

TERS RAMPA ÜZERİNDE GENİŞLEYEN AKIŞ YAPISININ ANALİZİ

Duygu ERDEM¹
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

Altan YÜCEL²
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ÖZET

Geriye doğru genişleyen sabit yarıçaplı bir rampa üzerinde gelişen türbülanslı sınır tabaka ve ayrılmış akış bölgesi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla incelenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Rampa önünde serbest akım hızı 10 m/s, rampa yükseklik oranı (H/L) 0.3 olarak seçilmiştir. Spalart Allmaras, K-omega, Standart K-epsilon ve RNG K-epsilon RANS modelleriyle elde edilen sonuçlar deneysel hız profilleri ile karşılaştırılmıştır. y^+3 , y^+15 , y^+30 olmak üzere 3 farklı ağ yapısında yapılan karşılaştırmada türbülans modeli seçiminin ağ yapısına bağlı olduğu görülmüştür.

GİRİŞ

Akım ayrılması pek çok uygulamada, aerodinamik taşıma kuvvetinde düşüş, sürüklemeye artış ya da titreşim gibi istenmeyen sonuçları da beraberinde getirir. Negatif basınç gradyanı etkisindeki sınır tabakanın davranışı birçok mühendislik uygulamasında kritik öneme sahiptir. Kanat profilleri ya da türbin pallerinde ve genişleyen kanallardaki akışlarda görülen akım ayrılması bu mühendislik problemlerine örnek olarak verilebilir. Akım ayrılmasının mekanizması sınır tabakanın laminar ya da türbülanslı olmamasına bağlı olarak değişmektedir.

Laminer sınır tabaka ters basınç gradyanı altındayken doğrudan yüzeyden ayrılabilirdiği gibi tekrar yüzeye yapışarak da devam edebilir. Yapışma sonrası sınır tabaka artık türbülanslıdır. Şekil 1'de ise bu mekanizma sırasında oluşan karakteristik hız profilleri görülmektedir.[Tani] ayrılma bölgesinin uzunluğunun ters basınç gradyanının artmasıyla azaldığını gözlemlemiştir [Zhang] yapmış olduğu çalışmada ayrılma bölgesini kısa ve uzun olarak sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırmaya göre ana akımda ufak değişikliklere yol açan ayrılma bölgeleri kısa büyük değişikliklere yol açan ayrıma bölgeleri ise uzun olarak ayrılma bölgesini oluşturur. Daha önceleri [Gaster] ise bunu viskoz olmayan akışlar için şu şekilde tanımlamıştır.

$$P_{avg} = \frac{\theta_{sep}^2}{\nu} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right)_{avg}$$

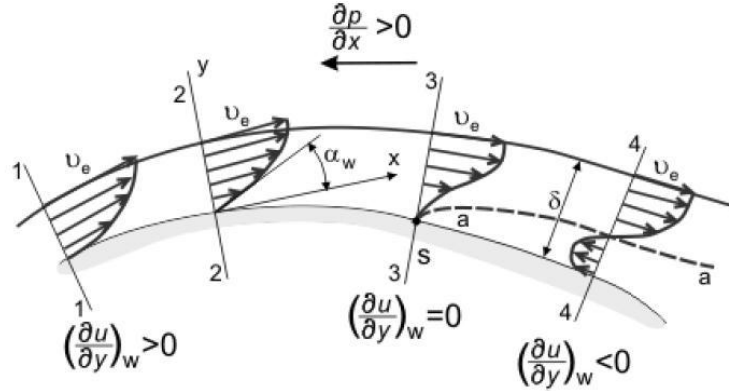
θ_{sep} momentum kalınlığına bağlı Re sayısı u_i serbest akım hızıdır. Bu denklem daha sonraları yeniden yapışma durumu gözlenen laminar akışlar için şu şekilde düzenlendi.

$$m = \frac{\theta_{sep}^2}{\nu} \left(\frac{\partial u_e}{\partial x} \right)_{sep}$$

¹ Yard Doç Dr, Uçak Müh. Böl., E-posta: erdem@itu.edu.tr

² Öğrenci, E-posta: altanyucel@itu.edu.tr

u_e sınır tabaka kenarındaki hızdır. [Curle ve Skan] çalışmalarında $-0.171 < m < -0.068$ ifadesini geliştirdi.



Şekil 1: Akım Ayrılmasında Hız Profiline Değişimi [Zhang]

[Horton] ise daha sonraları sıkıştırılamaz akışlarda laminar ayrılmayı 2 ve 3 boyutlu olarak incelemiştir.

Türbülanslı sınır tabakalarında ise sınır tabaka viskoz, tampon ve logaritmik olmak üzere 3 alt sınır tabakadan oluşur. Tüm türbülanslı sınır tabakalarda görülen bu alt sınır tabakaların kalınlıkları Re sayısına bağlı olarak değişir. Bu alt sınır tabakaların tanımları boyutsuz olarak tanımlanan u^+ ve y^+ değerlerine göre tanımlanır.

$$u^+ = \frac{1}{\sqrt{\tau_w / \rho}} \bar{u}$$

$$y^+ = \frac{\sqrt{\tau_w / \rho}}{\nu} y$$

- $0 < y^+ < 5$ arası alt sınır tabaka olup u^+ değerinin y^+ değeriyle doğrusal olarak değiştiği bölgedir. $u^+ = y^+$
- $5 < y^+ < 30-50$ tampon alt sınır tabakadır.
- $30-50 < y^+ < 0.2\delta - 0.3\delta$ logaritmik alt sınır tabaka

Deneyssel çalışmalarla logaritmik alt sınır tabaka aşağıdaki ifade geliştirilmiştir.

$$u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5$$

[Simpson] yaptığı çalışmada türbülanslı sınır tabakanın ayrılmasını 2 ve 3 boyutlu olarak incelemiştir. Yaptığı deneyssel çalışmada 3 boyutlu türbülanslı sınır tabakada oluşan yapıların anizotropik olduğunu, akışı izotropik olduğunu kabul eden türbülans modellerinin kayma gerilmesini doğru tespit edemediği sonucuna varmıştır.

[Monty, Harun ve Marusic] yaptıkları çalışmada basınç gradyanı etkisindeki türbülanslı sınır tabaka üzerinde basınç gradyanı parametresi, Re sayısı ve ivmelenme parametrelerinin etkilerini deneyssel olarak incelemiştir. [Samuel ve Joubert], [Nagano] yaptıkları çalışmalarda girdap güçlerinin basınç gradyanıyla arttığını göstermişlerdir. [Marusic ve Perry] kayma hızıyla ölçeklendirildiğinde girdap alt sınır tabakada türbülans yoğunluğunun basınç gradyanıyla arttığını gözlemlemişlerdir.

[Bernard, Foucaut, Dupont ve M. Stanislas] ise bir kanat profili üzerinde gelişen sınır tabakayı rüzgar tüneline incelemek amacıyla tünel duvarına adapte edilen tümsek modeli ile kanat üzerindeki basınç dağılımını simüle etmişlerdir. Akışı sıcak tel anemometresi kullanarak incelemiş ve sonuçlarını Navier-Stokes çözümleri ile karşılaştırmışlardır.

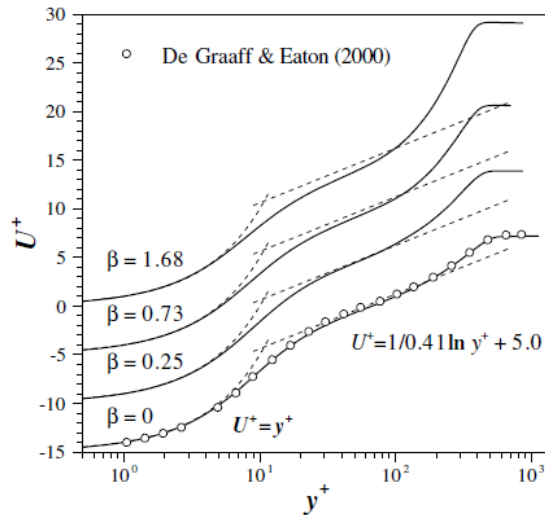
Basınç gradyanı etkisindeki sınır tabakadaki büyük ölçekli türbülanslı yapılar [Lee ve Sung] tarafından DNS yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

[Nagano], [Spalart ve Watmuff] yaptığı çalışmalarla basınç gradyanlı akışlarda logaritmik bölgenin standart logaritmik bölgenin altına ötelendiğini gözlemlemiştir. Şekil 2'de [De Graaff ve Eaton] ile [Lee ve Sung]'un çalışmalarında gözlemlenen u^+ ve y^+ değerleri görülmektedir. Bu çalışmalarda ters basınç gradyanının etkisi β boyutsuz basınç parametresi ile ifade edilmiştir.

$$\beta = (\delta / \tau_w) \frac{dP}{dx}$$

Burada δ yer değiştirme kalınlığı, τ_w ise yüzey kayma gerilmesidir. Ayrıca bu ötelemenin ters basamak geometrisi [Le, Moin, Kim] ve diğer genişleyen akış yapılarında da [Spalart ve Watmuff] bulunabilen tekrar yapışma bölgelerinde de gözlemlemiştir. [Spalart ve Watmuff] bu çalışmalara ek olarak Von Karman sabitinin basınç gradyanıyla azaldığını da söylemiştir.

Ters basınç gradyanının en etkili bir şekilde gözlemlendiği problemlerden biri de Ters Basamak (Backward-Facing Step) problemidir. [David M. Driver ve H. Lee Segmiller]'in 1985'de yayınlanan çalışmasında ters basamak geometrisini deneysel sonuçları ile bir Cebirsel Reynolds Gerilmesi Modeli (ARSM) ve $k - \varepsilon$ modelini karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın sonucunda modifiye edilmiş bir ARSM modelinin standart ARSM ve $k - \varepsilon$ modeline göre daha iyi sonuç verdiğini tespit etmiştir. [Armaly, Durst Pereira ve Schönung] kanal içerisinde yaptıkları çalışmada ise Re sayısının 70 ile 8000 aralığında Lazer Doppler Anemometresi ile yaptıkları ölçümlerde basamak arkasındaki geri dönme bölgesi uzunluğunun Reynolds sayısına bağımlılığını incelemiştir. Ayrıca sayısal ve deneysel çalışmalar arasındaki farkları araştırmışlardır.



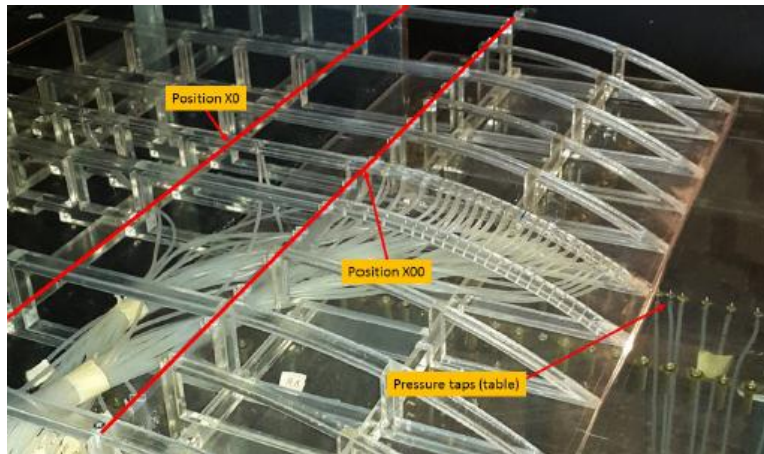
Şekil 2: Ters Basınç Altındaki Türbülanslı Sınır Tabakada Logaritmik Alt Sınır Tabakanın Değişimi [DeGraaff, Eaton]

[Lee ve Mateescu] deneysel ve 2 boyutlu sayısal çalışma sonuçlarının karşılaştırdığı bir çalışma yapmıştır. Sonuçların oldukça yakın olduğu ayrılma ve yapışma noktalarının uyumlu olduğunun gözlemlemiştir. [Jedah ve arkadaşları] ise ters basamak adım geometrisinde farklı türbülans modelleri çalışmışlardır. $k - \omega$ sst ve standart $k - \varepsilon$ modellerinin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Bunların dışında literatürde sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığı birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda RANS, LES, DNS gibi sayısal yöntemler kullanan [Kobayashi] ve [Le]'nin çalışmaları da eklenebilir.

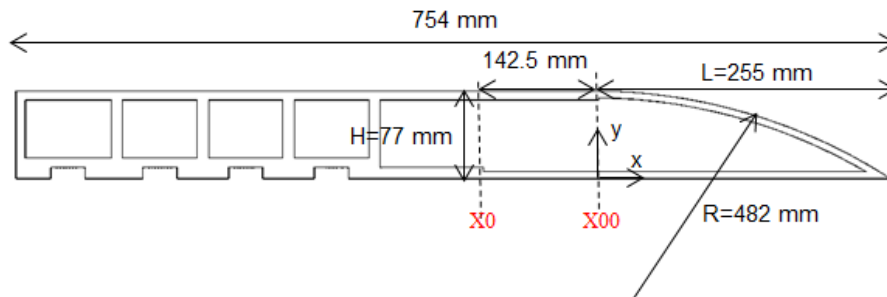
YÖNTEM

Deneysel Çalışma

Bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında kullanılan veri [Kuzugüden ve Erdem] tarafından sunulmuştur. Deneyler İTÜ Trisyonik laboratuvarı düşük hızlı rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada basınç gradyanı oluşturmak amacıyla bir eğrisel ters basamak kullanılmıştır (Şekil 3). Deney odası boyutları 80x80x200 cm'dir. Rüzgar tüneli 0-20 m/s aralığında bir akım hızı sağlamakla birlikte bu çalışmada serbest akım hızı 10 m/s olarak seçilmiştir. Deney geometrisine (Şekil 4) bağlı olarak istasyonlar belirlenmiş (Tablo 1) ve sıcak tel anemometresi kullanılarak yüzeye dik doğrultuda hız profili taramaları gerçekleştirilmiştir. Rampa başlangıcındaki türbülanslı sınır tabakanın şekil faktörü 1.2, aynı noktadaki momentum kalınlığına bağlı Reynolds sayısı 1901 olarak belirlenmiştir. Modelin akım doğrultusuna paralel simetri eksenini boyunca çift sıra 54 adet basınç prizi ile 27 farklı noktadan ölçüm alınarak yüzeyin basınç katsayısı dağılımı elde edilmiştir.



Şekil 3: Eğrisel Ters Basamak Geometrisi [C. Kuzugüden & D. Erdem]



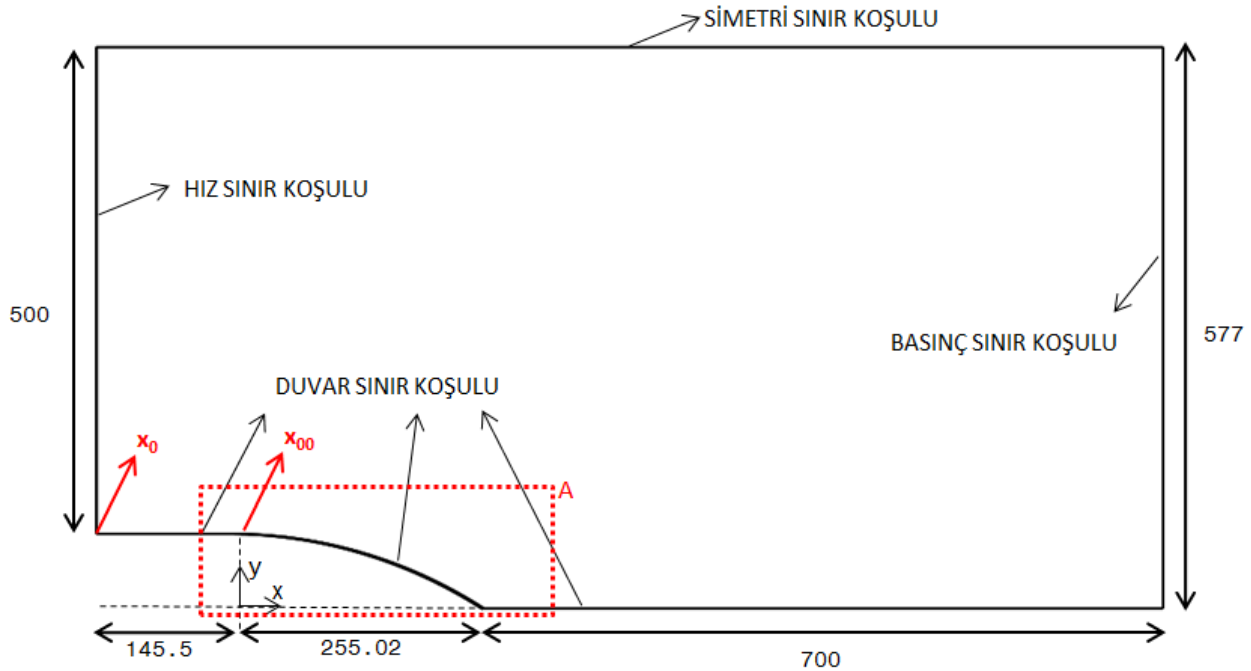
Şekil 4: Eğrisel Ters Basamak Geometrisi Ölçüleri (H=77mm, L=255mm)

Tablo 1: Ölçüm İstasyonlarının Yeri ve Şekil Faktörleri

İstasyon	x/H
X00	0
X1.0	0.57
X2.0	1.20
X3.0	1.83
X3.5	2.14
X4.0	2.44
X4.5	2.73
X5.0	3.02

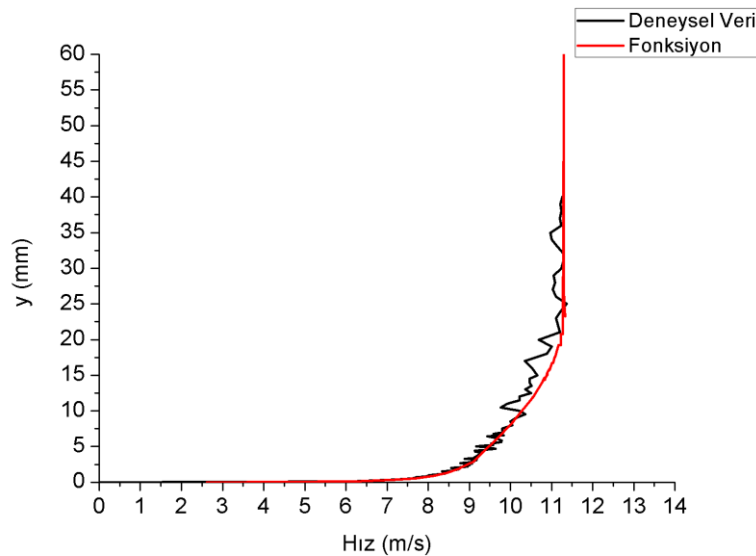
Nümerik Çalışma

Çalışmanın bu aşamasında 5 farklı türbülans modeli (Spalart-Allmaras, standart $k-\omega$, $k-\omega$ sst standart $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$) ve $k-\varepsilon$ türbülans modeli için standart ve dengeli olmayan duvar fonksiyonu olmak üzere 2 farklı duvar fonksiyonu kullanılmış toplamda 7 farklı matematiksel model Ansys Fluent® yardımıyla ilgili akış bölgesinde çözdürülmüştür. Analiz için oluşturulan çözüm alanı 2 boyutludur (Şekil 5). Sol yüzey hız girişi, sağ yüzey ise basınç çıkışı koşulu olarak verilmiştir. Alt yüzeye kaymama koşulu olarak belirlenirken, üst yüzey rampa geometrisinden yeterince uzakta olduğu düşünülerek simetri sınır koşulu verilmiştir.



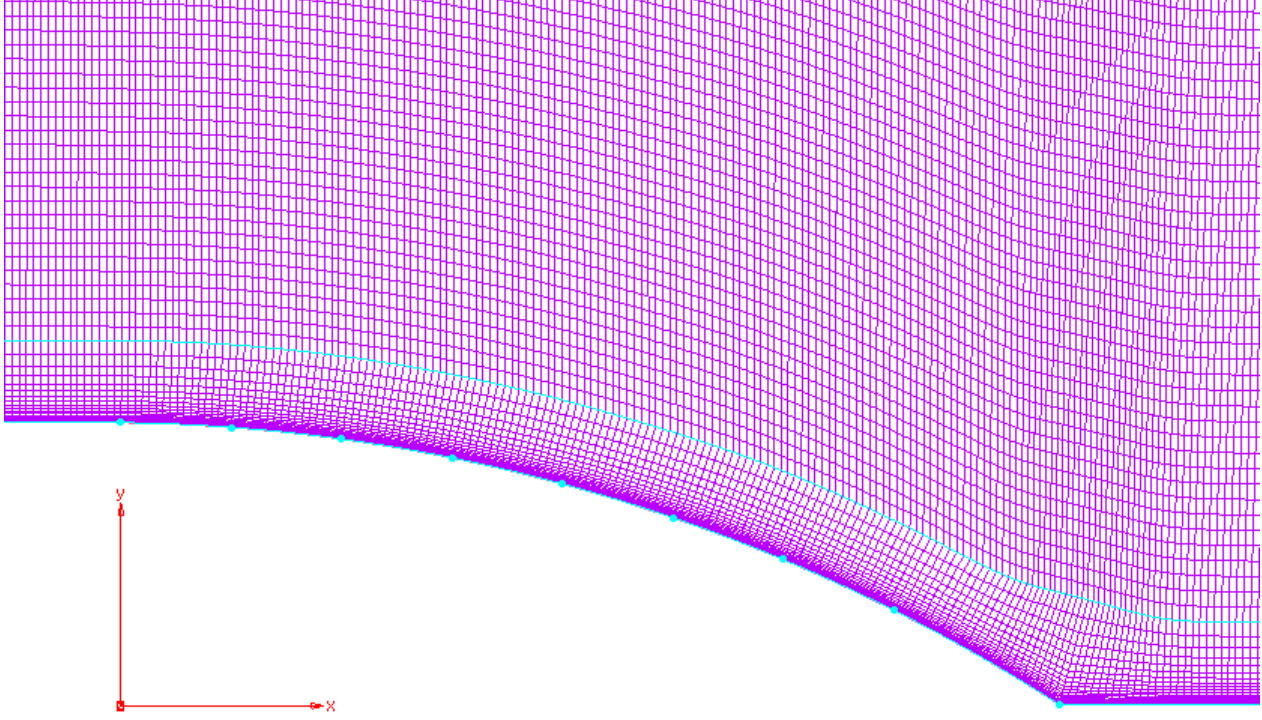
Şekil 5: Analiz Geometrisinin Kesiti (Ölçüler mm ve $z=4.05\text{mm}$)

X0 istasyonundan alınan deney sonuçlarına göre bir hız profili eğrisi oluşturulmuştur (Şekil 6). Bu profil analizde hız giriş koşulu olarak kullanılmıştır.

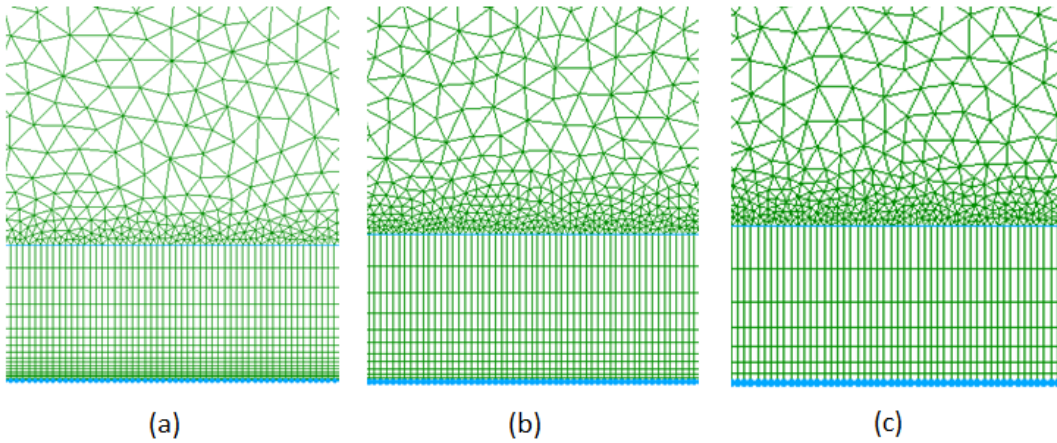


Şekil 6: X0 Noktasında Deneysel Verilere Göre Oluşturulmuş Hız Profili ve Analizde Kullanılan Hız Profilinin Karşılaştırılması

Türbülans yoğunluğu deney sonuçlarına göre %1 ve boyut ölçeği 8 mm olarak belirlenmiştir. Çıkış sınır koşulu ise rüzgar tüneli atmosfere açıldığı için 0 Pa olarak alınmıştır. Momentum denkleminin ayrıştırılmasında ikinci mertebeden upwind yaklaşımı kullanılmış hız basınç ilişkisinde ise SIMPLE algoritması ile sağlanmıştır. Analizde yapısal ağ kullanılmıştır Şekil 5’de gösterilen A bölgesinin ağ yapısı Şekil 7’de gösterilmiştir. y^+ değeri göz önünde bulundurularak eleman sayısı 80 bin ile 150 bin arasında değişen ağ yapılarının türbülans modelleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sınır tabakada kullanılan ağ yapısı şekil 8’de gösterilmiştir.



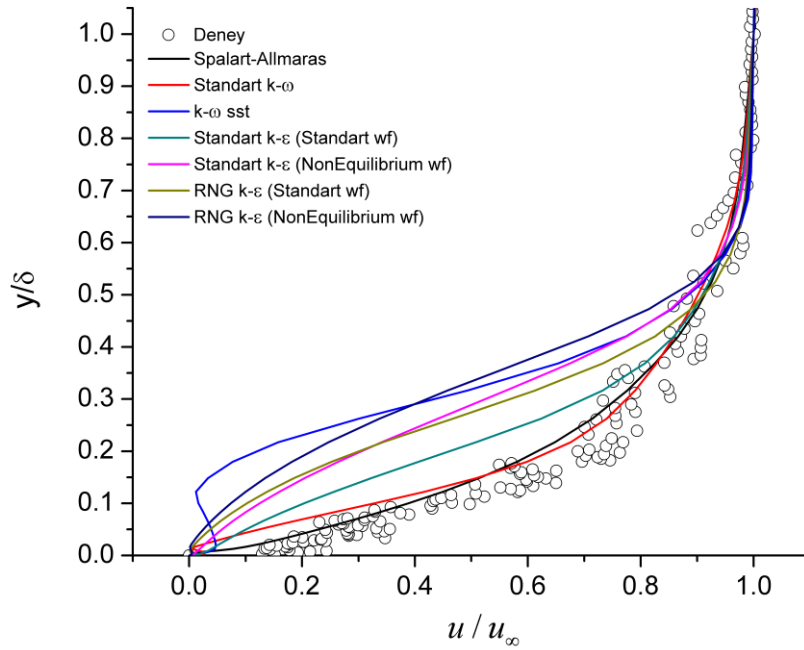
Şekil 7: Kullanılan Örnek Ağ Yapısı



Şekil 8 : Sınır Tabaka Ağ Yapıları (a) $y^+ = 3$, (b) $y^+ = 15$, (c) $y^+ = 30$

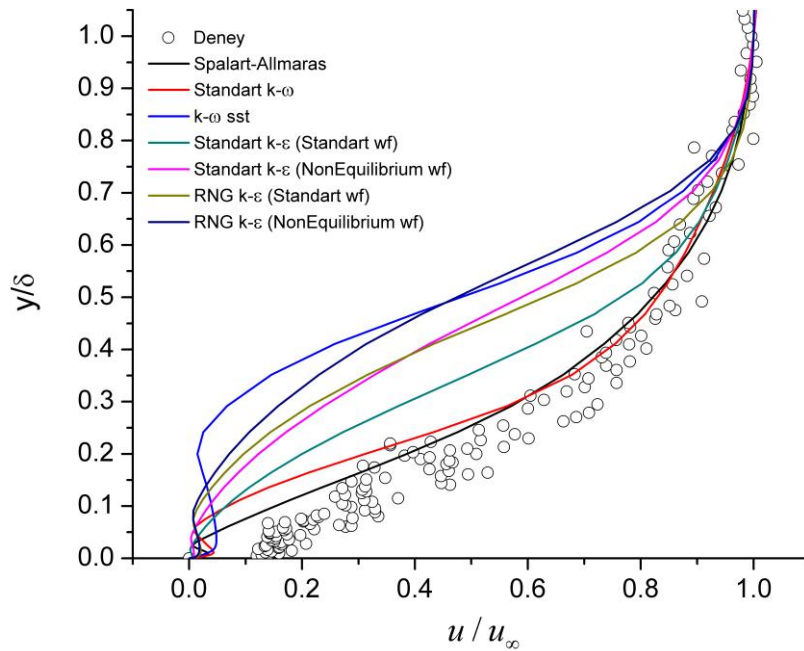
HAD SONUÇLARI

Spalart-Allmaras, standart $k-\omega$, $k-\omega$ sst, standart $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$ türbülans modelleri kullanılarak süreklilik, momentum denklemleri çözülmüştür. $y^+ = 3$ değerine sahip ağ yapısının x4.0, x4.5 ve x5.0 istasyonlarındaki hız profilleri Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de deneysel sonuçlarla birlikte boyutsuz olarak gösterilmiştir.



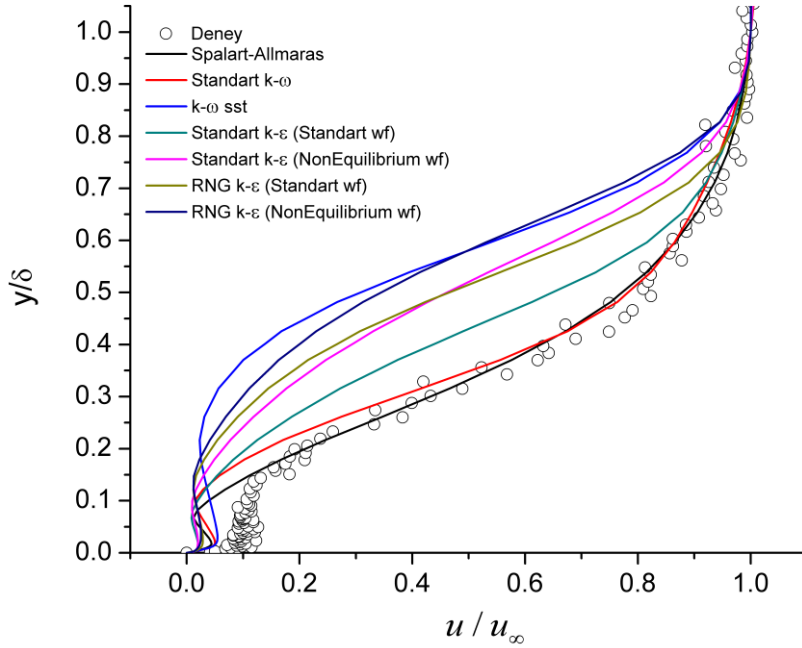
Şekil 9: x4.0 Noktasında Hız Profilleri ($y^+ = 3$)

X4.0 noktasında deneysel sonuçlarda görülen hız profili yüzeyden ayrılmamıştır. Alışla gelmiş hız profiline olduğu gibi akış yüzeyde boyutsuz olarak 0 hıza sahiptir. y/δ oranı arttıkça boyutsuz hız da 1'e yaklaşmaktadır. Nümerik çözümü inceleyecek olursak, türbülans modellerine bağlı olarak hız profillerinin farklılaştığı görülmektedir. $k-\omega$ sst modelinde akışın ayrıldığı net bir şekilde görülmektedir. Ancak hız profili deneysel verilerle uyuşmamaktadır. Buna karşılık standart $k-\omega$ modelinde bu ayrılma bölgesinin çok ufak ve yüzeye yakın olduğu ayrıca yüzeyden uzaklaştıkça hız profiline deneysel hız profiline oldukça benzediği görülmektedir. Tüm $k-\epsilon$ modeli çözümleri deneysel sonuçlardan elde edilen hız profiline uymamakla birlikte RNG $k-\epsilon$ modelinde dengelenmemiş duvar fonksiyonunun kullanıldığı çözüm sonuçlarında yüzeye yakın bölgede ayrılma yapısı gözükteği fark edilmiştir. Spalart-Allmaras modelinde ise ayrılma görülmemekle birlikte hız profili deneysel hız profiline iyi uyum göstermektedir.



Şekil 10: x4.5 Noktasında Hız Profilleri ($y^+ = 3$)

x4.5 noktasında deneysel sonuçlarda elde edilen hız profilinde yüzeye yakın bölgelerde ters basınç kaynaklı bozulmalar görülmektedir. Yüzeye yakın bölgelerde ölçülen hız değerleri birbirine oldukça yakın ve sabit çıkması akışın yüzeyden ayrıldığı veya ayrılmak üzere olduğu izlenimini vermektedir. Nümerik sonuçlardan elde edilen hız profillerine göre standart $k-\omega$, $k-\omega$ sst, dengelenmemiş duvar fonksiyonunun kullanıldığı RNG $k-\varepsilon$ modelinde beklenildiği gibi ayrılmış bölgenin büyüklüğü artmıştır. Bununla beraber standart duvar fonksiyonu kullanan RNG $k-\varepsilon$ modelinde de ayrılma gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Spalart-Allmaras modelinde de akışın yüzeyden ayrıldığı tespit edilmiştir. Standart $k-\varepsilon$ türbülans modellerinde ise belirgin bir ayrılma gözlemlenmemiştir. x4.0 noktasında olduğu gibi bu noktada da standart $k-\omega$ ve Spalart-Allmaras türbülans modeli çözümünden elde edilen hız profilleri deneysel hız profiliyle uyumludur.



Şekil 11: x5.0 Noktasında Hız Profilleri ($y^+ = 3$)

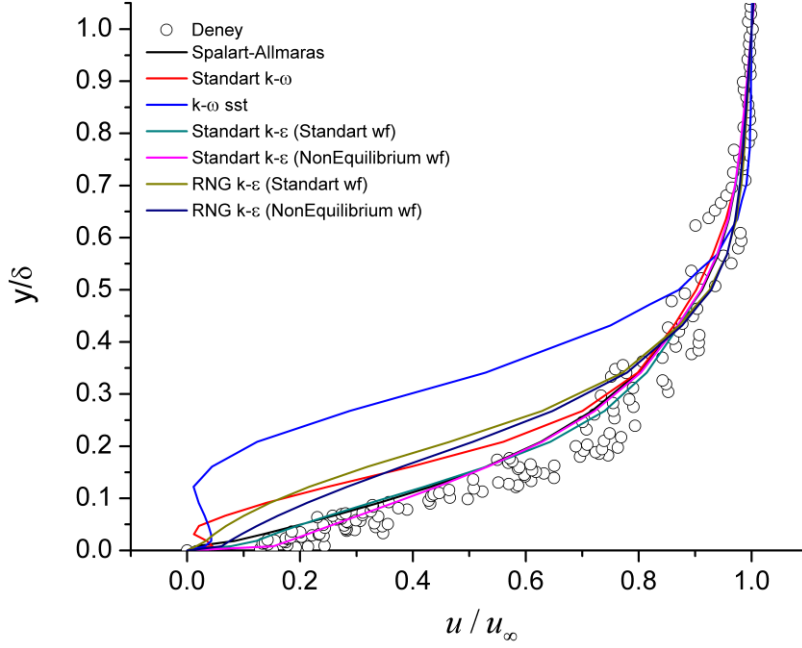
x5.0 noktasında deneysel sonuçlardan elde edilen hız profiline göre akış yüzeyden ayrılmıştır. Tüm türbülans modellerinde bu noktadaki ayrılma gözlemlenmiştir. Ancak önceki noktalarda olduğu gibi x5.0 noktasında da standart $k-\omega$ ve Spalart-Allmaras modelleri deneysel hız profilleriyle uyumludur.

$y^+ = 15$ değerine sahip ağ yapısının x4.0, x4.5 ve x5.0 istasyonlarındaki hız profilleri Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'de deneysel sonuçlarla birlikte boyutsuz olarak gösterilmiştir. $y^+ = 3$ değerine sahip ağ yapısındaki çözümlerden farklı olarak 3 noktada da Spalart-Allmaras modelinin dışında standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli çözümlerinde elde edilen hız profilleri deneysel verilerle yüksek y/δ oranlarında uyumludur. Standart $k-\omega$ modelleri ise bu ağ yapısında yeteri kadar iyi sonuç vermemiştir.

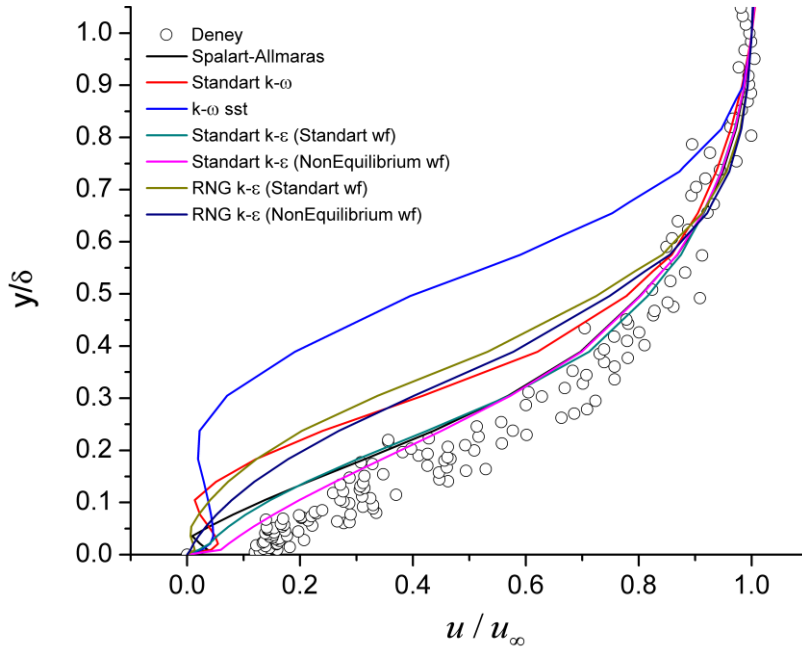
x4.0 noktasında standart $k-\omega$ ve $k-\omega$ sst modelleri sonuçlarında ayrılma belirgin bir şekilde görülmektedir. Buna ek olarak standart $k-\omega$ modeli sonuçlarından elde edilen hız profilindeki ayrılma bölgesi yine aynı noktada için $y^+ = 3$ değerine sahip ağ yapısında elde edilen sonuçlara göre daha büyüktür. Spalart-Allmaras türbülans modeli ve standart ve dengeli olmayan duvar fonksiyonlarının kullanıldığı standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli çözümleri deneysel sonuçlarla uyumlu bir şekilde olup akışın yüzeye yapışık olduğunu göstermektedir. Standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli için standart ve dengeli olmayan duvar fonksiyonları yüzeye yakın bölgede farklılık göstermiş dengelenmemiş duvar fonksiyonunda hız profili yüzeye daha yakın olduğu görülmüştür. RNG

$k - \varepsilon$ modeli sonuçlarında ise ters basınç etkisi görülmektedir. Bu etki standart duvar fonksiyonun kullanıldığı durumda daha belirgindir. Ancak her iki duvar fonksiyonu çözümünde de ayrılma gözlemlenmemiştir.

x4.5 noktasında standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli çözümlerinden elde edilen hız profillerinde akış yüzeyden ayrılmadığı görülmektedir. Ancak dengeli olmayan duvar fonksiyonun kullanıldığı durumda hız profili yüzeye daha yakındır. Spalart-Allmaras türbülans modelinde ise elde edilen hız profilinde yüzeye yakın bölgede küçük bir ayrılma kabarcığı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek y/δ oranlarında bu türbülans modellerinin deneysel verilerle uyumu oldukça iyidir. Dengeli olmayan duvar fonksiyonunun kullanıldığı RNG $k - \varepsilon$ modeli sonuçlarında $du/dy=0$ durumu söz konusudur. Ancak standart duvar fonksiyonunun kullanıldığı RNG $k - \varepsilon$ modeli sonuçlarına göre yüzeye çok yakın küçük bir ayrılma kabarcığı gözlemlenmiştir.

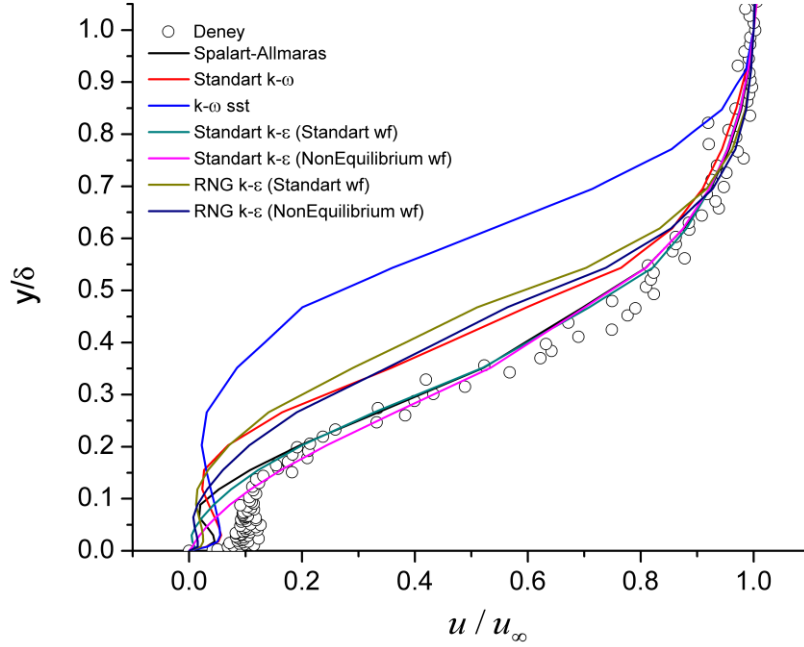


Şekil 12: x4.0 Noktasında Hız Profilleri ($y^+ = 15$)



Şekil 13: x4.5 Noktasında Hız Profilleri ($y^+ = 15$)

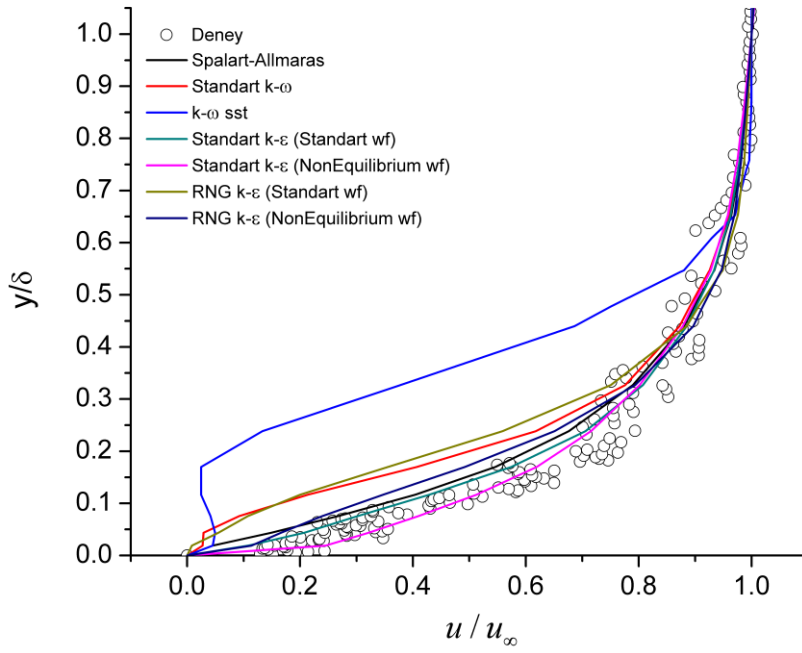
x5.0 noktasında standart $k - \varepsilon$ türbülans modeli çözümlerinden elde edilen hız profilleri sonuçlarında $du/dy=0$ durumu söz konusudur. Ancak deneysel verilerle görülen akış ayrılması standart $k - \varepsilon$ türbülans modelinde tespit edilememiştir. Bununla beraber *RNG* $k - \varepsilon$ modelinde standart duvar fonksiyonunun kullanıldığı çözüm sonuçlarından elde edilen hız profillerinde akışın yüzeyden ayrıldığı görülmektedir. Tüm *RNG* $k - \varepsilon$ türbülans modellerinde elde edilmiş hız profilleri yüksek y/δ oranlarında deneysel verilerle elde edilmiş hız profillerine uymamaktadır. Spalart-Allmaras türbülans modelinde ise x4.5 noktasında görülen ayrılma kabarcığının büyüdüğü tespit edilmiştir.



Şekil 14: x5.0 Noktasında Hız Profilleri ($y^+ = 15$)

$y^+ = 30$ değerine sahip ağ yapısının x4.0, x4.5 ve x5.0 istasyonlarındaki hız profilleri Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17’de deneysel sonuçlarla birlikte boyutsuz olarak gösterilmiştir.

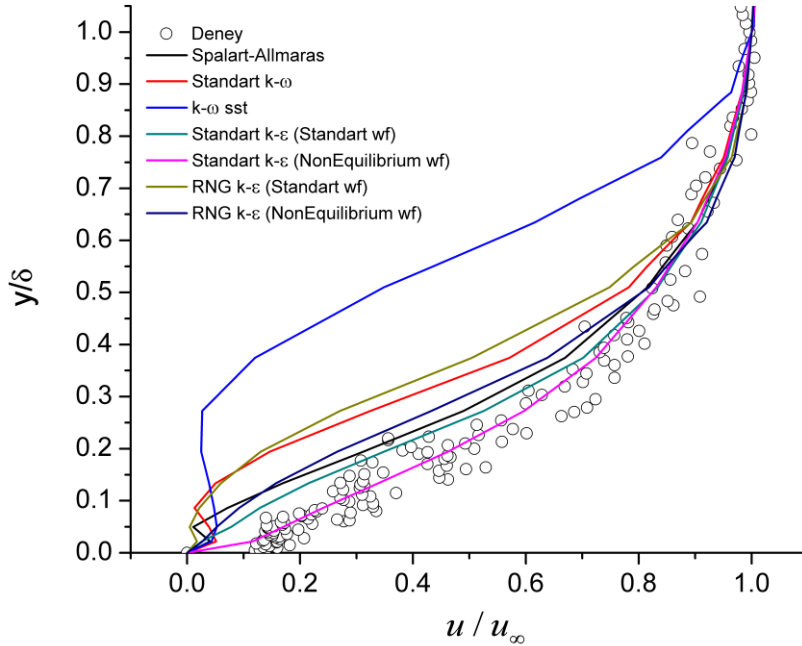
x4.0 noktasında $y^+ = 15$ değerine sahip ağ yapısında farklı olarak Spalart-Allmaras modelinde ters basınç etkisi görülmüştür. Bununla birlikte hız profili deneysel sonuçlarla elde edilmiş hız profiline göre önceki ağ yapıları göz önüne alınıp karşılaştırıldığında küçük farklılıklar göstermektedir. Standart $k - \varepsilon$ çözümleri ise önceki ağ yapılarına göre deneysel hız profilleriyle daha iyi uyum göstermiştir. Ayrıca dengeli olmaya duvar fonksiyonu kullanan *RNG* $k - \varepsilon$ türbülans modeli de deneysel sonuçlarla uyumludur. Standart duvar fonksiyonu kullanan *RNG* $k - \varepsilon$ türbülans modelinde ise ayrılma etkisi belirgin bir şekilde görülmektedir.



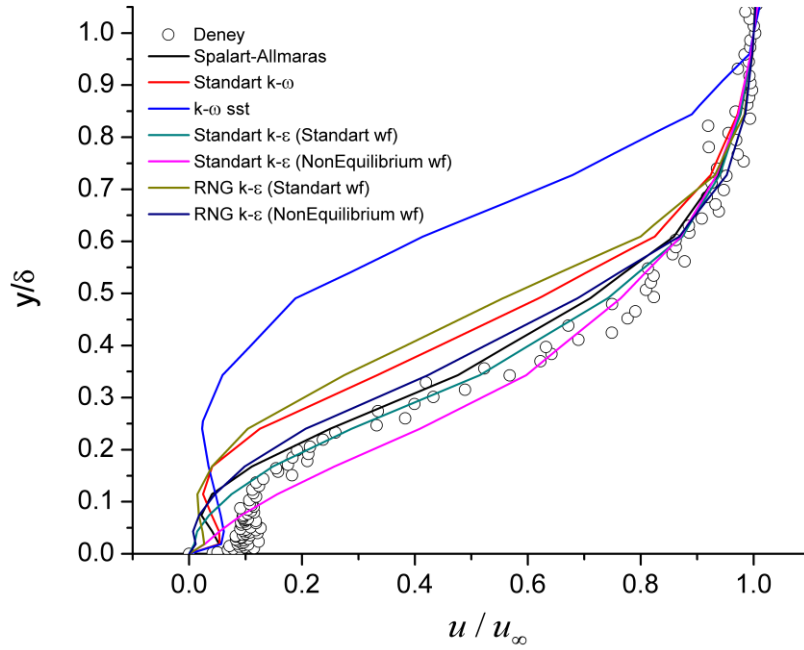
Şekil 15: x4.0 Noktasında Hız Profilleri ($y^+ = 30$)

x4.5 noktasında Spalart-Allmaras modelinde akışın ayrıldığı görülmüştür. Deneysel sonuçlarla elde edilmiş hız profilinden sapmalar artmıştır. Standart duvar fonksiyonunu kullanan standart $k-\varepsilon$ ve dengeli olmayan duvar fonksiyonu kullanan $RNG\ k-\varepsilon$ türbülans modeli sonuçlarından elde edilen hız profillerinde de ters basınç gradyanının etkileri belirgin bir şekilde görülmüştür. Ancak akış yüzeyden ayrılmamıştır. Dengeli olmayan duvar fonksiyonu kullanan standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinde ise hız profili yüzeye yapışmıştır.

x5.0 Spalart-Allmaras modelinde ayrılma kabarcığının büyüdüğü görülmüştür. Standart duvar fonksiyonunu kullanan standart $k-\varepsilon$ ve dengeli olmayan duvar fonksiyonu kullanan $RNG\ k-\varepsilon$ türbülans modeli sonuçlarından elde edilen hız profillerinde ise yüzeyde $du/dy=0$ durumu elde edilmiştir. Dengeli olmayan duvar fonksiyonu kullanan standart $k-\varepsilon$ türbülans modelinde ise ayrılma etkileri ancak görülmeye başlanmıştır.

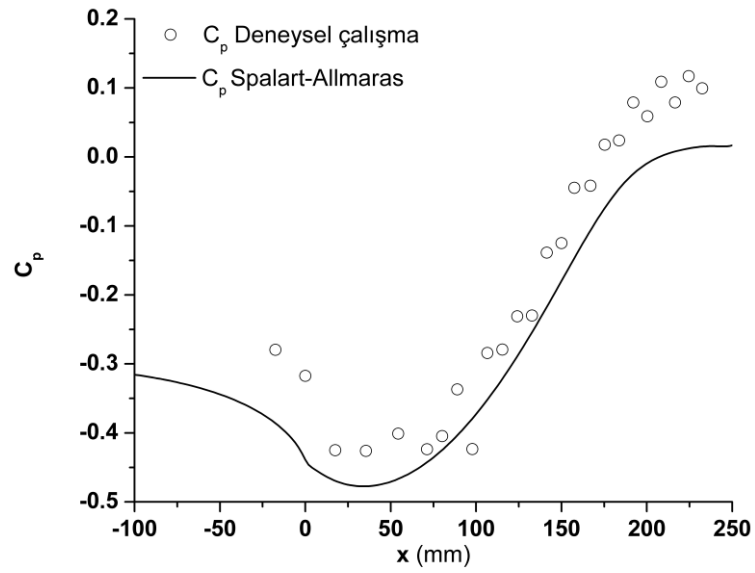


Şekil 16: x4.5 Noktasında Hız Profilleri ($y^+ = 30$)

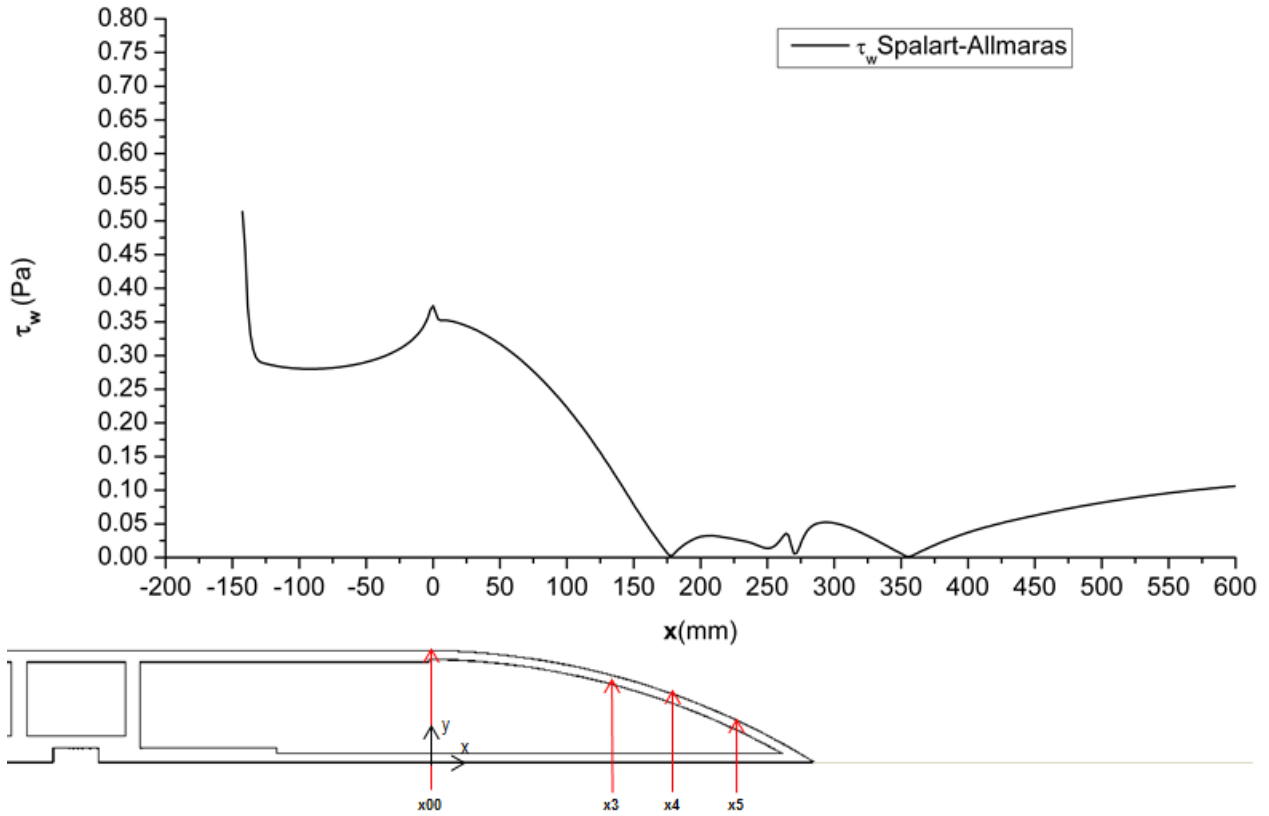


Şekil 17: x5.0 Noktasında Hız Profilleri ($y^+ = 30$)

5 farklı türbülans ve 2 farklı duvar fonksiyonu, $y^+ = 3, 15, 30$ değerlerine sahip ağ yapılarında deneysel sonuçlara göre akım ayrılmasına yakın 3 farklı noktada karşılaştırılmıştır. $y^+ = 3$ değerinde Spalart-Allmaras ve standart $k - \omega$ türbülans modellerinden elde edilmiş hız profillerinin deneysel sonuçlardan elde edilmiş hız profillerine diğer türbülans modellerine göre oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. y^+ değeri artıkça duvar fonksiyonu kullanan $k - \epsilon$ türbülans modelinden elde edilen hız profilleri deneysel sonuçlardaki hız profillerine benzemeye başlamaktadır. $y^+ = 15$ değerine sahip ağ yapısında yüksek y / δ değerlerinde standart $k - \epsilon$ türbülans modeli Spalart-Allmaras türbülans modeli kadar başarılıdır. Ancak yüzey yakınlığında ayrılma noktası bu model sonuçlarına bakılarak net olarak tespit edilememiştir. Bu ağ yapısında standart $k - \omega$ türbülans modeli $y^+ = 3$ değerindeki ağ yapısının da olduğu gibi deneysel sonuçlarla elde edilen hız profillerine yakın bir hız profili sonucu vermemiştir. $y^+ = 30$ değerinde Spalart-Allmaras türbülans modeli sonuçlarındaki hız profillerinde deneysel sonuçlardan elde edilmiş hız profillerine göre farklılıklar oluşmaya başlamıştır. Buna karşılık standart $k - \omega$ türbülans modeli ve dengeli olmayan duvar fonksiyonu kullanan $RNG k - \omega$ modellerinden elde edilen hız profilleri yüksek y / δ değerlerinde deney sonuçlarla elde edilmiş hız profillerine diğer oldukça yakındır. Bu sebeplerden dolayı $y^+ = 3$ değerine sahip ağ yapısında Spalart-Allmaras türbülans modelinde sınır tabakanın daha iyi modelleneceği düşünüldüğünden basınç katsayısı ve yüzey sürükleme katsayısı da bu ağ yapısında bu türbülans modeli sonuçlarına göre sırasıyla Şekil 18 ve Şekil 19'da verilmiştir.

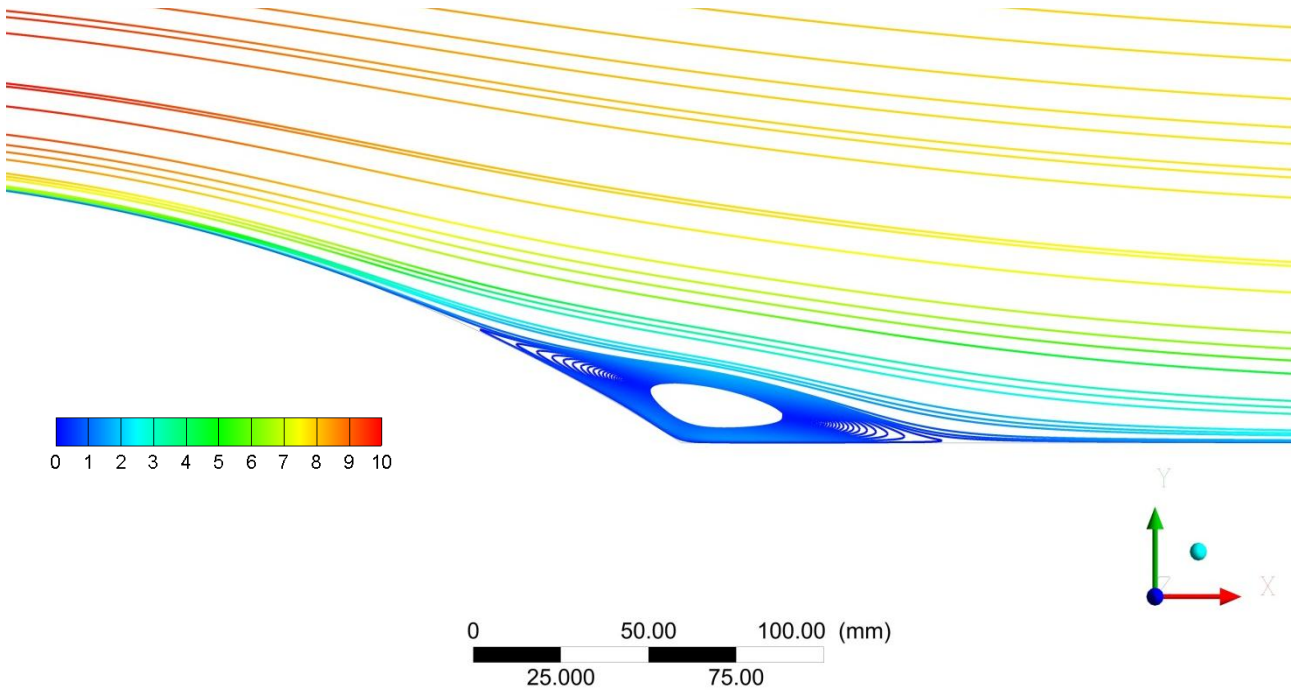


Şekil 18: Basınç Katsayısı Dağılımı



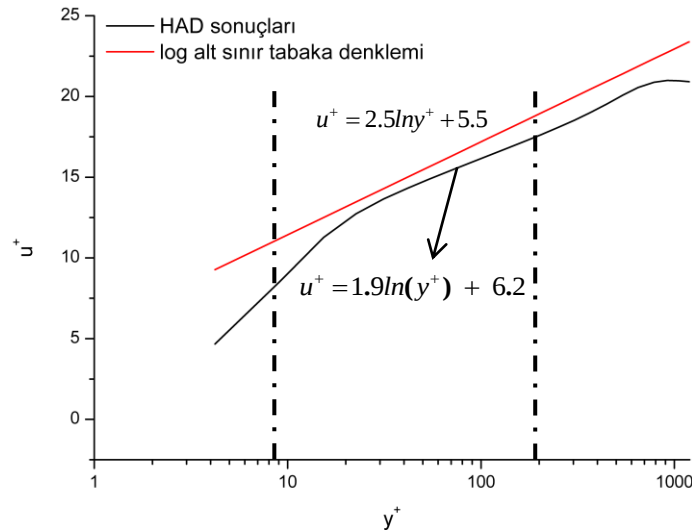
Şekil 19: Yüzey Üzerindeki Kayma Gerilmesi

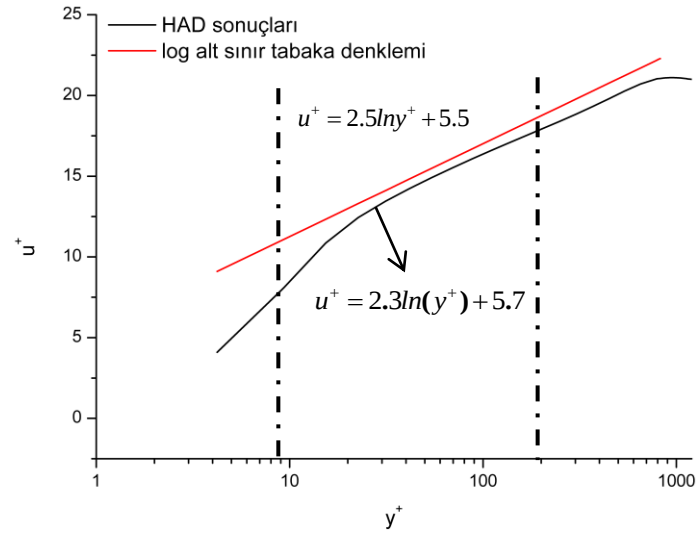
Sayısal çalışmanın bir başka sonucu olarak akış bölgesinde akım çizgileri çizdirilebilir. Şekil 20'de görülen akım çizgilerinde ayrılma bölgesi net bir şekilde görülmektedir.



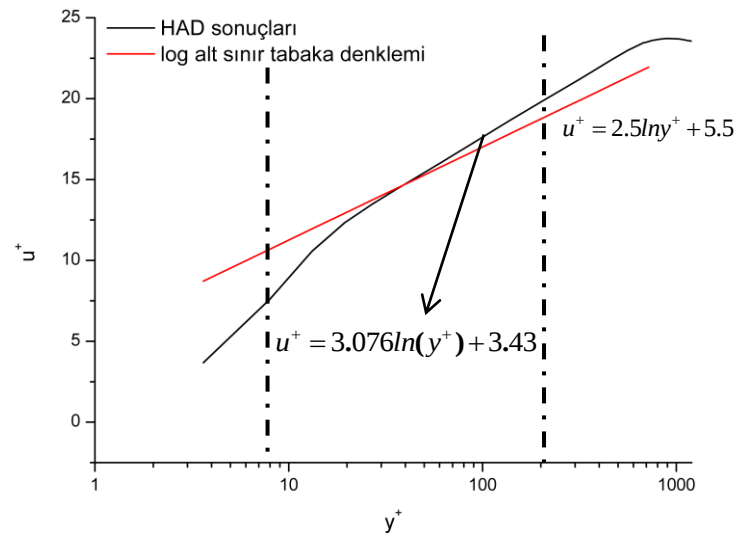
Şekil 20: Akım Çizgileri

Türbülanslı sınır tabakalarda logaritmik alt sınır tabaka basınç gradyanından etkilendiği [Nagano], [Spalart ve Watmuff] yaptığı çalışmaların sonucunda görülmüştür. Benzer bir etki bu çalışmada da görülmektedir. x00, x1.0, x2.0, x3.0 noktalarındaki hız profillerinden elde edilen u^+ , y^+ grafikleri sırasıyla Şekil 21-24 arasında görülmektedir. Her bir noktada farklı bir basınç parametresi değeri hesaplanmış olup basınç parametresinin boyutsuz hız profillerine olan etkisi basınç gradyanı bulunmayan logaritmik alt sınır tabaka denklemiyle karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. [Nagano], [Spalart ve Watmuff] yaptığı çalışmalara paralel olarak β parametresinin arttığı ters basınç gradyanının güçlendiği noktalarda çizdirilen boyutsuz hız grafiği basınç gradyanı bulunmayan logaritmik alt sınır tabaka denkleminin üzerine çıkmıştır.

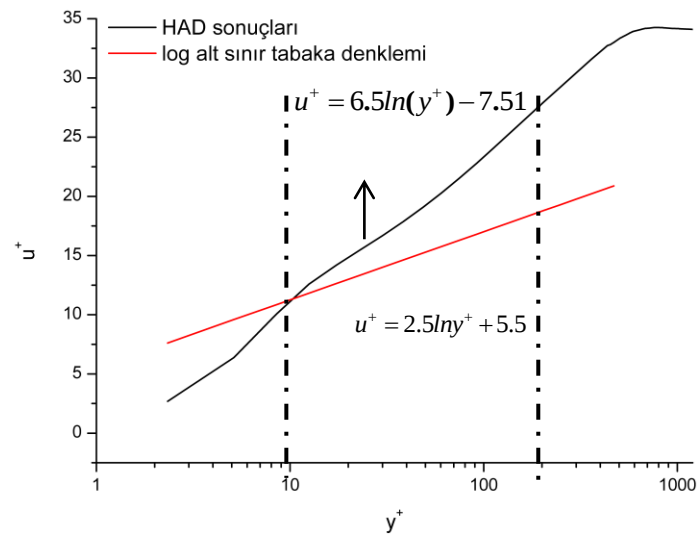
Şekil 21: x00 Noktasında u^+ , y^+ Değişimi ($\beta = -0.78$).



Şekil 22: x1.0 Noktasında u^+ , y^+ Değişimi. ($\beta = 0.24$).



Şekil 23 x2.0 Noktasında u^+ , y^+ Değişimi. ($\beta = 2.51$)



Şekil 24 x3.0 Noktasında u^+ , y^+ Değişimi. ($\beta = 14.08$)

SONUÇ

Bu çalışmada ters basınç gradyanı altında bulunan bir türbülanslı sınır tabaka sayısal olarak incelenmiş ve sonuçları deneysel bir çalışmayla karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışmada 3 farklı türbülans modeli (Spalart-Allmaras, $k-\omega$, standart $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$) ve $k-\varepsilon$ türbülans modeli için standart ve dengeli olmayan olmak üzere 2 farklı duvar fonksiyonu olmak üzere 7 farklı model kullanılmıştır.

Sayısal çalışma sonucunda,

1. Ağ yapısı ve türbülans modelleri arasında yakın ilişki bulunmaktadır.
2. Düşük $y^+ = 3$ değerlerinde Spalart-Allmaras ve standart $k-\omega$ türbülans modelleri kullanılarak elde edilen hız profilleri deneysel sonuçlardan elde edilmiş hız profilleriyle oldukça uyumludur. Ancak $y^+ = 15, 30$ ağ yapılarında Spalart-Allmaras türbülans modeli sonuçlarında deneysel sonuçlara göre sapmalar meydana gelmektedir. Standart $k-\omega$ türbülans modelinde ise uyum ortadan kalkmaktadır.
3. $k-\omega$ sst türbülans modeli hiçbir ağ yapısında deneysel sonuçlarla uyum gösterememiştir.
4. $k-\varepsilon$ türbülans modellerinden elde edilen hız profilleri $y^+ = 3$ değerlerinde deneysel sonuçlardan elde edilmiş hız profilleriyle uyumlu değildir. Buna karşılık $y^+ = 15, 30$ değerlerinde yüksek y/δ değerlerinde deneysel sonuçlardan elde edilmiş hız profilleriyle uyum gösterebilmiştir. Ancak bu y^+ değerlerine sahip ağ yapılarında ayrılma noktasını bu model kullanılarak tespit etmek mümkün olamamıştır.
5. Spalart-Allmaras ve $k-\omega$ gibi duvar fonksiyonu kullanmayan türbülans modellerinde y^+ değeri arttıkça ayrılmanın daha erken gerçekleştiği sonucuna götürürken duvar fonksiyonu kullanan $k-\omega$ türbülans modellerinde ise ayrılmanın daha geç olduğu sonucuna götürmektedir.
6. $k-\varepsilon$ türbülans modellerinde kullanılan duvar fonksiyonları arasında belirgin bir fark tespit edilememiştir.
7. Basınç parametresi değeri arttıkça yani ters basınç gradyanı güçlendikçe u^+ , y^+ bağlı boyutsuz hız grafiği logaritmik alt sınır tabaka denkleminin üzerine çıkmaktadır

Kaynaklar

- Armaly, B. F., Durst, F., Pereira, J. C. F., Schönung, B., 1983. *Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow.*, J. Fluid Mech, Vol. 127, 473-496.
- Bernard, A., Foucaut, J.M., Dupont, P. ve Stanislas, M., 2003. *Decelerating boundary layer: a new scaling and mixing length model.*, AIAA Journal, Vol. 41, 2, 248-255.
- Curle, N., ve Skan, S. W., 1957. *Approximate methods for predicting separation properties of laminar boundary layers.*, Aero. Q., 8, 257-268.
- DeGraaff, D.,E., Eaton, J.,K., 2000. *Reynolds-number scaling of the flat-plate turbulent boundary layer*, J. Fluid Mech., 422, 319-346.
- Driver, David, M. ve Segmiller, H. Lee, 1985. *Features of a reattaching turbulent shear layer in divergent channel flow*, AIAA Journal, Vol. 23, 2.
- Gaster, M., 1966. *The structure and behavior of laminar separation bubbles.*, AGARD CP-4,813-854.
- Tani, L., 1964. *Low Speed Flows Involving bubble separation.*, Prog. Aero. Sci. 5,70-103
- Horton, H. P., 1968. *Laminar separation bubbles in two and three dimensional incompressible flow.*, Ph.D. thesis., University of London, London,U.K.
- Jadah, D.G., Hashim, G.A., Zarzoor, A.K., Nor Azwadi, C.S., 2015. *Numerical study of turbulent flow over backward-facing step with different turbulence models.*, Journal of Advanced Research Design, 4, 20-27.
- Kobayashi, T., Morinishi, Y., Oh, K.J., 1992. *Large eddy simulation of backward-facing step flow.*, Communications in Applied Numerical Methods, 8, 431-441.
- Kuzugüden, C. & Erdem, D., 2015. *Passive Control of a Turbulent Boundary Layer Under Adverse Pressure Gradient.*, 8th Ankara International Aerospace Conference, 10-12 September.
- Le, H., Moin, P., Kim, J.,1997. *Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step.*, Journal of Fluid Mechanics, 330, 349-374.
- Lee, J.H., Sung, H.J., 2009. *Structures in turbulent boundary layers subjected to adverse pressure gradients.*, J. Fluid Mech, 639, 101–131.
- Lee, J.H., Sung, H.J., 2008. *Effects of an adverse pressure gradient on a turbulent boundary layer*, Intl. J. Heat Fluid Flow, 29, 568–578.
- Lee, T. & Mateescu, D., 1998. *Experimental and numerical investigation of 2D backward-facing step flow.*, Journal of Fluids and Structures, 12, 703-716.
- Marusic, I., Perry, A.E., 1995. *A wall-wake model for the turbulence structure of boundary layers. Part 2. Further experimental support.*, J. Fluid Mech., 298, 389–407.
- Monty, J.P., Harun Z. ve Marusic, I., 2011. *A Parametric Study of Adverse Pressure Gradient Turbulent Boundary Layers.*, International Journal of Heat Fluid Flow, Vol. 32, 575-585.
- Nagano, Y., Tsuji, T., Houra, T. 1998. *Structure of turbulent boundary layer subjected to adverse pressure gradient.*, Int. J. Heat Fluid Flow, 19, 563—572.
- Nagano, Y., Tagawa, M., Tsuji, T., 1992. *Effects of adverse pressure gradients on mean flows and turbulence statistics in a boundary layer*, Turbulent Shear Flows, Vol. 8, 7—21.
- Samuel, A.,E., Joubert, P.N., 1974. *A boundary layer developing in an increasingly adverse pressure gradient.*, J. Fluid Mech., 66, 481—505.
- Spalart, P.R., Watmuff, J.H., 1993. *Experimental and numerical study of a turbulent boundary layer with pressure gradients*, J. Fluid Mech., 249, 337— 371.
- Zhang, X. F., 2005. *Separation and transition control on ultra-high-lift low pressure turbine blades in unsteady flow.*, Ph.D. Thesis, Cambridge University, Cambridge, U.K.