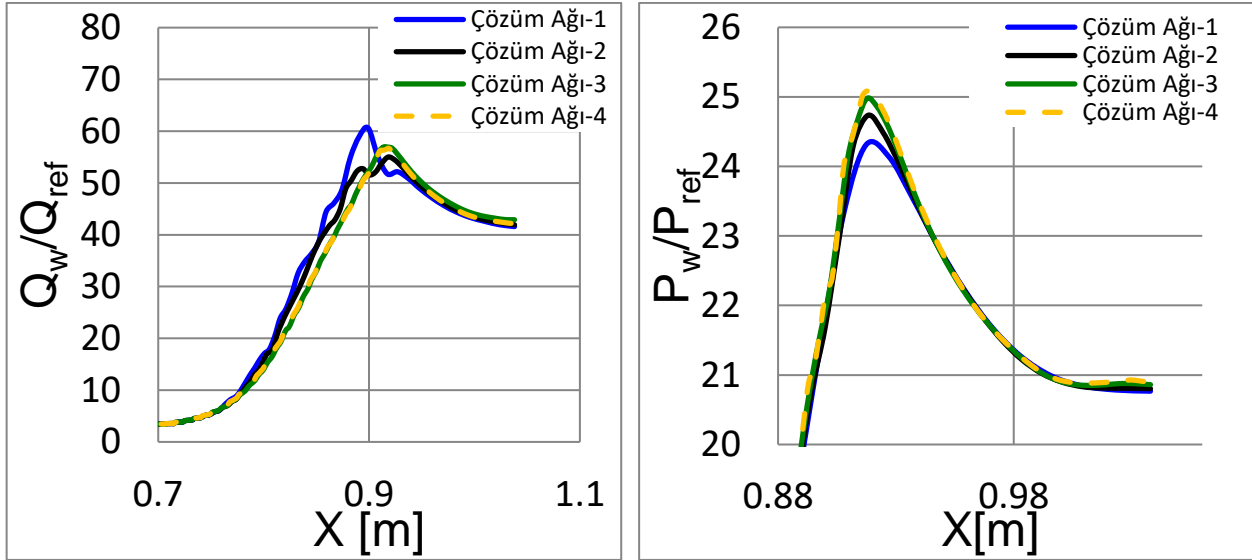
Şekil 1 Kavisli sıkıştırma köşesi denek taşı problemi (ölçekli değildir) [Goldberg, U., 2005]

Şekil 1'de kavisli sıkıştırma köşesi probleminin geometrik özellikleri verilmiştir. Kavisli rampa probleminde, sıkıştırma bölgesinde meydana gelen eğik şok, duvar üzerine aktarılan ısı miktarında ciddi anlamda artışa neden olmaktadır. [Goldberg, U., 2005]

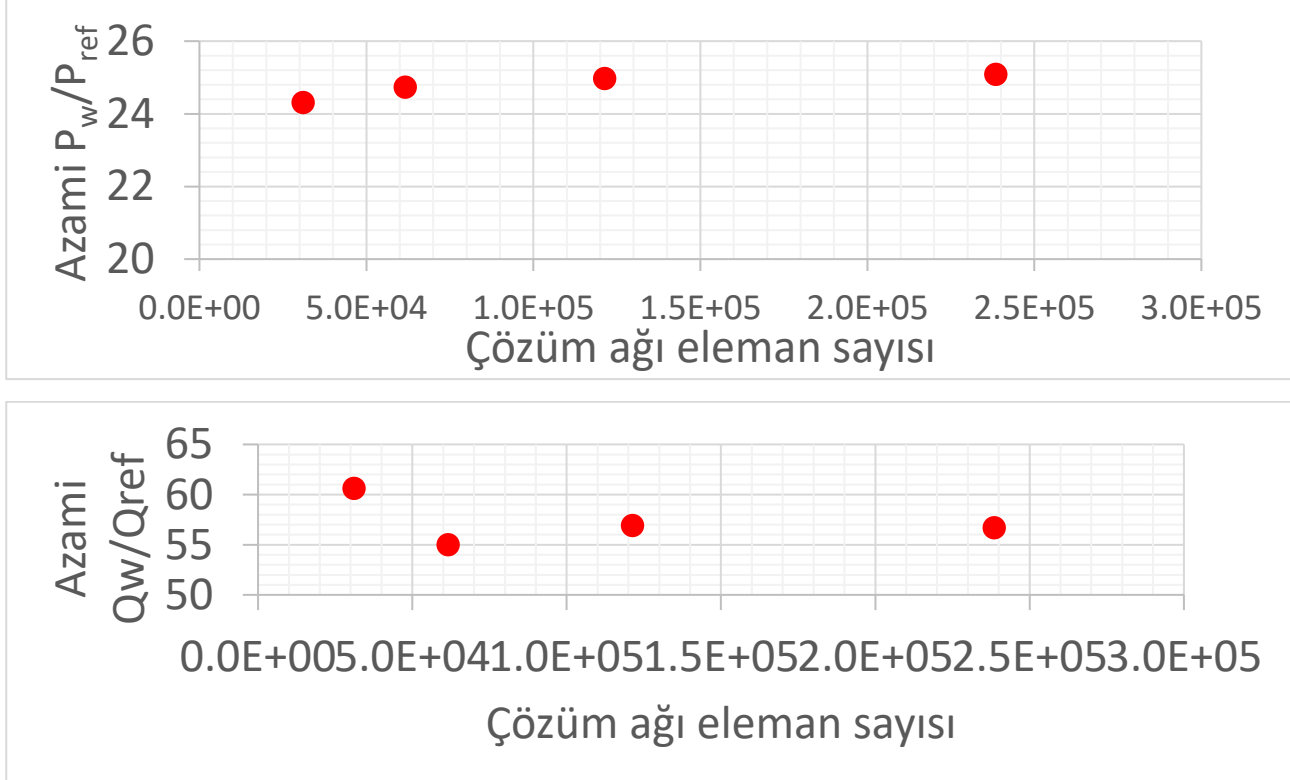


Şekil 2 Kavisli sıkıştırma köşesi iki boyutlu çözüm ağı

Çözüm Ağı Numarası	X ve Y yönündeki Düğüm Noktası Sayısı	Çözüm Ağı Eleman Sayısı
Çözüm Ağı-1	355 x 89	30976
Çözüm Ağı-2	500 x 125	61504
Çözüm Ağı-3	700 x 175	121278
Çözüm Ağı-4	980 x 250	238388



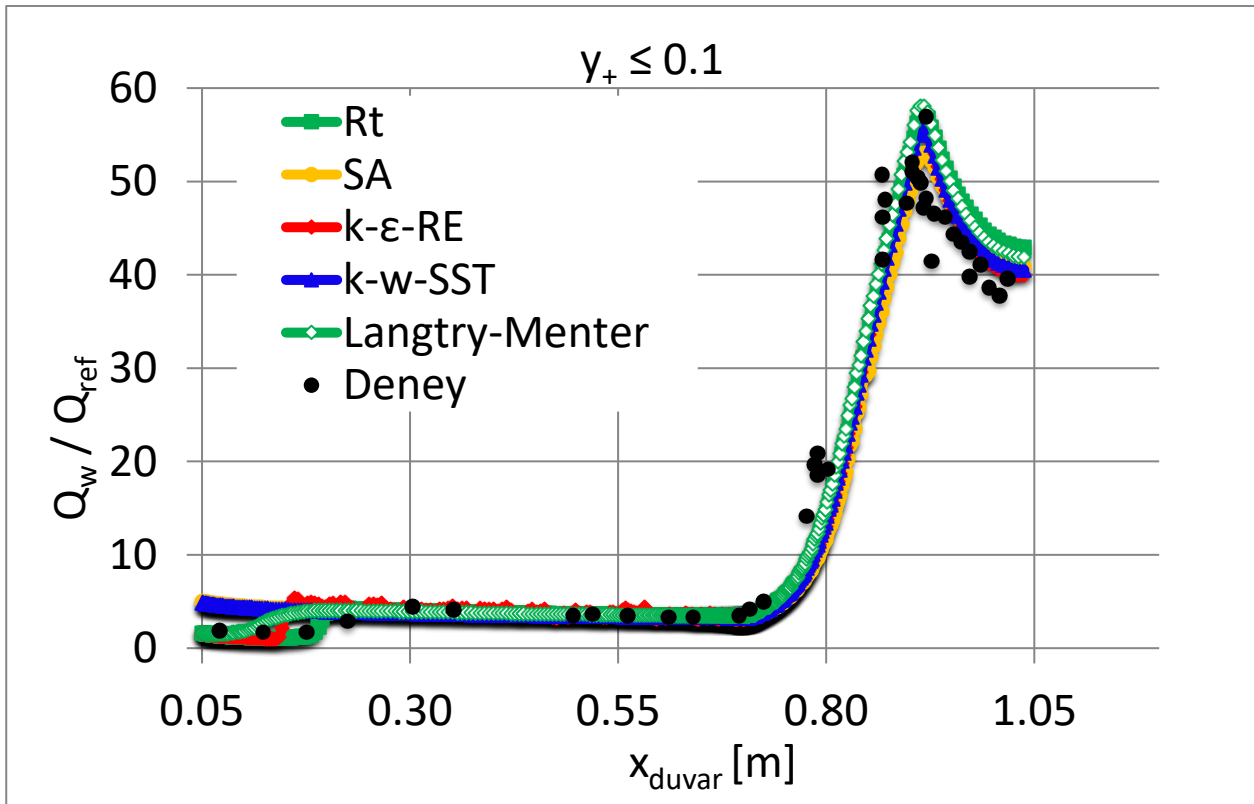
Şekil 3 Kavisli sıkıştırma köşesi problemi için duvar üzerinde x koordinatına göre farklı eleman sayılarında duvar basıncı ve ısı akısı değerlerinin değişimi



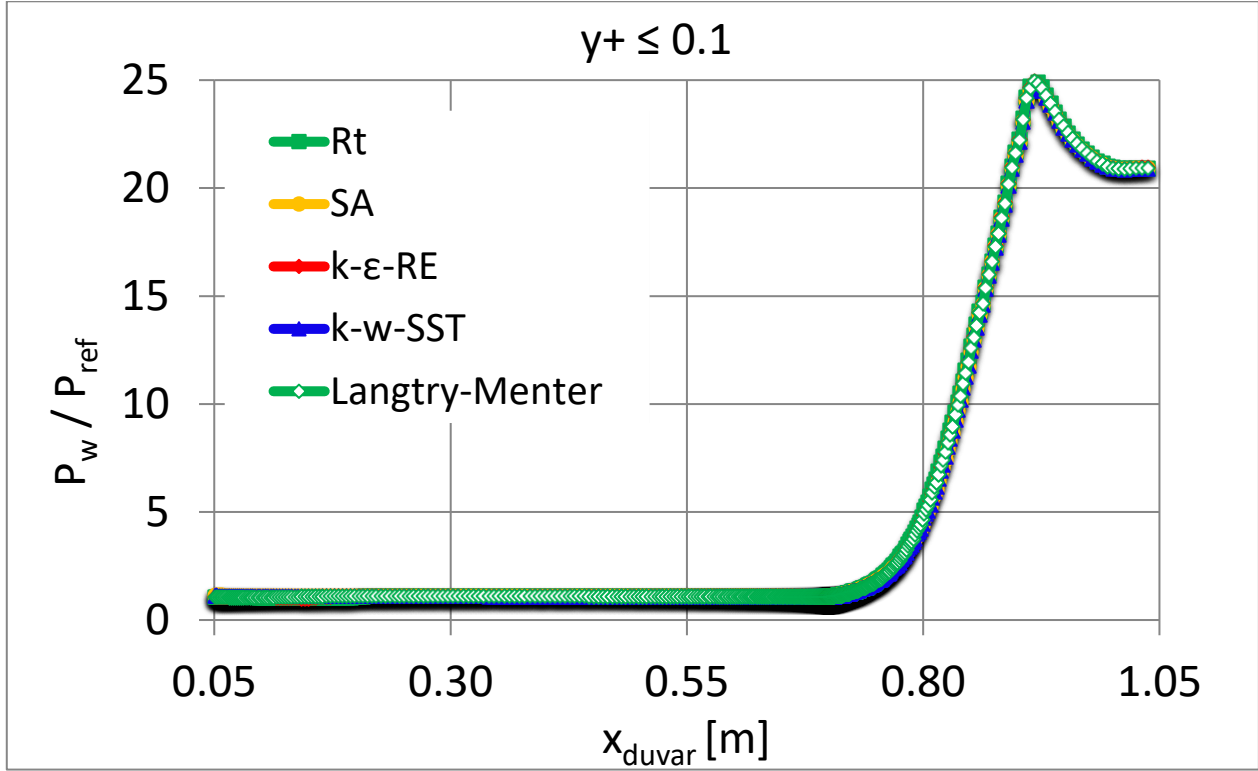
Şekil 4 Kavisli sıkıştırma köşesi problemi için çözüm ağı eleman sayısına göre azami duvar basıncı ve ısı akısı değerlerinin değişimi

Şekil 3'te yapıli dörtgen yapıda farklı çözüm ağı eleman sayılarında ısı akısı ve duvar basıncı parametrelerinin x eksenı boyunca değişimi verilmiştir. Farklı çözüm ağı eleman sayılarında alınan sonuçlar farklı eğrilerle gösterilmiştir. Şekil 4'te ise duvar boyunca oluşan azami basınç ve ısı akısı değerlerinin çözüm ağı eleman sayısı ile değişimi verilmiştir. Buradaki sonuçlara göre 120000 civarında elemana sahip çözüm ağı, ağdan bağımsız çözüm elde etmek için uygun görülmüştür.

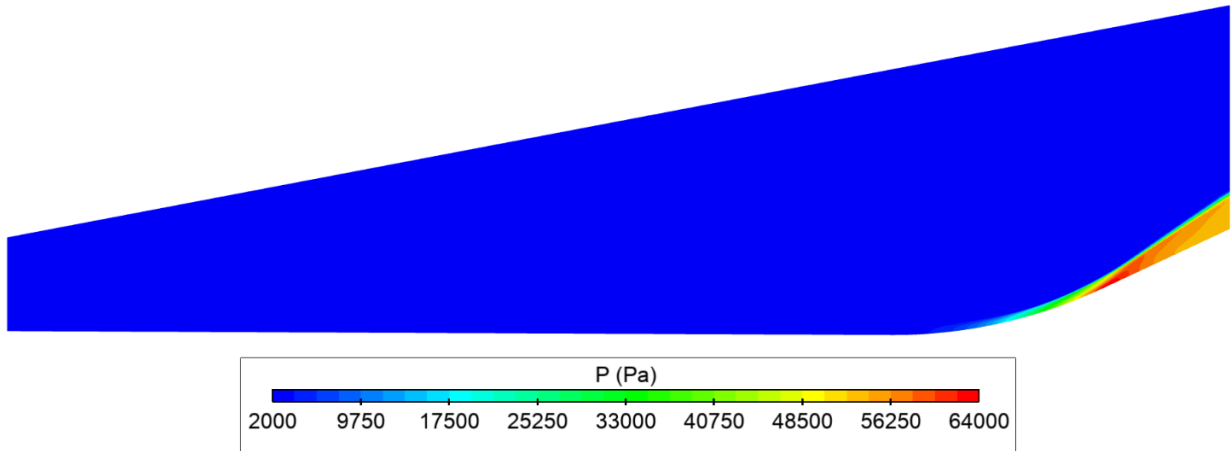
Kavisli sıkıştırma köşesi probleminde HAD analizleri için 120000 civarında elemana sahip yüzey çözüm ağı Şekil 2'de gösterilmiştir. Koordinat sisteminin sağ tarafında kalan alt çizgi boyunca olan kısımda akış alanının bitimine kadar duvar sınır koşulu tanımlanmıştır. Bu nedenle duvar sınır koşulunun başladığı koordinat sistemi civarı yoğun çözüm ağı ile modellenmiştir. Yüzey çözüm ağı için yapıli dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Sınır tabaka modellemesi için çözüm ağının ilk yükseklik değeri  $y_+$  değeri 0.1'in altında olacak şekilde belirlenmiştir. CFD++ çözücüsünde 1 denklemlı Goldberg RT, Spalart Allmaras (SA) modelleri, 2 denklemlı k- $\epsilon$  (realizable), k- $\omega$  SST modelleri ve Langtry Menter transition türbülans modeli ile çözüm elde edilmiştir. Bu çözümlerde serbest akış türbülans seviyesi 0.002, laminar/türbülanslı viskozite oranı 2 ve  $T_\infty=50.3$  K alınmıştır. Farklı türbülans modelleri Şekil 5'te ısı akısı Şekil 6'da basınç açısından kıyaslanmıştır [Goldberg, U., 2005]. Grafikteki sonuçlara göre ( $Q_{ref}= 8695.6$  W/m<sup>2</sup> ve  $P_{ref}= 2555$  Pa) ısı akısında deneye en yakın çözümler RT ve SA modelleri ile elde edilmiştir, ancak SA modeli ile laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş noktası tahmin edilememiştir. Deney sonuçlarında  $x=0.2$  civarında görülen laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş noktası HAD analizlerinde en iyi Goldberg RT türbülans modeli ile tahmin edilmiştir. Deney sonuçları bulunmayan duvar basıncı kıyaslamasında bütün türbülans modellerinde çok yakın sonuçlar elde edildiğı Şekil 6'da görülmektedir. Goldberg RT türbülans modeli ile elde edilen çözümlerden basınç ve Mach eşdeğer yüzeyleri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Kavisin bittiğı ve rampanın başladığı noktada rampa kaynaklı eğik şok basınç eş değer yüzeylerinde net bir şekilde görülebilmektedir.



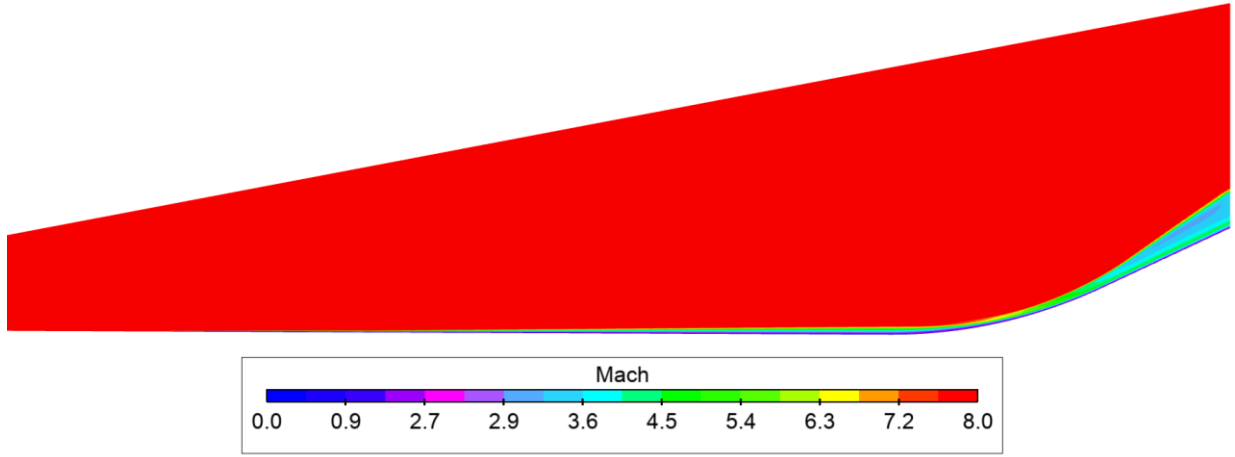
Şekil 5 Kavisli sıkıştırma köşesi için farklı türbülans modelleriyle duvar üzerindeki ısı akısı değerleri



Şekil 6 Kavisli sıkıştırma köşesi için farklı türbülans modelleriyle duvar basıncı değerleri

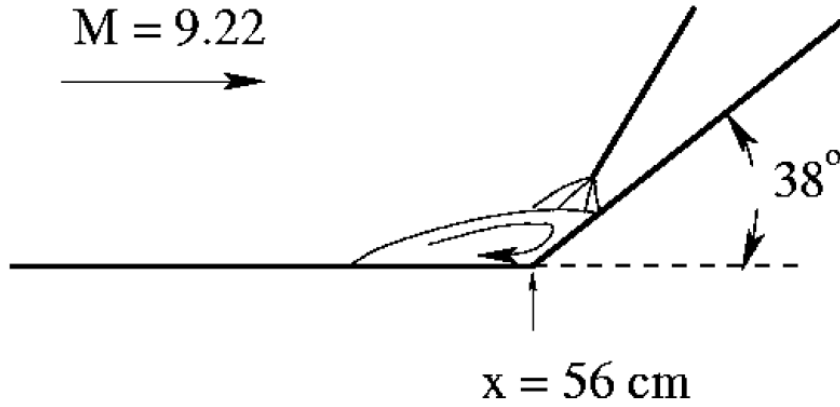


Şekil 7 Kavisli sıkıştırma köşesi denek taşı problem RT türbülans modeli eşdeğer basınç yüzeyleri



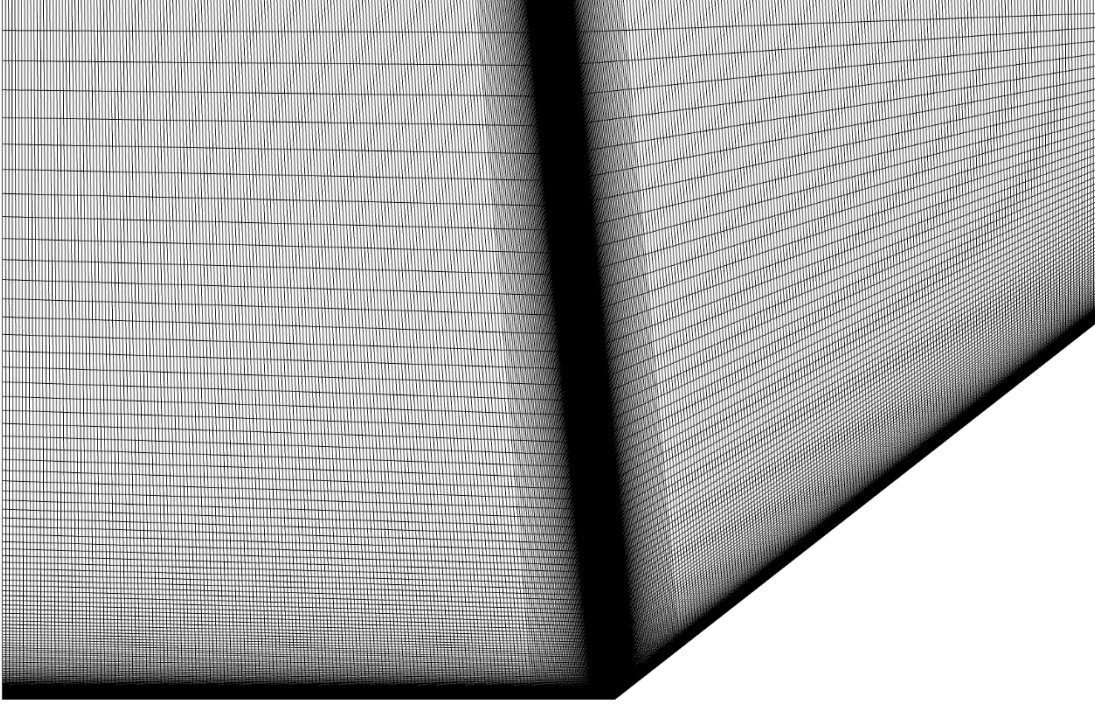
Şekil 8 Kavisli sıkıştırma köşesi denek taşı problemi RT türbülans modeli eşdeğer Mach yüzeyleri

### İki Boyutlu Yüksek Açılı Rampa Problemi



Şekil 9 İki boyutlu rampa rampa problemi ve basit akış özellikleri [Goldberg, U., 2005]

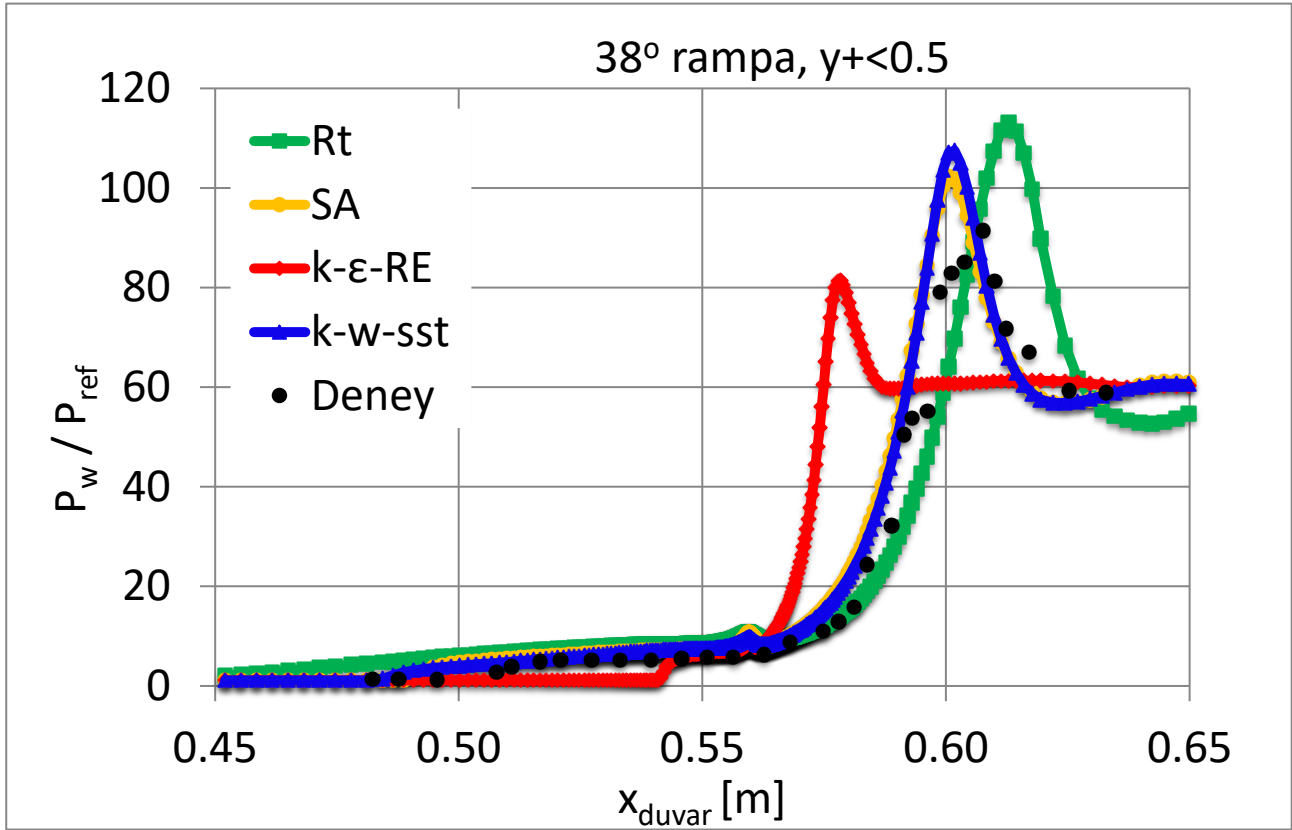
Şekil 9'da literatürde sıkıştırma köşesi olarak da bilinen iki boyutlu  $38^\circ$  açılı rampa probleminin geometrik özellikleri ile akış özellikleri verilmiştir. Rampanın köşesinden sonra devam eden sınır tabakaya eğik şokun çarpması sonucu oluşan akış ayrılması ve daha sonra eğimli rampa üzerinde akışın yeniden birleşmesi şeklinde bir durum meydana gelmektedir. Yeniden birleşme noktası durgunluk noktası gibi davranış göstermektedir ve bu noktada ısı akısı ve basınçta en yüksek tepe noktaları görülmektedir. [Goldberg, U., 2005] Sıkıştırma köşesi problemi için literatürde yapılan çalışmalarla ilgili detaylı bilgilere [Roy & Blottner, 2006] derleme çalışmasından erişilebilir.



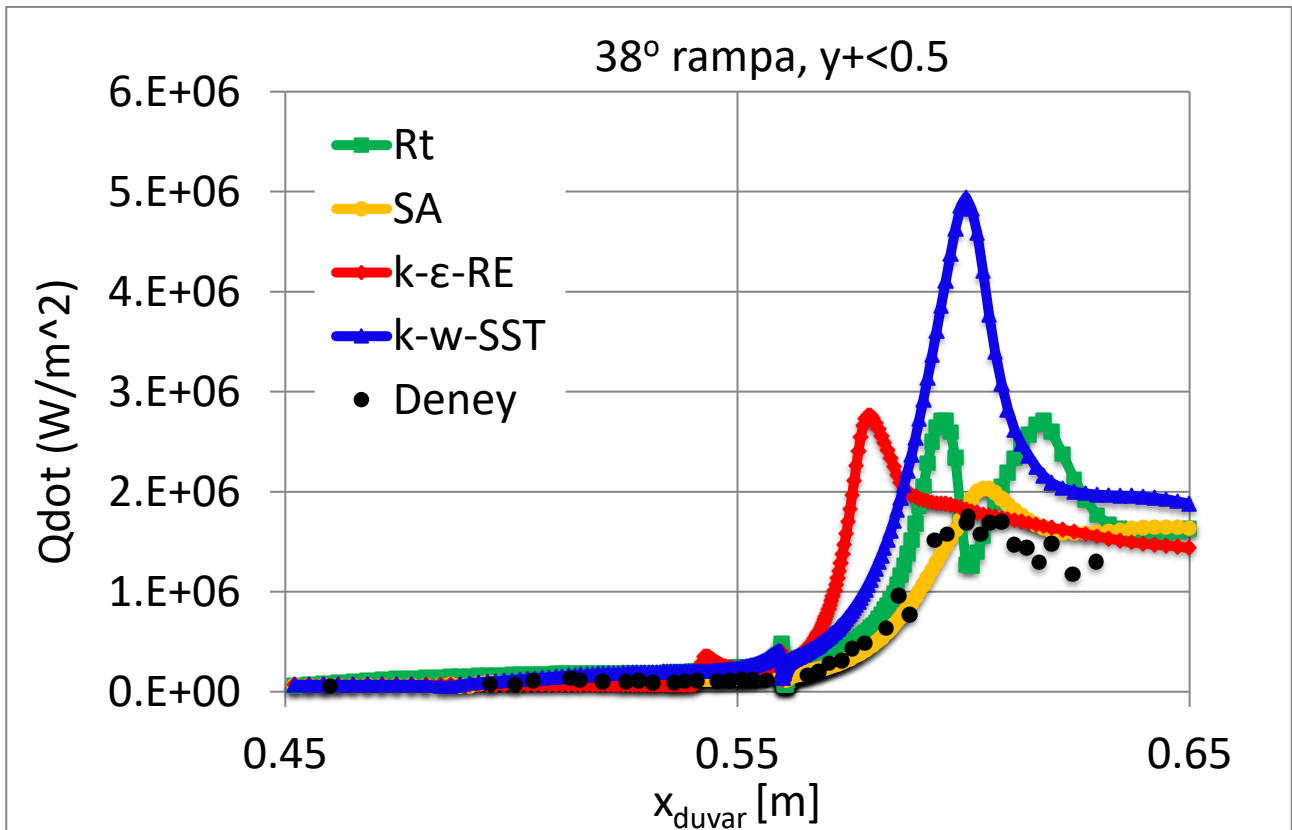
Şekil 10 İki boyutlu rampa problemi problem rampa etrafındaki çözüm ağı

İki boyutlu rampa (sıkıştırma köşesi) probleminde HAD analizleri için 150000 civarında elemana sahip yüzey çözüm ağı Şekil 10'da gösterilmiştir. Yüzey çözüm ağı için yapıli dörtgen elemanlar kullanılmıştır. Sınır tabaka modellemesi için çözüm ağının ilk yükseklik değeri farklı  $y^+$  değerleri ile yapılan ön çalışma sonrasında  $y^+ 0.5$ 'in altında olacak şekilde belirlenmiştir. 1 denklemlı Goldberg RT, Spalart Allmaras (SA) modelleri ve 2 denklemlı  $k-\epsilon$  (realizable),  $k-\omega$  SST modelleri ile çözüm elde edilmiştir. Bu çözümlerde serbest akış türbülans seviyesi 0.01, laminar/türbülanslı viskozite oranı 1.3,  $T_\infty=64.5$  K alınmıştır. Farklı türbülans modelleri Şekil 11'de ısı akısı, Şekil 12'de basınç açısından ( $P_{ref} = 2559.7$  Pa) kıyaslanmıştır [Goldberg, U., 2005]. Grafikteki sonuçlara göre ısı akısında deneye en yakın çözümler SA ve ikinci en yakın sonuçlar RT modelleri ile elde edilmiştir. Şekil 11'de türbülans modellerine göre duvar basıncı kıyaslaması verilmiştir. Bütün türbülans modellerinde basınç eğrisinin zirve noktası ve bu noktanın konumu farklılık göstermiştir. Goldberg RT türbülans modeli ile elde edilen çözümlerin basınç ve Mach eşdeğer yüzeyleri sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14'te gösterilmiştir. Akış ayrılmasının başladığı noktada görülen hücum kenarı şoku ve yeniden birleşme noktasında görülen eğik şok yapısı basınç ve Mach eşdeğer yüzeylerinde gözlemlenmektedir. Şekil 13 ve Şekil 14'te rampanın başlangıcından az ileride akış ayrılması sonlanarak akış alanı yeniden birleşmektedir. Yüksek rampa açısından kaynaklı akış ayrılması ve yeniden birleşme ile birlikte rampa üzerindeki bölgede başlayan eğik şok, şok sınır tabaka etkileşimleriyle birlikte üzere ön tarafta küt bir cisim varmış gibi davranış gösteren bir akış alanının oluşmasına sebebiyet vermiştir. Elde edilen ısı akısı değerlerinin Rt modeli için geçmişte yapılan çalışmalarda deneyle daha uyumlu çıktığı bilinmektedir. [Goldberg, U., 2001] Oluşan farklılığın geçmişte yapılan çalışmada kullanılan ancak çalışmada yer verilmeyen akış türbülans seviyesi, laminar/türbülanslı viskozite oranı gibi türbülans ayarlarından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.





Şekil 11 İki boyutlu rampa için farklı türbülans modelleriyle duvar üzerindeki ısı akısı değerleri



Şekil 12 İki boyutlu rampa için farklı türbülans modelleriyle duvar basıncı değerleri

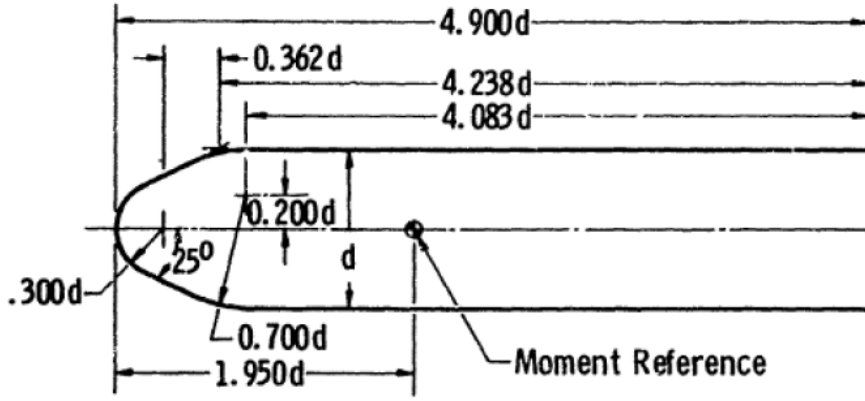


Şekil 13 İki boyutlu rampa için denek taşı problemi RT türbülans modeli eşdeğer basınç yüzeyleri



Şekil 14 İki boyutlu rampa için denek taşı problemi RT türbülans modeli eşdeğer Mach yüzeyleri

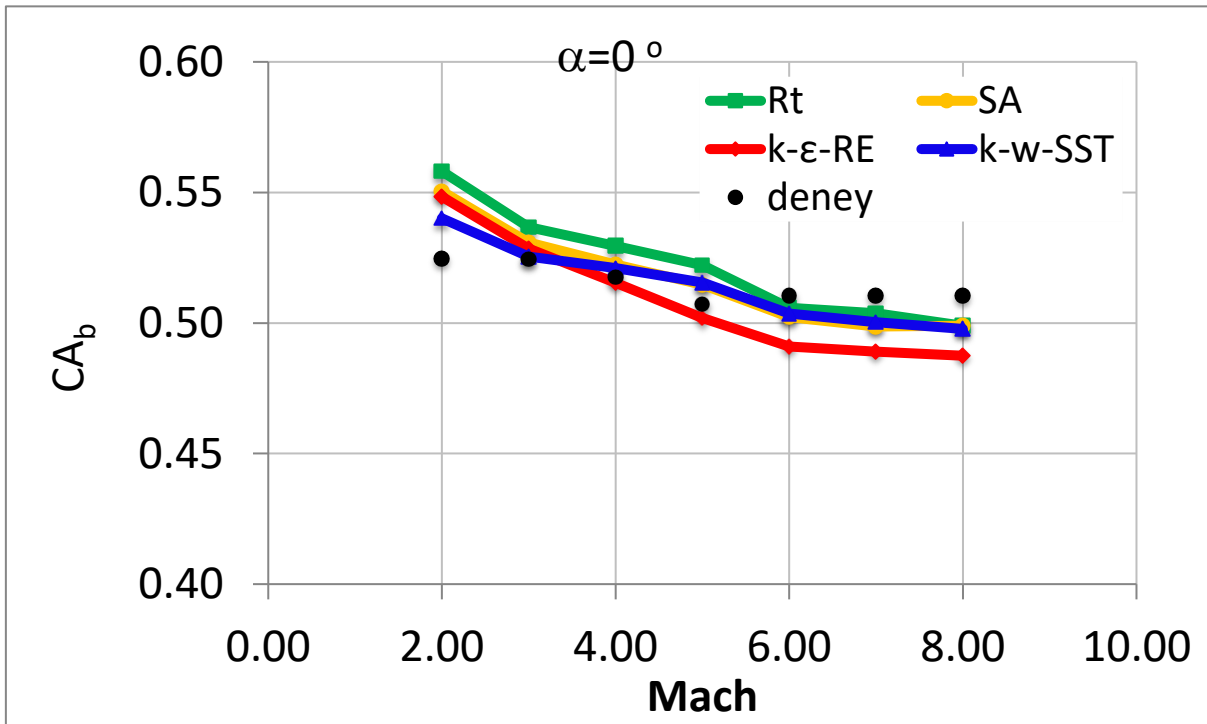
## Üç Boyutlu HB-1 Hipersonik Denek Taşı Üzerindeki Hipersonik Akış Problemi



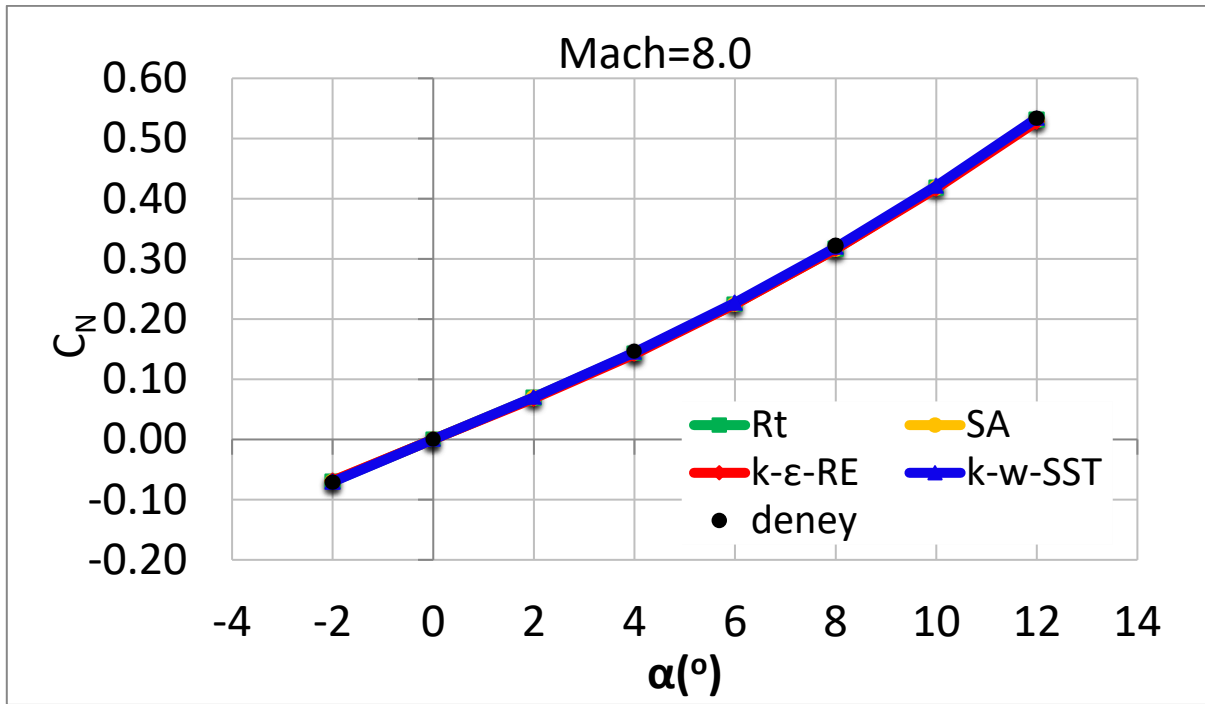
Şekil 15 HB-1 Denek Taşı Modeli [Garay, J. D., 1964]

Şekil 15'te verilen denek taşı HB-1 geometrisi için Navier-Stokes denklem çözücüsüne sahip olan CFD++ ticari yazılımı ile farklı türbülans modelleri denenerek aerodinamik katsayıların kıyaslaması yapılmıştır. Sınır tabaka modellemesi için çözüm ağının ilk yükseklik değeri  $y^+$  değeri  $0.1$ 'in altında olacak şekilde belirlenmiştir.

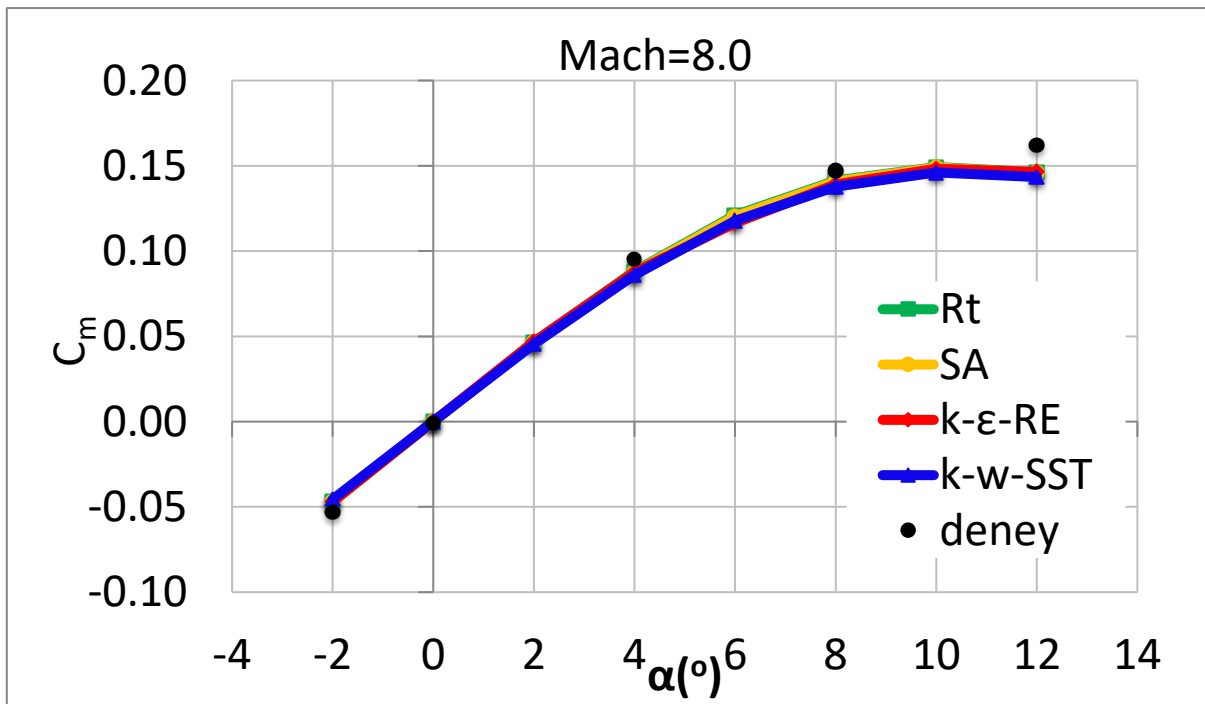
Şekil 16-Şekil 18'de HB-1 konfigürasyonu için iki farklı türbülans modelinin kıyaslaması yapılmıştır. Bu sonuçlara göre aksenal kuvvet katsayısında  $k-\omega$ -SST türbülans modeli % 2-3 mertebesinde, "realizable"  $k-\epsilon$  ise % 5'in altında deneye yakın sonuç vermiştir. Normal kuvvet katsayısı ve yunuslama momenti katsayısı için her iki modelde de birbirine çok yakın ve deney sonuçları ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.



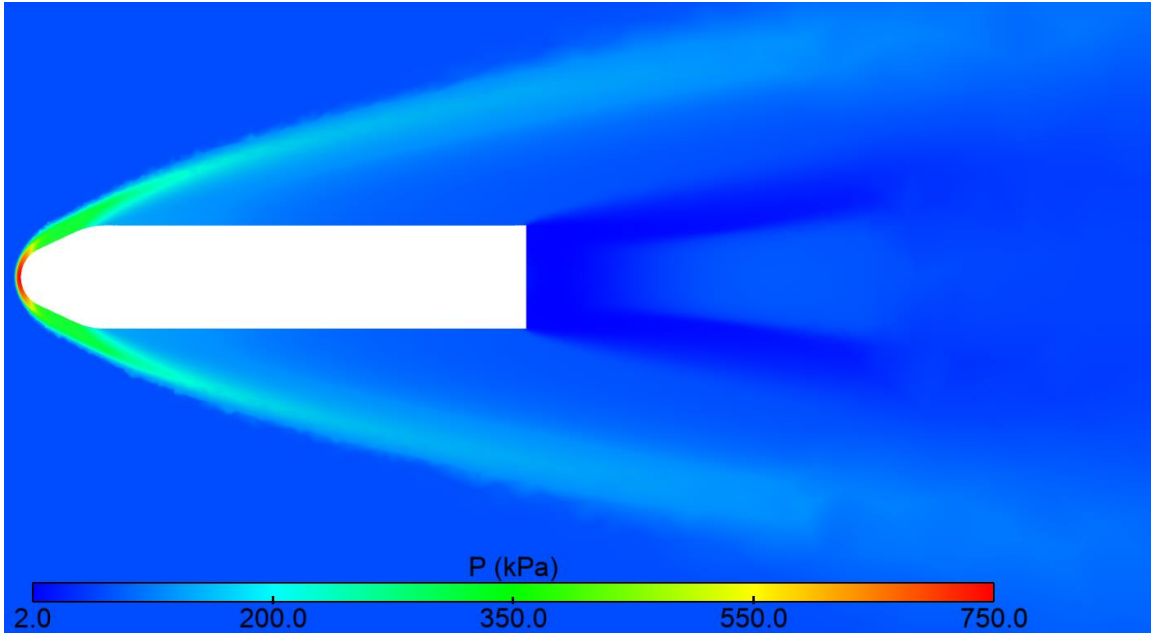
Şekil 16 HB-1 için farklı türbülans modelleriyle analizlerden elde edilen aksenal kuvvet katsayısının hücum açısı ile değişiminin deney ile kıyaslanması



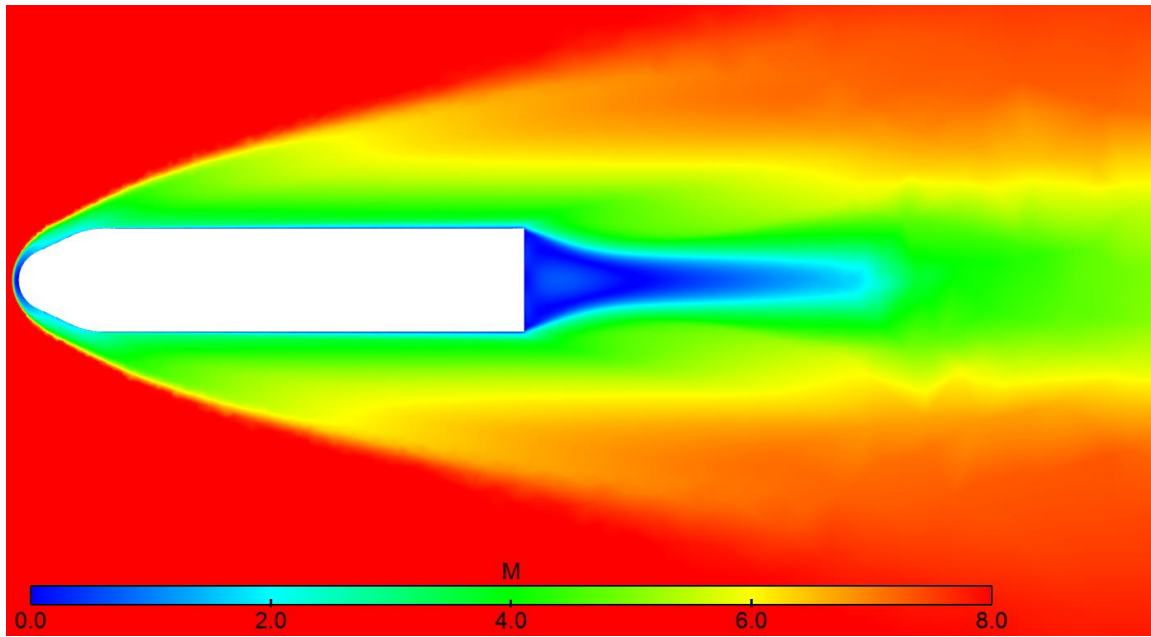
Şekil 17 HB-1 için farklı türbülans modelleriyle analizlerden elde edilen normal kuvvet katsayısının hücum açısı ile değişiminin deney ile kıyaslanması



Şekil 18 HB-1 için farklı türbülans modelleriyle analizlerden Şekil 15'teki referans noktaya göre elde edilen yunuslama momenti katsayısının hücum açısı ile değişiminin deney ile kıyaslanması



Şekil 19 HB1 problemi için  $k-\omega$ -SST türbülans modeli ile elde edilen eşdeğer basınç yüzeyleri



Şekil 20 HB1 problemi için  $k-\omega$ -SST türbülans modeli ile elde edilen Mach basınç yüzeyleri

HB-1 problemi için aksenal kuvvette en yakın sonuç veren  $k-\omega$ -SST türbülans modeli ile elde edilen basınç ve Mach eşdeğer yüzeyleri sırasıyla Şekil 19 ve Şekil 20'de görülmektedir. Ön tarafta küt burundan dolayı oluşan ayırık şok, arka kısımda düşük basınç bölgesi dikkat çekmektedir.

## SONUÇ

Isı akısı tahmininde geçmişte yapılan çalışmalara benzer şekilde Goldberg RT ve Spalart Allmaras modellerinin öne çıktığı görülmüştür [Goldberg, U., 2001]. Duvar basıncı için kavisli rampa probleminde bütün türbülans modelleri yakın sonuç vermiş, bununla birlikte yüksek açılı rampa probleminde  $k-\omega$  SST modelleri ve Spalart Allmaras modelleri ile birbirine yakın sonuçlar elde

edilmiştir. HB-1 konfigürasyonu için normal kuvvet katsayısı ve yunuslama momenti katsayılarında deneyle benzer sonuçlar elde edilmiştir.  $k-\varepsilon$  sonuçları aksenal kuvvet katsayısında  $k-\omega$ -SST'ye göre az da olsa deneyden farklı sonuç vermiştir. Aerodinamik katsayılar için  $k-\omega$  SST ve realizable  $k-\varepsilon$  türbülans modelleri ile iyi seviyede doğruluğun elde edildiği değerlendirilmektedir.

### Kaynaklar

- Buck, A. ve Mundt, C. , 2021. *On RANS Turbulence Models for High-Speed Applications*, AIAA SciTech Forum, Virtual Event
- Garay, J. D., 1964. *Summary Report On Aerodynamic Characteristics Of Standart Models HB-1 And HB-2*, Arnold Engineering Development Center
- Goldberg, U. , 2001 *Hypersonic Flow Heat Transfer Prediction Using Single Equation Turbulence Models*, Journal of Heat Transfer, Vol 123
- Goldberg, U. , 2005 *Hypersonic Turbulent Flow Predictions using CFD++*, AIAA/CIRA 13th International Space Planes and Hypersonics Systems and Technologies
- Marvin, J. G., Brown, J. L., Gnoffo, P. A., 2013 *Experimental Database with Baseline CFD Solutions: 2-D and Axisymmetric Hypersonic Shock-Wave/Turbulent-Boundary-Layer Interactions*, Ames Research Center, Moffett Field, CA
- Prasad, C., Schwartz, M., Gaitonde, D. , 2021. *Methodical Assessment of Two-equation Turbulence Models for High-Speed Flows*, AIAA AVIATION 2021 FORUM, Virtual Event
- Roy, C., Blottner, F. ,2006. *Review and Assessment of Turbulence Models for Hypersonic Flows: 2D/Axisymmetric Cases*, AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada
- Settles, G., 1991, *Hypersonic shock/boundary-layer interaction database*, NASA Contractor Report, Ames Research Center
- Zhang, H., Craft, T., Iacovides, H. , 2022. *Application of Linear and Nonlinear Two-Equation Turbulence Models in Hypersonic Flows*, AIAA JOURNAL