

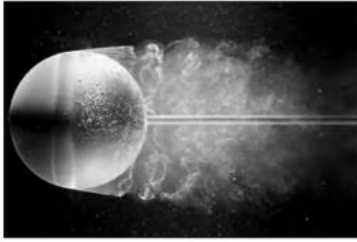
GOLF TOPU & NORMAL KÜRE ANALİZİ

PREPARED BY	EDITED\CHECKED BY
Aykut Atabay Stajyer Mühendis	Ahmet Kozanoğlu Lider CFD Mühendisi

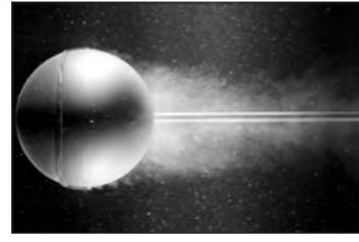
25/03/2022

Giriş

Küre üzerinden akış uygulamalarına sıklıkla karşılaşılr; futbol, tenis, golf gibi sporlarda da küre üzerinden akış söz konusudur. Küre üzerinde var olan akış rejimi Reynolds sayısı ($Re = \frac{VD}{\nu}$) ile tanımlanır. Burada V serbest akımı üniform hızı, D kürenin çapı, ν ise akışkanın kinematik viskozitesidir. Pürüzsüz bir küre için kritik Reynolds sayısı yaklaşık olarak 2×10^5 'tir. Bir küre üzerine çapraz akış gönderildiğinde kürenin aşağı akımında yaklaşık olarak çapı kadar art izi denilen düşük basınç bölgesi oluşur. Durma noktasındaki yüksek basınç ve art izi bölgesindeki düşük basınç kürenin direnç katsayısını önemli ölçüde etkiler, ayrıca yüzeydeki sürtünme kuvveti de bu direnç katsayısına eklenir. Kürelerde direnç katsayısı türbülanslı akışlarda laminer akışa göre daha düşüktür. Bunun nedeni türbülanslı akışta akış ayrılması (sınır tabaka ayrılması) olayının geciktirilerek daha az bir art izi bölgesinin oluşmasıdır. Örneğin küre üzerindeki laminer akışta ayrılma $\theta \cong 80$ iken türbülanslı akışta bu değer $\theta \cong 120$ civarındadır. [1][2]



Şekil 1 Re=15000 için pürüzsüz kürenin aşağı akımı



Şekil 2 Re=30000 için engel teli sarılı kürenin aşağı akımı

Akış ayrılmasındaki gecikmenin sebebi akışta oluşan çalkantıların türbülanslı sınır tabakanın bir miktar daha yüzey üzerinde tutunmasına yardımcı olmasıdır. Böylece kürenin aşağı akımındaki art izi yani düşük basınç bölgesi küçülmüş olur.

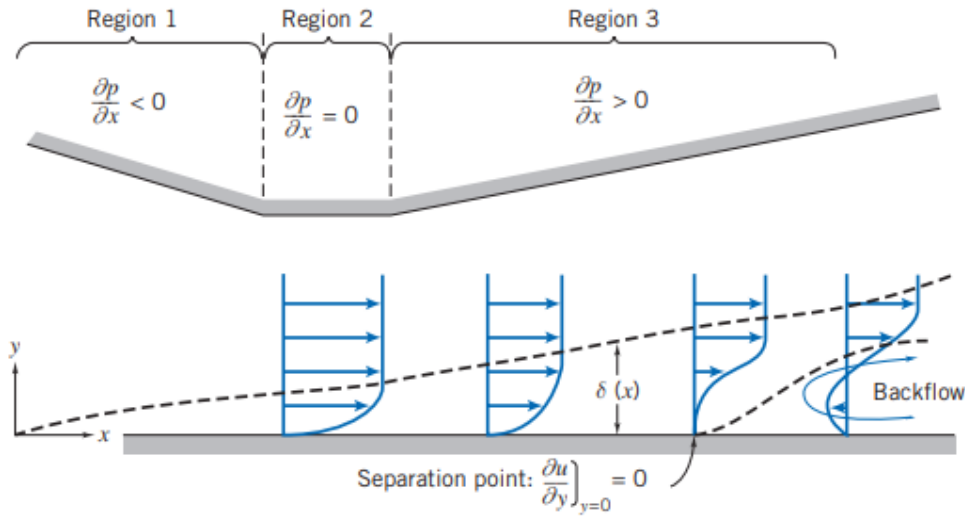
Akış Ayrılması

Akışkanlar yüksek hızlarda eğrisel yüzeyleri takip etmekte çok zorlanırlar. Yeteri kadar yüksek hızda ya da ani yol değişimlerinde akış yüzeyde daha fazla tutunarak yüzeyi terk eder. Akışkan yüzeyden ayrıldıktan sonra cismin arka tarafında art izi denilen düşük basınç bölgesi oluşturularak direnci artırır. Belli bir mesafe sonra da akış tekrar birleşir. Sınır tabaka akışı üç bölgede incelenir. [1] [2]

1) Elverişli basınç gradyeni ($\frac{\partial P}{\partial x} < 0$)

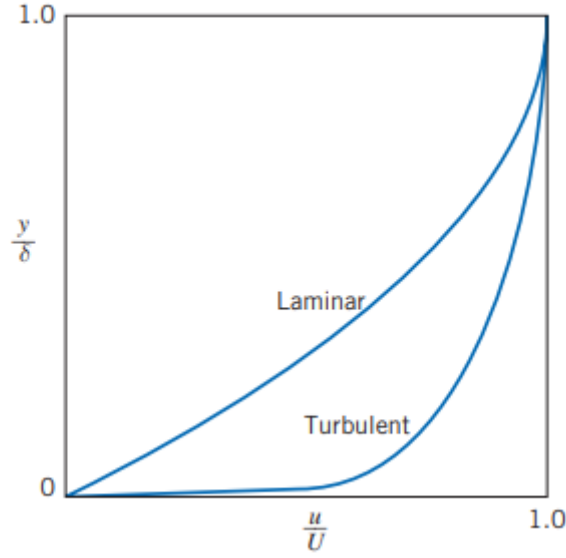
2) Sıfır basınç gradyeni ($\frac{\partial P}{\partial x} = 0$)

3) Ters basınç gradyeni ($\frac{\partial P}{\partial x} > 0$)

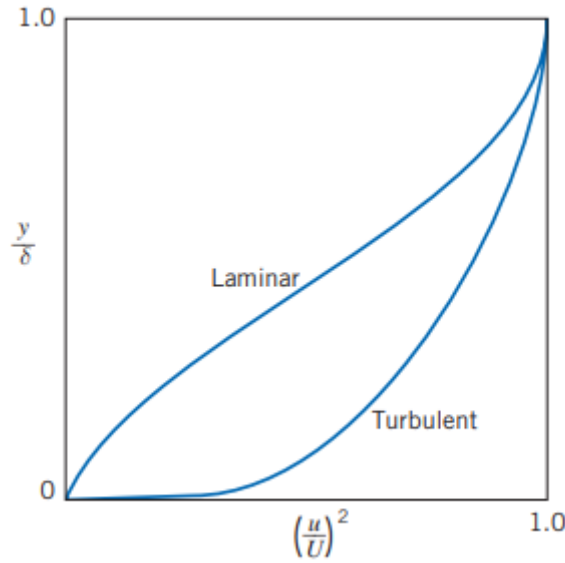


Şekil 3 Basınç gradyenli sınır tabaka akışı [2]

Elverişli basınç gradyeni akış yönünde basıncın düştüğü ve sınır tabaka içerisindeki akışkanın sürtünme kuvveti tarafından yavaşlatılmasını engellemeye çalışır. Sıfır basınç gradyenli bölgede sınır tabaka içerisindeki akışkan net bir basınca maruz kalmadığı için sabit hızla ilerleme eğilimindedir. Ters basınç gradyenli 3. bölgede akış yönünde basınç gradyeni artar ve sınır tabaka içerisindeki akışkanın yavaşlamasına sebep olur. Eğer ters basınç gradyeni yeteri kadar büyükse sınır tabaka içerisindeki akış duracak ve yüzeyden ayrılacaktır. Bu da başta sözü edilen, akış ayrılması (sınır tabaka ayrılması) olarak bilinen olaydır. Ters basınç gradyenleri genellikle geometri kaynaklıdır. [1] [2]



Şekil 4 Sınır tabaka akışı için boyutsuz hız profili [2]



Şekil 5 Sınır tabaka akışı için boyutsuz momentum-akı profili [2]

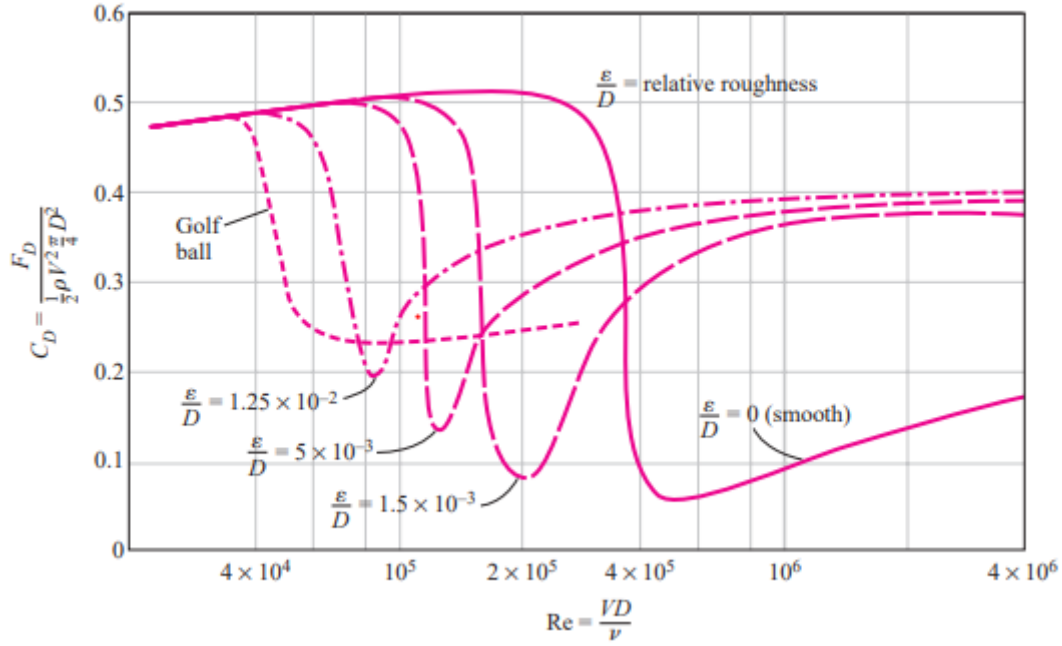
Şekil 4 ve Şekil 5'te sınır tabaka akışında laminar ve türbülanslı boyutsuz hız ve momentum akı profilleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere türbülanslı momentum (enerji) ve hız profili laminar akışa göre daha fazladır. Bu da türbülanslı sınır tabaka akışının ters basınç gradyenine daha dayanıklıdır. Bu nedenle cisim üzerinde türbülanslı sınır tabaka ayrılmayı geciktirip aşağı akımdaki art izi bölgesini küçülterek direnci azaltır.

Örneğin Şekil 6'da gösterildiği gibi uçak kanatlarında akış ayrılmasını, dolayısı ile stol durumunu geciktirmek için de çalkantı yaratıcı (vortex generator) gibi yapılar kullanılır. Bu küçük yapılar girdaplara neden olurlar ve bu girdaplar çok daha büyük momentuma ve enerjiye sahip olan ve sürtünmeden etkilenmeyen serbest akımdan bir miktar enerjiyi sınır tabakasına çekerek ayrılmayı geciktirir. [2]



Şekil 6 Uçak kanadı üzerindeki çalkantı yaratıcılar (vortex generator) [3]

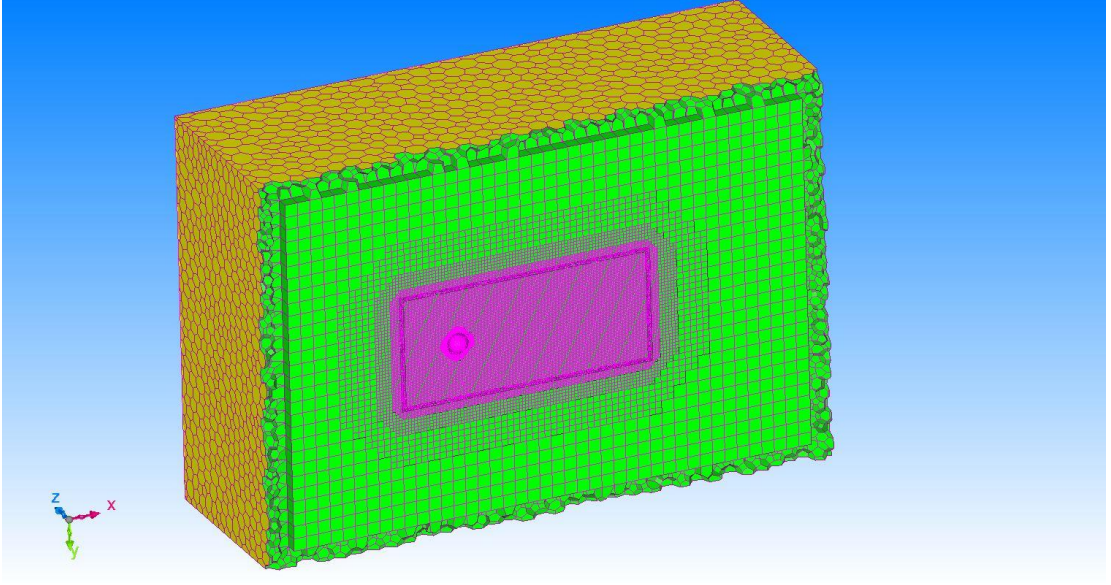
Kürelerde de yüzeyler pürüzlü hale getirilerek türbülanslı sınır tabaka yaratılır, dolayısıyla direnç katsayısında da bir düşüş görülür. Bu durumdan yararlanılarak golf topları bilinçli bir şekilde düşük Reynolds sayılarında türbülanslı akış yakalamak için pürüzlü hale getirilmiştir. Aşağıda Şekil 7' de yüzey pürüzlülüğüne göre direnç katsayılarının Reynolds sayısına göre değişimi verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi yüzey pürüzlülüğü arttıkça daha düşük Reynolds sayılarında daha düşük direnç katsayıları mevcuttur. [1]



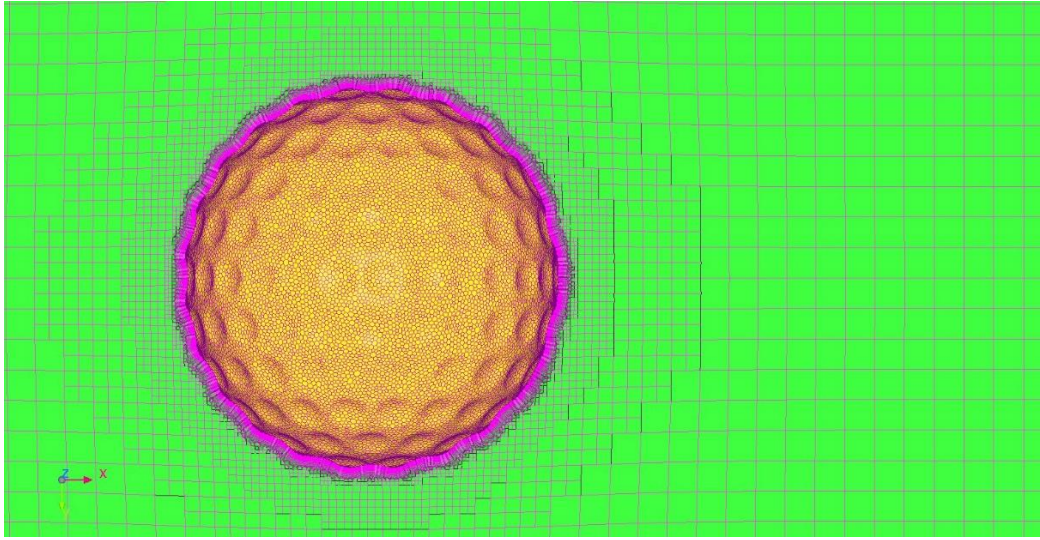
Şekil 7 Yüzey pürüzünün kürenin direnç katsayısına etkisi [2]

CFD Analizi

Cradle CFD ile bu fenomene dair yapılan CFD çalışmasında golf topu ile pürüzsüz bir kürenin aerodinamik olarak karşılaştırılması yapılmıştır. Analizler gerçekleştirilirken küre ve golf topu iç içe geçmiş farklı boyutlardaki iki akış hacminin içine yerleştirildi. Bu işlem, ağ oluştururken manuel bir işlem yapılmasını önlemektir. Ağ yapısı olarak çok yüzlü "Polihedral" ve dört yüzlü "hexahedral" ağ yapılarının birleşimi olan hibrit ağ elamanları kullanılmıştır ve yaklaşık olarak ağ sayısı 1 milyondur. Geometri etrafına 20 tane yapılandırılmış "inflation" tabakaları eklenmiştir. Akış türbülanslı olduğu için, bazı türbülans modelleri gereği viskoz alt tabakadaki hız profillerini çözümlenmek önemlidir. Bunun için boyutsuz y^+ değerinin 0 ile 1 arasında tutulmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 8 Hesaplama hacminin ağı dağılımı



Şekil 9 Golf topunun etrafındaki ağı yapısı

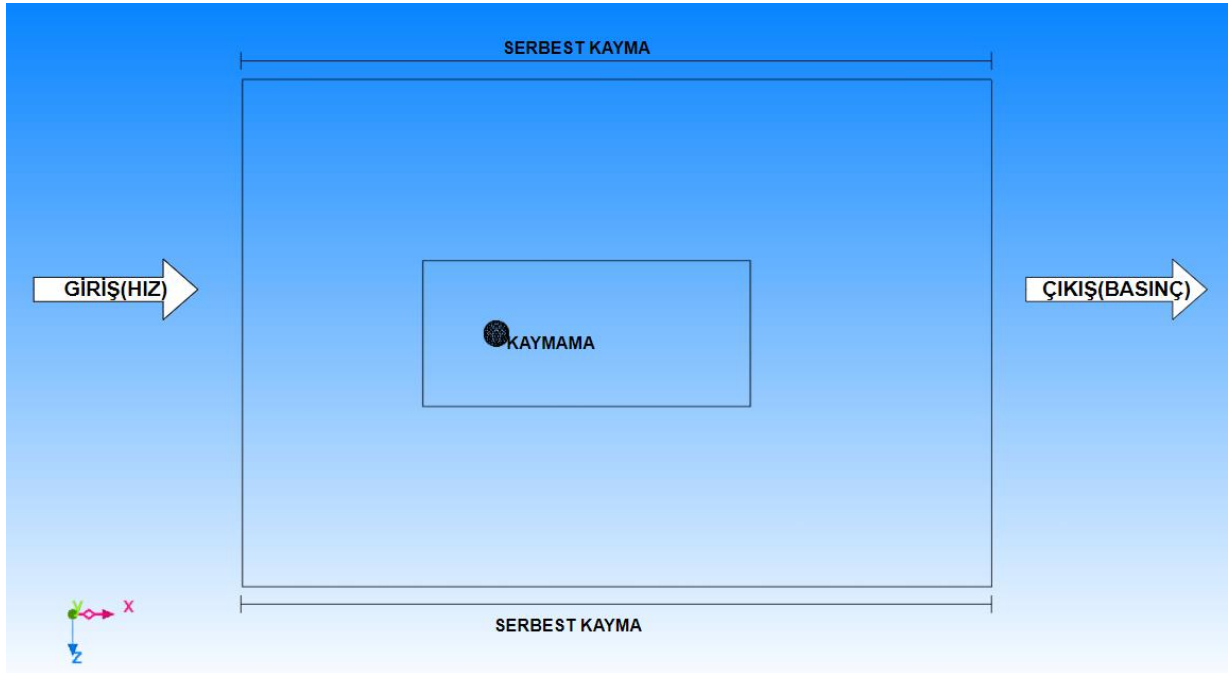
Sınır koşulları için;

Giriş yüzeyinde hız girişi (velocity inlet): 10m/s

Çıkış yüzeyi için statik basınç (Statik pressure (outflow)): Gauge 0 Pa

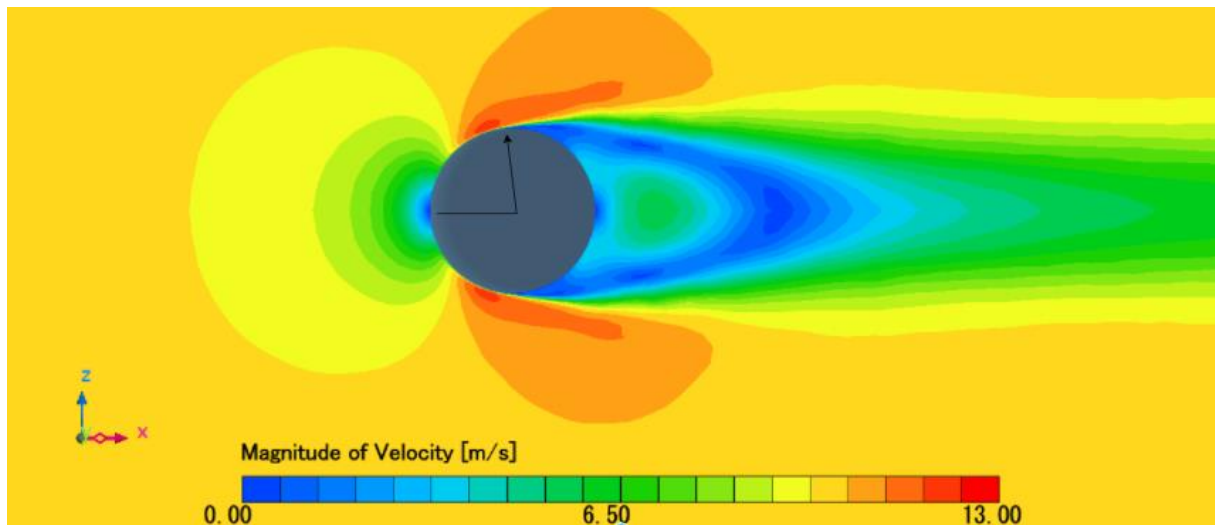
Dış duvar için serbest kayma (free-slip)

Küre ve golf topu yüzeyi için ise kaymama (no-slip) verilmiştir.

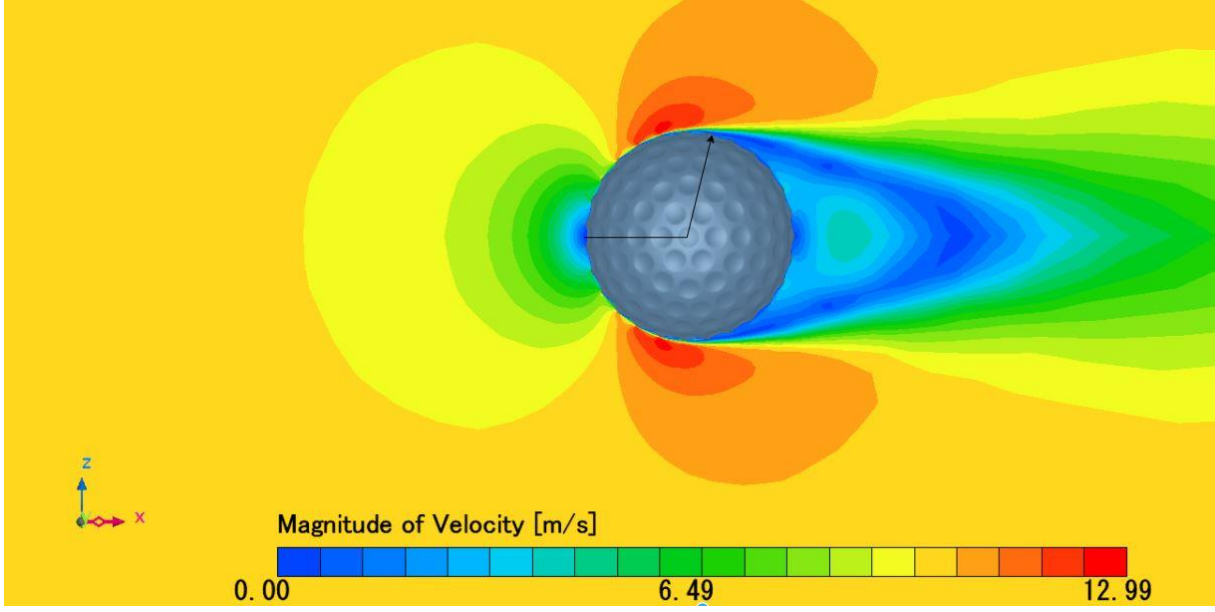


Şekil 10 Hesaplama hacmi için sınır koşulları

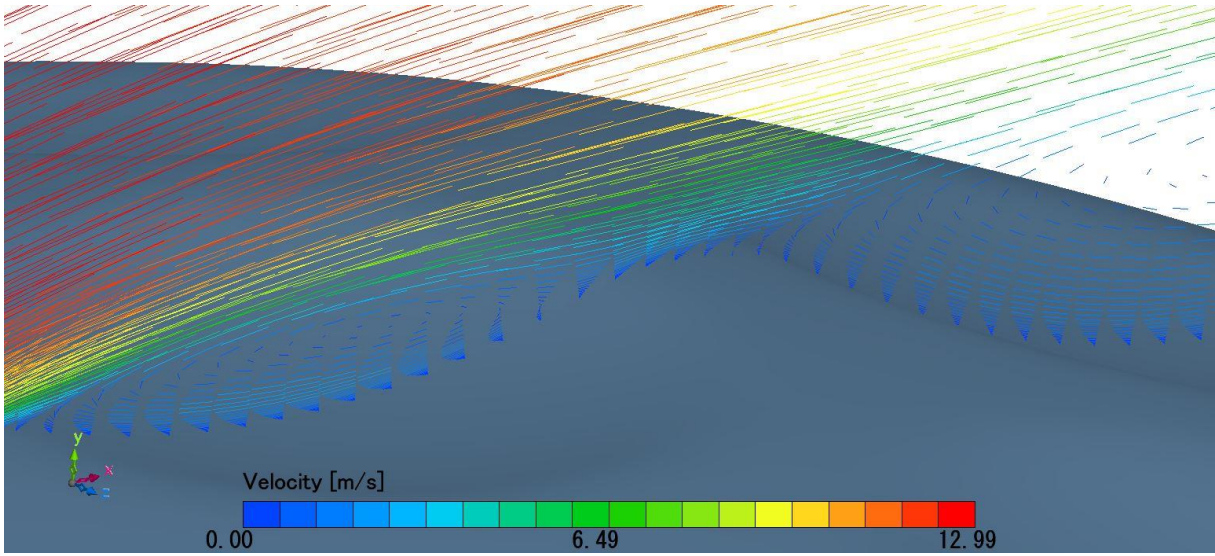
Zamandan bağımsız yapılan analizlerde RANS türbülans modeli ailesinden SST k-w modeli kullanılmıştır. Bunun nedeni SST k-w modelinin 2 ve 1 denklemliler arasında akış ayrılmasını en güvenilir şekilde modellemesidir. Aşağıdaki görüldüğü gibi Şekil 11’de akış kürede yaklaşık olarak 80-85 derece konumunda yüzeyi tamamen terk ediyor, öte yandan Şekil 12’de golf topunda, akış yüzeyde çalkantılı bir şekilde yüzeye tutunmaya devam ediyor ve yaklaşık olarak 105-110 derece konumunda yüzeyi tamamen terk ediyor. Şekil 13 ve Şekil 14’te çizilmiş hız vektörleri ile sınır tabakanın yüzeyi terk ettiği nokta daha yakından görülebilir. Bu analiz sonucunda 30000 Reynolds sayısında küre için direnç katsayısı 0.368 golf topu için ise 0.278 olarak hesaplanmıştır.



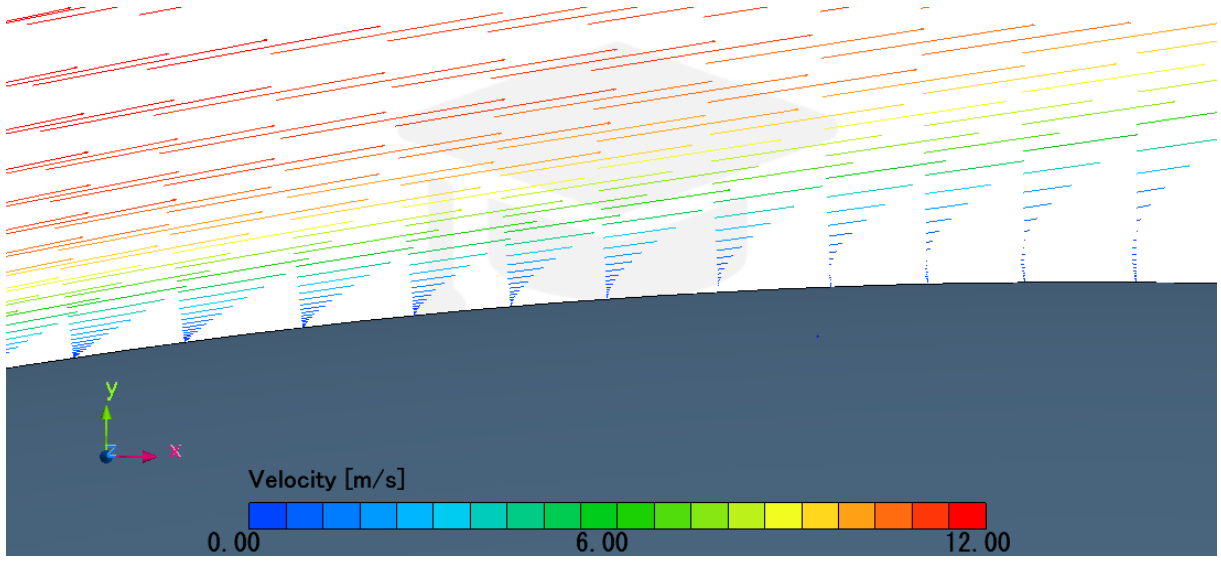
Şekil 11 Küre için akış ayrılmasının konumu ve oluşan art izi(RANS)



Şekil 12 Golf topu için akış ayrılmasının konumu ve oluşan art izi(RANS)

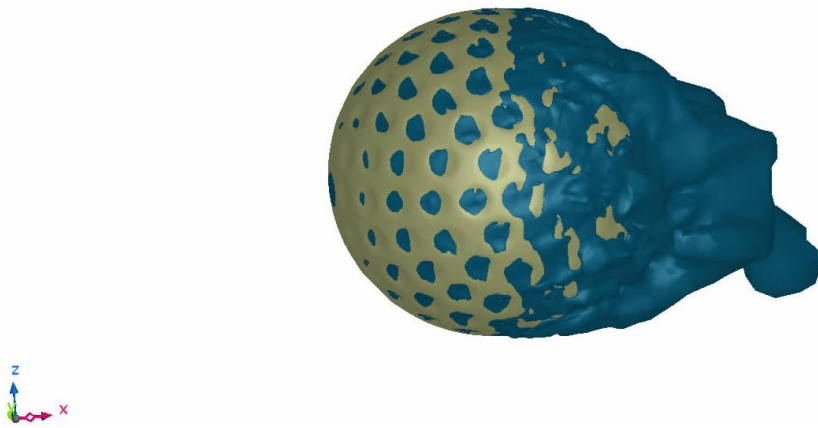


Şekil 13 Golf topu üzerindeki hız vektörleri ve sınır tabakanın yüzeyi terk etmesi(RANS)

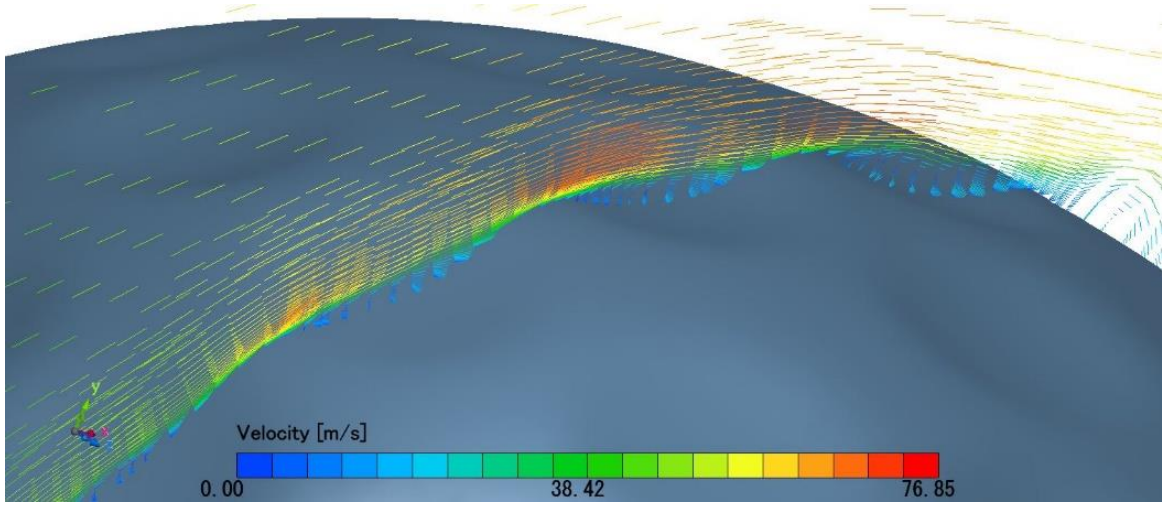


Şekil 14 Küre üzerindeki hız vektörleri ve sınır tabakanın yüzeyi terk etmesi(RANS)

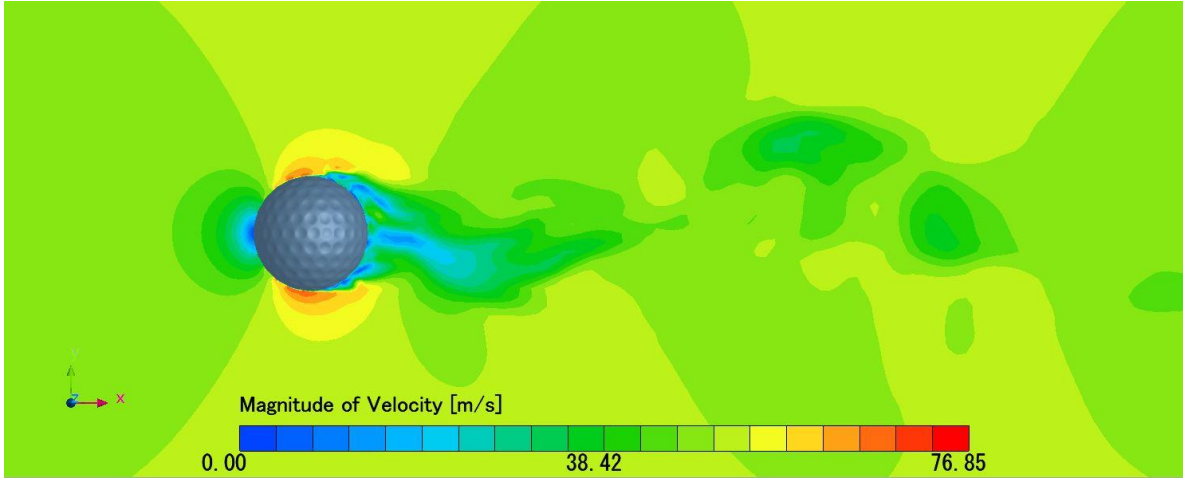
Bu sonuçların yanı sıra 50 m/s hızda yaklaşık olarak 150000 Reynolds sayısına sahip golf topu için zamana bağlı bir analiz daha gerçekleştirilmiştir. Bu analizde DDES modellerinden SST-2003 türbülans modeli ve aynı ağ parametreleri kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 15'te iso surface ile akışın golf topunda ayrılma bölgeleri asimetrik olarak 3 boyutlu bir şekilde gösterilmiştir. Görselde akışın -x yönündeki hızının sıfır ve altında olduğu, yani akışın yüzeyden koptuğu ve ters akışın olduğu noktalar gösterilmektedir, görüldüğü üzere akışın yüzeyden ayrıldığı noktalar genelde 90 dereceden büyüktür. Şekil 16'da da golf topunun çukurları arasında oluşan küçük girdaplar görülebilmektedir. Şekil 17'de ise hız kontürlerine bakılarak küçülmekte olan art izi gözlemlenebilir.



Şekil 15 Golf topu için akış ayrılmasının isosurface ile 3 boyutlu görselleştirilmesi(DDES)



Şekil 16 Golf topunun çukurları içerisindeki girdaplar(DDES)



Şekil 17 Golf topu için hız kontürü (DDES)

Referanslar

[1] Cimbala J.M. and Cengel A. (2004 Aralık 20) “*Fundamentals and Applications*”

[2] Fox and McDonald (2011 Ocak 18) “*Introduction to Fluid Mechanics*”

[3] Aleks Udris (2015 Ocak 09) “*Vortex Generators: Preventing Stalls at High and Low Speeds*”