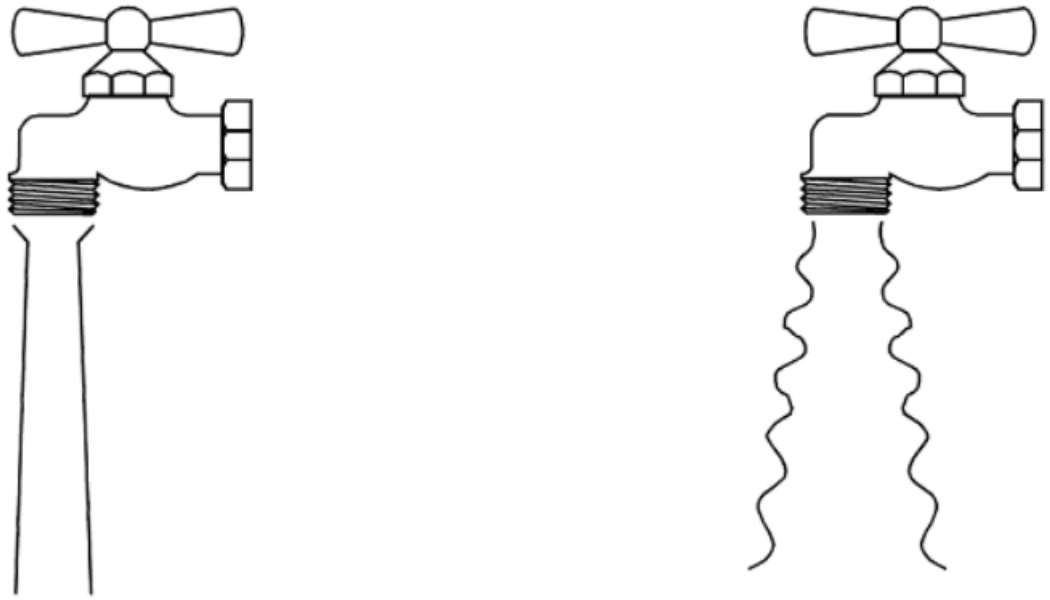
CRADLE CFD YAZILIMI İÇERİSİNDE YER ALAN TÜRBÜLANS MODELLERİ VE UYGULAMALARI

PREPARED BY
M. Ahmet Kozanoğlu Lider CFD Mühendisi

Tarih: 19.02.2024

Giriş

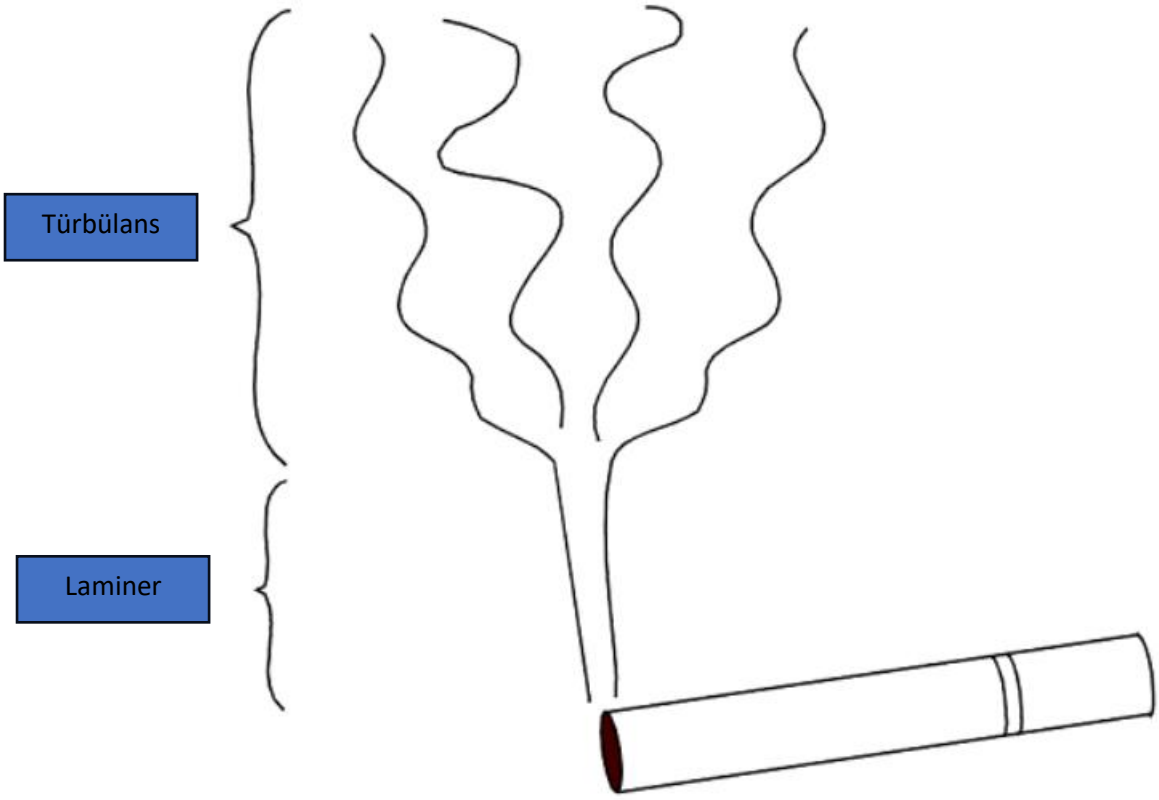


Laminer akış *Türbülans akış*

Şekil 1 Musluk Su Akışı

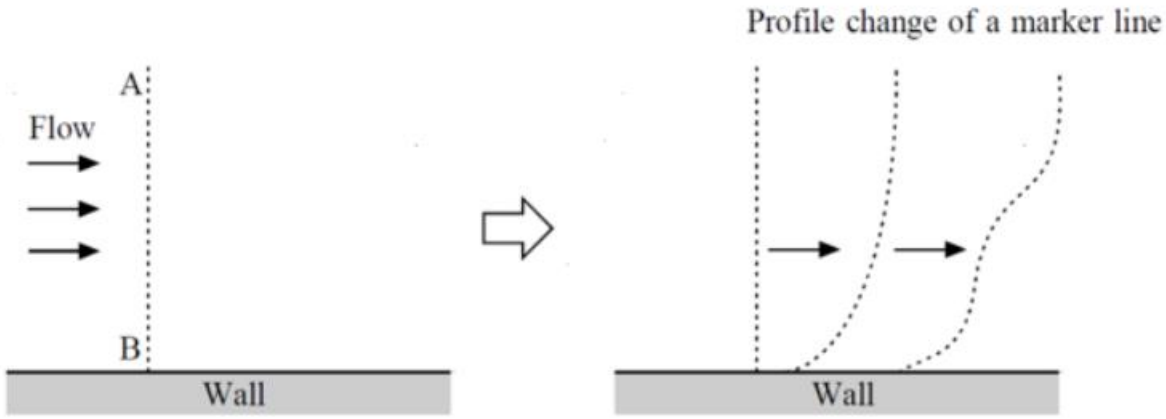
Şekil 1, günlük deneyimlerimizde yaygın olarak gördüğümüz bir musluktan su akışını göstermektedir. Musluk hafifçe açılırsa, su yavaş yavaş ve düzgün bir şekilde akacaktır. Musluk tamamen açıksa su akış miktarı artar ve bir noktada su akış düzeni aniden değiştiğinde suyun akışı çok karmaşık hale gelir. İlk olaya laminer akış, ikinci olaya ise türbülanslı akış adı veriliyor.

Şekil 2'de gösterilen akış günlük yaşamda da yaygın olarak görülmektedir. Sigaradan çıkan duman ilk olarak laminer bir akış halinde ortaya çıkar ve atmosferdeki türbülanslı akış nedeniyle çeşitli yönlerde akma eğilimi gösterir. Bu akışa türbülanslı akış denir.

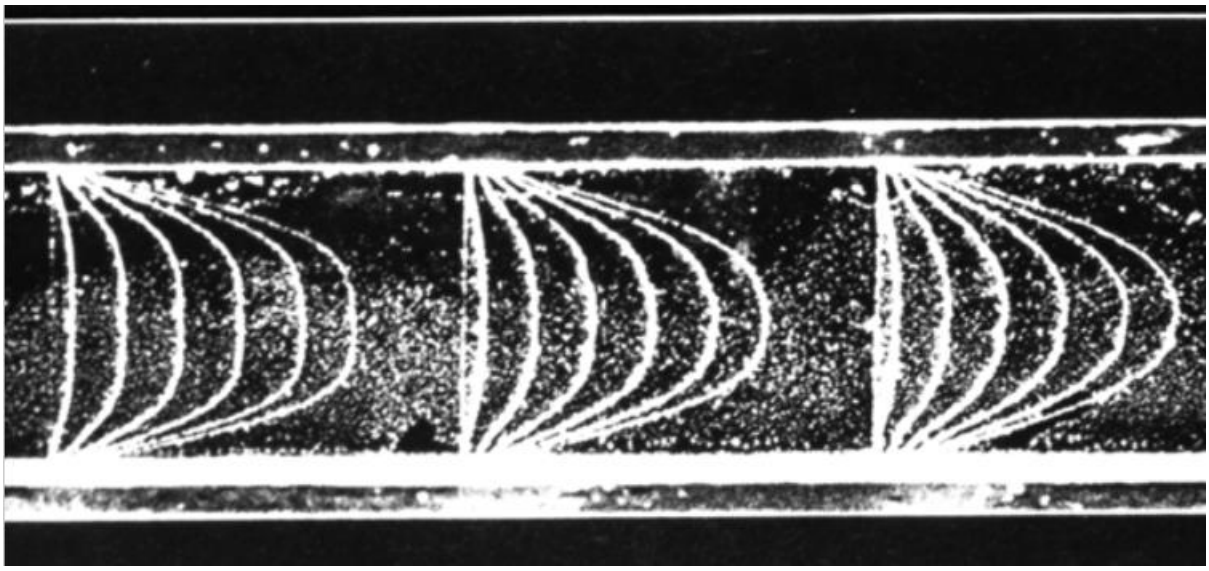


Şekil 2 Sigara dumanı

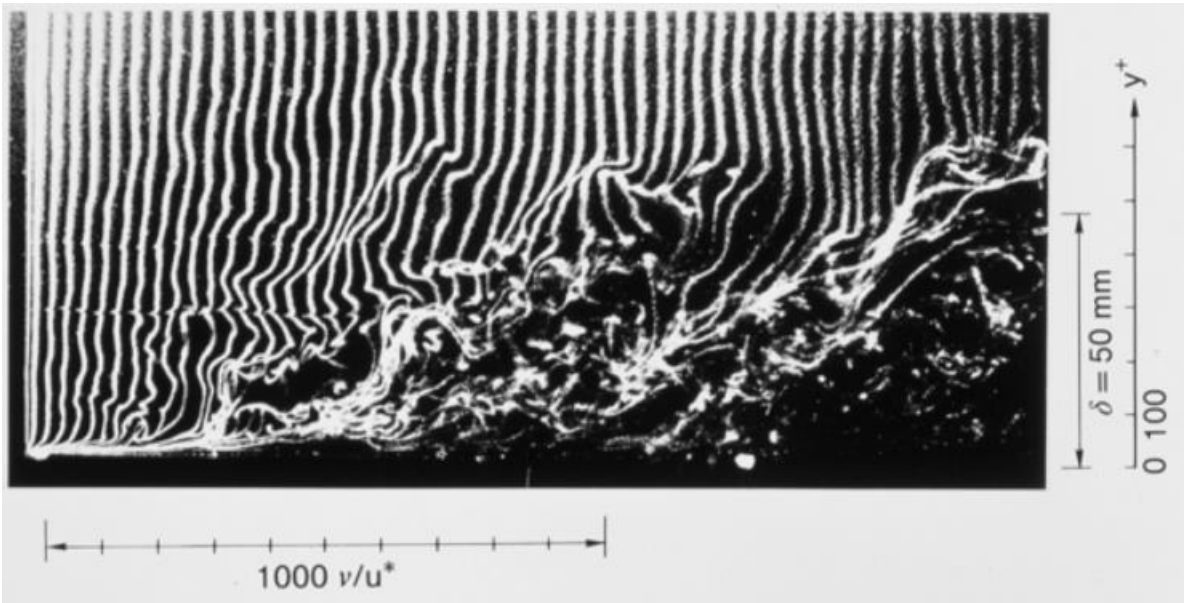
Akış türbülanslı hale geldiğinde türbülans, akışkanın yönelimini (hız ve yön) güçlü bir şekilde değiştirerek akışkanın daha karışık hale gelmesini sağlar. Isı ve diğer maddelerin transferi de laminer akışa kıyasla önemli ölçüde artar. Şekil 4 ve Şekil 5, bir duvar yakınındaki akışın görselleştirme deneyidir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, A ve B arasında anlık işaretler halinde işaret çizgileri oluşturularak ve işaret çizgilerindeki değişimi takip edilerek akışkanın durumu görülebilir.



Şekil 3 İşaretleme çizgisinin değiştirilmesi



Şekil 4 Laminer akış örneği (Tokai Üniversitesi'nden Emeritus Profesör Yasuyoshi Nakayama)

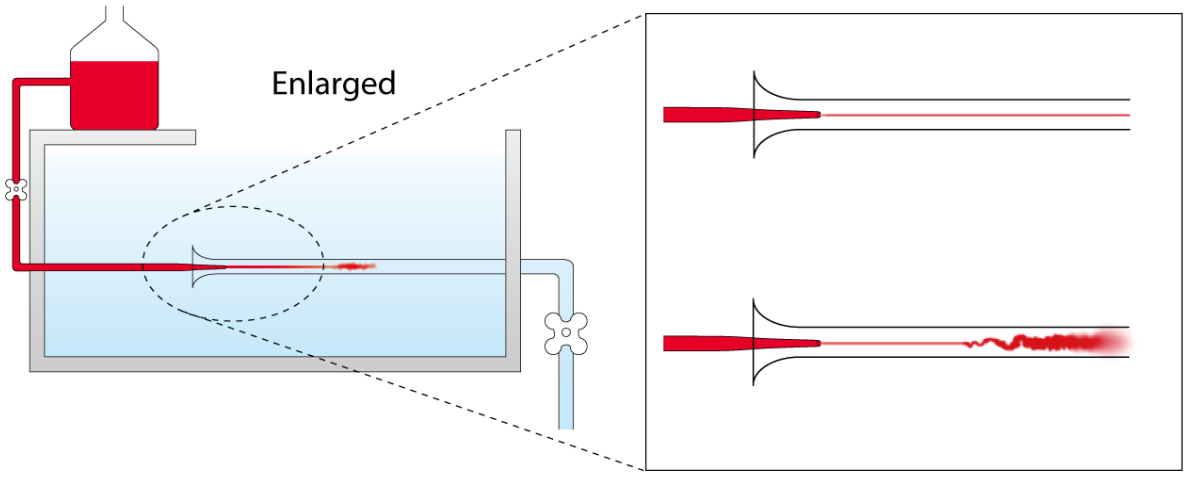


Şekil 5 Türbülanslı akış örneği (Tokyo Üniversitesi Emeritus Profesör Nobuhide Kasagi)

Yukarıdaki Şekil 4 ve Şekil 5, laminer akış ile türbülanslı akış arasındaki özelliklerdeki farkı göstermektedir. Türbülanslı akış, akışta çeşitli boyutlarda girdaplar oluşturur ve bu girdap yapısı, sıvı içinde karışmayı büyük ölçüde kolaylaştırır. Girdapların bu hareketine türbülanslı girdap denir.

Reynolds Sayısı

Laminer ve türbülanslı akış arasındaki ayrım, İngiliz bilim adamı Osborne Reynolds'un 1883'te gerçekleştirdiği aşağıdaki deneyle ortaya konmuştur.



Şekil 6 Reynolds'un boru akış deneyi

Şekil 6'da gösterildiği gibi Reynolds, sabit hızda su akışı olan bir borunun merkezine mürekkep enjekte ederek akışı gözlemledi. Boru çapını (L) ve akışkan hızını (u) deneysel olarak değiştirerek esasen iki farklı akış durumu tespit etti. Biri üstteki şekilde mürekkebin düz bir çizgide aktığı laminer akıştır. Diğeri ise alttaki boruda olduğu gibi mürekkebin bir noktada türbülanslı hale gelerek kanal içerisine karıştığı türbülanslı akıştır.

Ayrıca Reynolds akışın geçişini tahmin etmek için bir denklem geliştirdi; yani Reynolds sayısını aşağıdaki gibi tanımlandı:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}$$

u; Hız [m/s]

L; Karakteristik uzunluk [m]

μ; Viskozite [Pa.s]=[kg/(m.s)]

ρ; Yoğunluk [kg/m3]

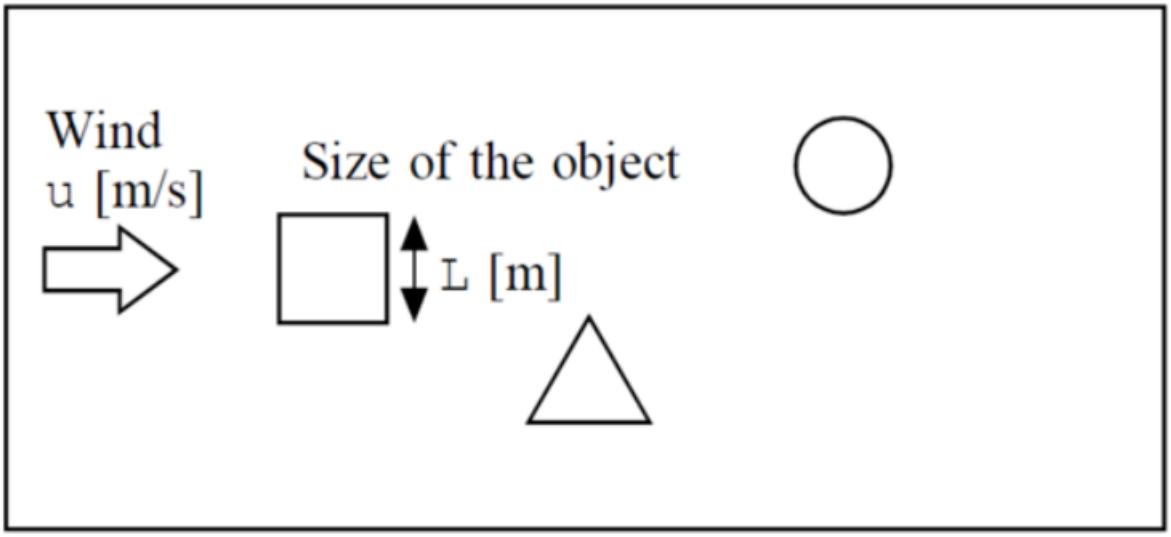
İç akış konularında tahmini gösterge;

Eğer Re < 2000, Laminer Akış

Eğer Re > 2000, Türbülanslı Akış

Bu denklem, eğer L uzunluğu veya u hızı artarsa, akış alanının daha kararsız hale geleceğini ve türbülansın ortaya çıkacağını gösterir. L uzunluğu ve u akış hızı küçükse laminer akış oluştuğu görülmüştür.

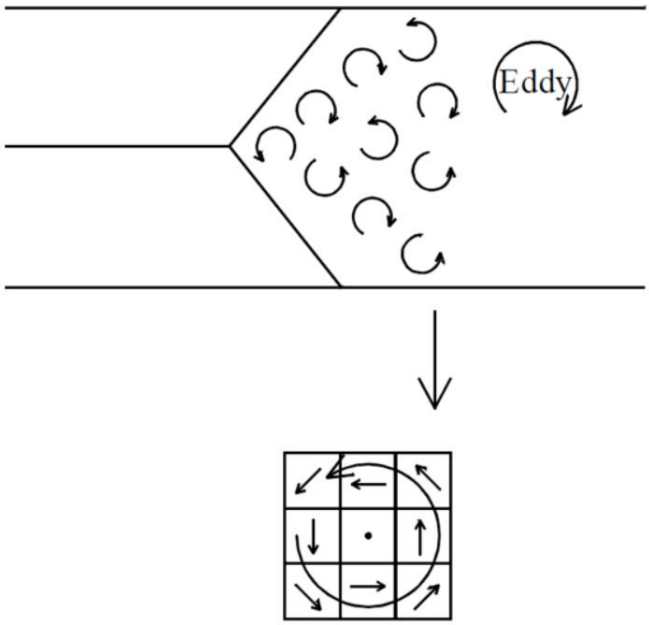
Bir akışın laminer mi yoksa türbülanslı mı olduğuna karar vermek için Reynolds sayısı, nesnenin boyutunun bir analiz hedefinin karakteristik uzunluğu L olarak ve gelen akış hızının u hızı olarak tanımlanmasıyla elde edilir.



Şekil 7 Temsili uzunluk ve hız

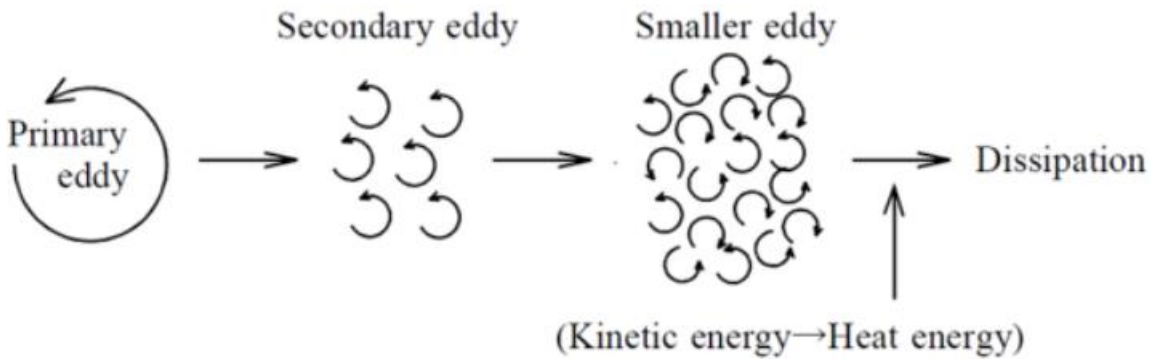
Örneğin, bir kişi bir odada yürüdüğünde, kişinin ortalama boyuna ve havanın özelliklerine bağlı olarak Reynolds sayısı genellikle 200.000 veya daha fazlasına ulaşır. Genel olarak, günlük olarak karşılaşılan akışların çoğunun, elektronik ekipmanın içindeki doğal taşınım gibi bazı istisnalar dışında, türbülanslı akışlar olduğu düşünülmektedir.

Türbülans Girdapları (eddies)



Şekil 8 Türbülanslı bir girdap üzerinde ağ uygulaması

Şekil 8, bir kanal içindeki bir akışkanın türbülanslı bir durumdaki şematik bir görünüşüdür. Momentum değişimini uyaran ve hız dağılımını etkileyen çeşitli boyutlarda girdaplar oluşur. Türbülansı pratikte sayısal olarak analiz etmek için tüm bu girdapların yakalanması gereklidir. Bir girdabın simülasyonu, iki boyutlu olarak temsil edilebilmesi için en az dokuz öğe gerektirir.

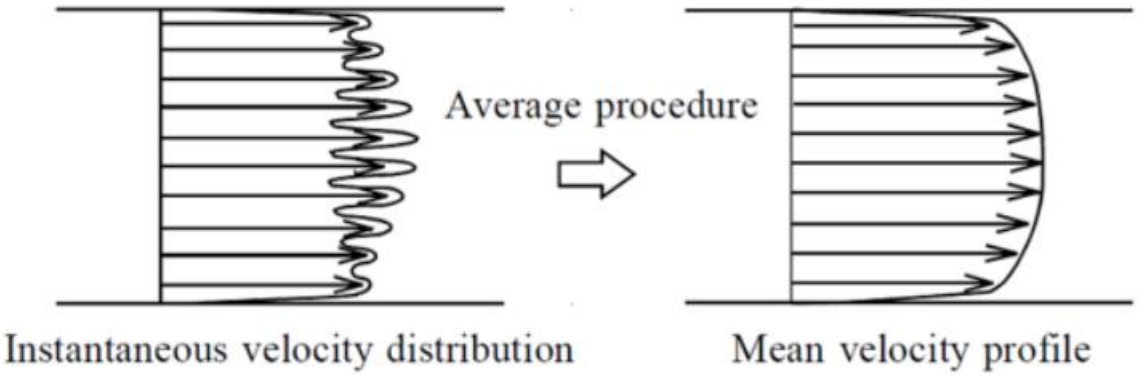


Şekil 9 Girdapların ayrışması

Dahası, girdap bir kez üretildiğinde, çeşitli ölçek seviyelerinde daha küçük girdaplara bölünür ve sonunda viskozite nedeniyle ısı enerjisine dağılır. Girdapların sayısal simülasyonunda, en küçük boyuttaki girdapların bile çözülmesi gerekir; bu nedenle çok büyük ölçekte bir hesaplama ağı gerekli olacaktır. Bu hesaplama yükü ve ağı ile analiz yapılması çok mümkün olmadığından türbülans modelleri kullanılır.

Türbülans Modelleri

Türbülans birçok girdap ve girdaptan oluşan bir dizi olduğundan, bellek ve hesaplama süresi gibi hesaplama kaynaklarını kullanarak türbülanslı akışı doğrudan simüle etmek neredeyse imkansızdır. Ancak çoğu mühendislik uygulamasında elde edilmesi gereken, girdapların mikroskobik yapısı değil, türbülansın ortalama hız dağılımı ve ısı transferine etkisidir. Bu açıdan akış, türbülans modelleme kavramıyla ele alınmıştır. Türbülanslı akışın durumunun ortalaması belirli bir süre içinde (dalgalanmayı yumuşatmaya yetecek kadar uzun) alınırsa, Şekil 10'da gösterildiği gibi ortalama hız profili elde edilebilir. Türbülans modelleme, küçük girdaplardan bağımsız olarak eleman bölünmesini uygular ve ağ elemanlarının sayısını önemli ölçüde azaltır.



Şekil 10 Türbülanslı akışın ortalama prosedürü

Belirlenmesi gereken şey, türbülansın ayrıntılı yapısı değil (bu, diğer taraftan birçok kişi tarafından araştırılmaktadır), türbülanslı akışın ortalama hız ve sıcaklık üzerindeki etkisidir.

Girdapların doğrudan hesaplanması veya bir matematiksel modele bağlı olarak modellenmesi ile oluşturulan türbülans modelleri aşağıdaki gibidir.

RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

Burada açıklanan türbülans modellerine, türbülansın zaman ortalamalı değerleri ve bunlardan sapmalarla ilgilenen, Reynolds-Ortalamalı Navier-Stokes'un kısaltması olan RANS adı verilir.

1. **Yüksek Reynolds Sayılı Türbülans Modeli**
    a. **Standart k-epsilon Denklemleri**
    Bu model uzun süredir standart türbülans modeli olarak kullanılmaktadır.
    b. **RNG k-epsilon modu**
    Bu model için standart k-epsilon modeli, Fourier analizi kullanılarak ampirik sabitlerin analitik olarak bulunmasıyla değiştirilir. Bu model, dönme gerçekleştiren parçaların akışlarını doğrulukla analiz etmek için etkilidir.
    c. **MP k-epsilon modeli**
    Bu model için, standart k-epsilon modeli, durgunluk bölgeleri yakınındaki türbülans denklemindeki kaynak terimin fazla tahmininin ayarlanmasıyla değiştirilir. Durgunluk bölgelerindeki doğruluk nedeniyle bu model, durgunluk etkilerinin önemli olduğu akışların analizinde etkilidir.
    d. **Realizable k-epsilon modeli**
    Bu model için standart k-epsilon modeli, negatif olmayan türbülans enerjisinin uygulanması gibi "gerçekleştirilebilirlik" dikkate alınarak değiştirilir.
2. **Doğrusal Düşük Reynolds Sayılı Türbülans Modeli**
    a. **AKN k-epsilon model**
    Bu model doğrusal düşük Reynolds sayılı türbülans modelidir. Düşük Reynolds sayılı türbülans modelleri genel olarak modellerin karmaşıklığından dolayı duvar etkilerinin önemli olduğu akışları analiz etmek için etkilidir. AKN modeli özellikle ayrılma/yeniden bağlanma akışlarını ve laminer ve türbülanslı akışlar arasındaki geçişleri analiz etmede etkilidir.
    b. **MPAKN k-epsilon model**
    Bu model için AKN modeli, MP k-epsilon modeline benzer şekilde, yani kaynak terimini durgunluk bölgelerine göre ayarlayarak değiştirilir. Bu model, durgunluğun etkilerinin önemli olduğu düşük Reynolds sayılı akışların analizinde etkilidir.
3. **Diğer modeller**
    a. **SST k-omega model**
    K-epsilon modelleri türbülans dağılım hızını çözerken, k-omega modelleri birim enerji başına türbülans dağılım hızını çözer. Bu model, ayrımlı akışları analiz etmek için etkilidir. Bu, scFLOW'un varsayılan türbülanslı modelidir. Kararsız akışı çözmek için SST modelinin değiştirilmiş bir versiyonu olan SST-SAS modeli mevcuttur. SST-V ve SST-2003, SST modelinin aynı zamanda mevcut olan diğer değiştirilmiş versiyonlarıdır.

b. **Spalart-Allmaras 1-equation model**
Bu model girdap-viskozite katsayısı denklemini doğrudan çözer. Bu model, kanat profilleri etrafındaki akış gibi havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Spalart-Allmaras modelinin diğer modifiye edilmiş versiyonları olan SA-fv3 ve SA-neg mevcuttur. SA-fv3, türbülans denkleminde kaynak terimin negatif değerlerini önlemek için tasarlanmıştır. SA-neg, öncelikle, ayrık ortamlarda yeterince çözülmemiş ızgaralar ve fiziksel olmayan geçici durumlarla ilgili sorunları çözmek için geliştirildi. Genel olarak bu model, esasen orijinal modelle aynı sonuçları vermelidir ve daha sağlam olması nedeniyle tavsiye edilir.

c. **LKE k-kl-omega model**
Bu model, k ve omega denklemlerine ek olarak kL, laminer kinetik enerji denklemini çözer. Bu model laminer sınır katmanından türbülanslı sınır katmanına geçişi tahmin etmek için kullanılır.

LES (Large Eddy Simulation)

LES, ağ boyutundan daha büyük olan boyutun türbülansını doğrudan hesaplar. Bu nedenle, aerodinamik ses ve türbülanslı yanma gibi türbülansın kararsızlığının önemli olduğu akışları analiz etmek için etkilidir. Ancak LES, oldukça ince ağların yanı sıra geçici analiz de gerektirdiğinden, hesaplama yükü RANS'tan çok daha ağır olabilir.

1. **Smagorinsky model**
Smagorinsky modeli en basit ve en yaygın kullanılan SGS modelidir. Smagorinsky model sabiti c_s'nin değeri önceden tanımlanmış olmalıdır. Kanal veya boru akışları gibi temsili iç akışlar için c_s =0,1 önerilirken, bluff gövdeleri etrafındaki dış akışlar ve turbomakinelerdeki akışlar için c_s =0,15 önerilir.
2. **Dynamic Smagorinsky model (DSM)**
DSM, sabiti güçlü bir şekilde akış alanlarına bağlı olan, bir duvarın yakınında sonlu bir girdap viskozitesi gösterme ve laminer bir akışta bile sonlu değeri tahmin etme konusunda geleneksel Smagorinsky modelinde yer alan sorunların üstesinden gelir.
3. **WALE model (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity model)**
WALE modelinin özel özelliği, girdap viskozitesinin doğru duvara yakın sınırlama davranışının yeniden üretilebilmesidir; bu, aslında Smagorinsky modelinde sorunlu olarak kabul edilir. Ayrıca Dinamik Smagorinsky modelinden hesaplama maliyeti düşürülebilmektedir.
4. **Coherent-structure Smagorinsky model (CSM)**
Tutarlı yapılı Smagorinsky modeli de Smagorinsky modelinin eksikliğini gidermek için geliştirildi. CSM'nin özelliği WALE modeliyle aynıdır, yani hesaplama maliyeti bastırılabilir ve CSM ayrıca karmaşık geometrilere sahip türbülanslı akış alanlarını bile kolayca çözebilir.

LES'in RANS ile kombinasyonu

RANS ve LES kullanırken her birinin avantajları ve dezavantajları vardır. Özellikle ağ boyutuna odaklanıldığında, duvar yakınındaki ağ boyutu nispeten kaba veya en-boy oranı büyük olsa bile RANS stabildir. Öte yandan, LES türbülanslı sınır katmanında çok ince bir ağ gerektirir ancak duvarlardan uzak alanlarda LES ile bile kararlı hesaplamalar mümkündür. Bu nedenle RANS, duvara yakın

türbülanslı bir sınır tabakasına uygulanırken LES duvardan uzakta uygulanırsa, yöntem pratik uygulamalara çok yardımcı olacaktır.

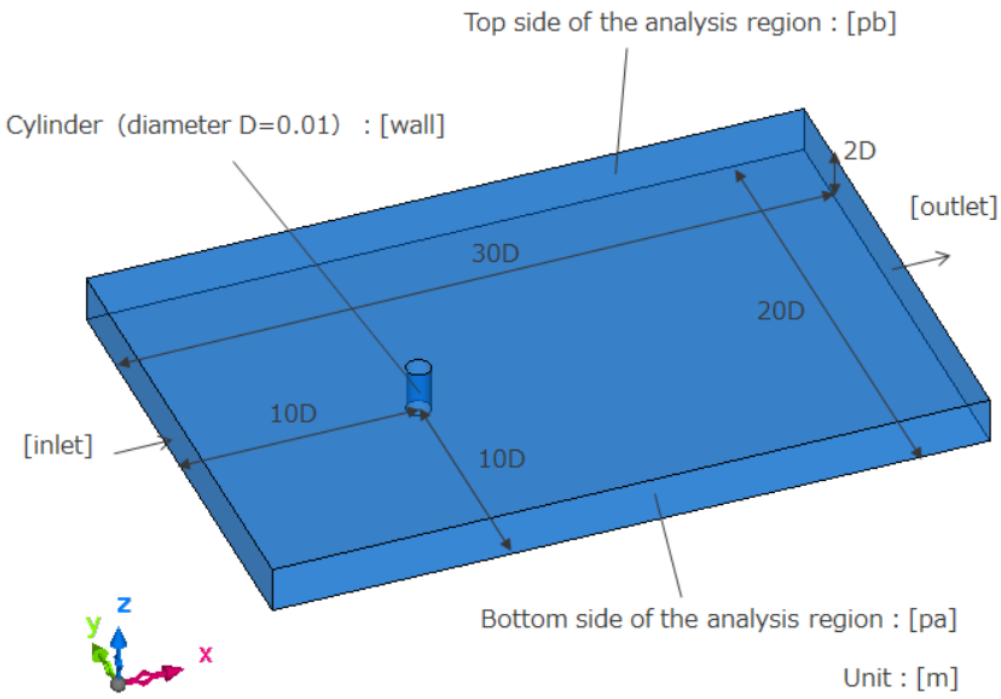
1. **DES (Detached Eddy Simulation)**
   Bu, hem RANS'ın (nispeten kaba ağ ve hafif hesaplama yükü gerektirir) hem de LES'in (hesaplama yükü ağır olmasına rağmen ağ boyutundan daha büyük boyuttaki türbülansı doğrudan ve doğru bir şekilde çözebilir) avantajlarını birleştiren bir yöntemdir. Bu yöntem, hesaplama yükünü azaltmak için duvara yakın bölgeleri RANS ile ve kararsız türbülansı doğru bir şekilde analiz etmek için LES ile uzak duvar bölgelerini hesaplar. Bu model geçici analiz gerektirir ancak duvar yakınındaki ağ sayısı LES'e kıyasla azaltılabilir.
2. **DDES (Delayed DES)**
   DDES, DES'te RANS/LES arasında geçiş için yalnızca ağ boyutuna bağlı olmayan ve RANS modunun her zaman türbülanslı sınır katmanında olmasını garanti eden geliştirilmiş bir modeldir. Başka bir deyişle DDES'te ağ ne kadar ince olursa olsun LES modu hiçbir zaman türbülanslı sınır katmanına girmez.
3. **IDDES (DDES with Improved wall modeling capability)**
   IDDES, DDES'teki RANS/LES anahtarlama yönteminin geliştirilmiş bir modelidir. DDES'ten farklı olarak bu model, türbülanslı sınır katmanındaki ağ boyutu yeterince ince olduğunda türbülanslı sınır katmanını LES modu olarak ele alır. Bu model, RANS/LES geçişi için yalnızca ağ boyutuna bağlı kalmayarak LES moduna DES'ten daha iyi geçiş yapar.

Uygulama Örneği

- K-EPS türbülans modeliyle temsil edilen türbülans modelleri, Reynolds ortalaması adı verilen zaman ortalamalı yöntemi kullanarak ortalama değerler ve dalgalanan bileşenler aracılığıyla geçici olayları hesaplar. Bu türbülans modelleri Reynolds-Ortalamalı momentum koruma denklemine (Navier-Stokes [NS] denklemi) dayandığından, RANS (Reynolds-Ortalamalı Navier-Stokes) olarak anılırlar. RANS, mühendislik alanında en önemli faktörler olan ortalama hız, sıcaklık, sürükleme veya kaldırma kuvvetleri gibi zaman ortalamalı değerlerin tahmin edilmesinde etkili bir analizdir.
- Öte yandan, zaman ortalamalı özelliklerle değerlendirilemeyen pek çok durum vardır. Örneğin, aerodinamik gürültü esas olarak türbülanslı akışın zamansal kararsızlığından kaynaklanır ve zaman ortalamalı özelliklerle ele alınamayan temsili bir örnektir. Bu olaylar türbülanslı olayların özüyle, yani geniş ölçek aralığındaki girdap hareketleri ile yakından ilgilidir. Bu nedenle RANS'tan farklı bir yönteme ihtiyaç vardır.
- Cradle CFD, RANS tarafından analiz edilmesi zor olan son derece kararsız olayları analiz etmek için LES'i kullanır.
- Cradle CFD ayrıca duvarlara yakın bölgelerde RANS'ı ve duvarlardan uzak LES'i kullanan hibrit bir model olan DES, DDES ve IDDES'i de benimser.

Analiz 1-3 Boyutlu Bir Silindirin Aerodinamik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Bir silindire etki eden aerodinamik özellikler, LES kullanılarak geçici türbülanslı akış analizi gerçekleştirilerek değerlendirilir.



Şekil 11 Analiz Modeli

- Çözülmesi gereken denklemler

  - Momentum denklemleri
  - Kütle korunumu (Basınç düzeltme) denklemi

- Analiz türleri

  - Akış (Türbülanslı akış): Türbülanslı akış analiz edilir.

- Malzeme özellikleri

  - [Hesaplamalı Etki Alanı] : hava (sıkıştırılamaz/20C)

- Başlangıç koşulları

  - Hız X yönünde [Bütün bölge] : 15 [m/s]

- Sınır şartları

  - Giriş ve çıkış Giriş [giriş] : Normal Hız 15,0 [m/s]

    Çıkış [çıkış] : Statik basınç (Çıkış) 0,0 [Pa]

  - Duvar kayma gerilimi Duvar yüzeyi [duvar] : Kayma yok
  - Periyodik sınır Periyodik sınır yüzeyi [pa], [pb] : Projeksiyon tipi Düzlem

- Diğerleri

- Türbülans modeli

  LES

- Simülasyonun zamana bağımlılığı

  Geçici analiz

- Matris Çözücüler

  Doğruluk/Kararlılık odaklı

- Döngü sayısı ve zaman adımları

  İlk türbülanslı akış alanını oluşturmak için hesaplama

  Döngü sayısı : 1 - 40.000 [döngü]

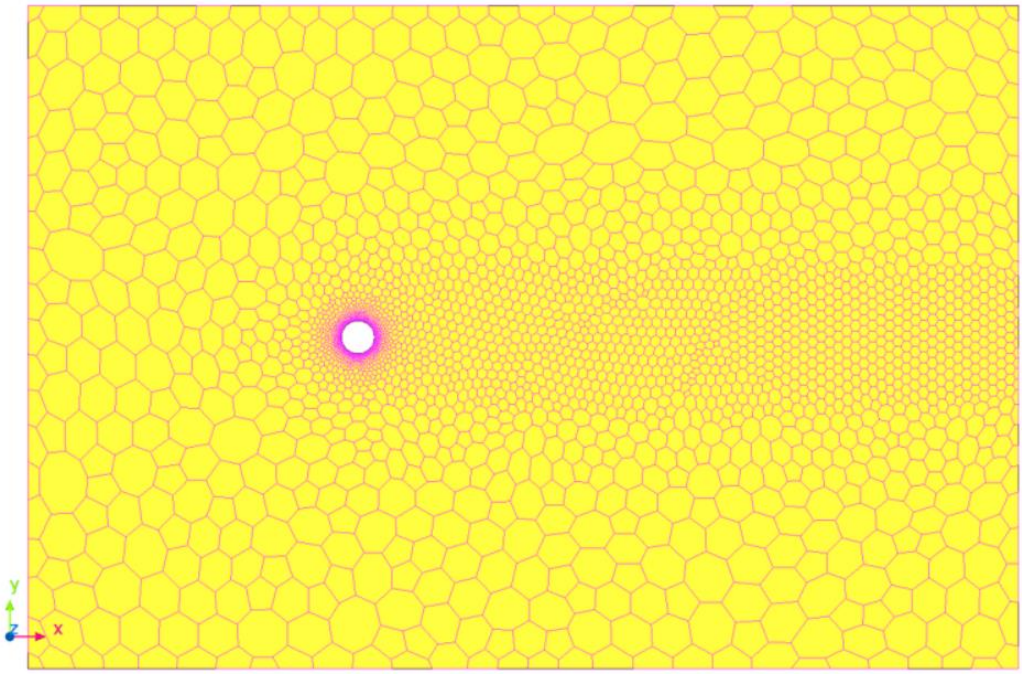
  Başlangıç zaman adımı: 1,0×10-6 [s]

  Courent numarası : 5.0

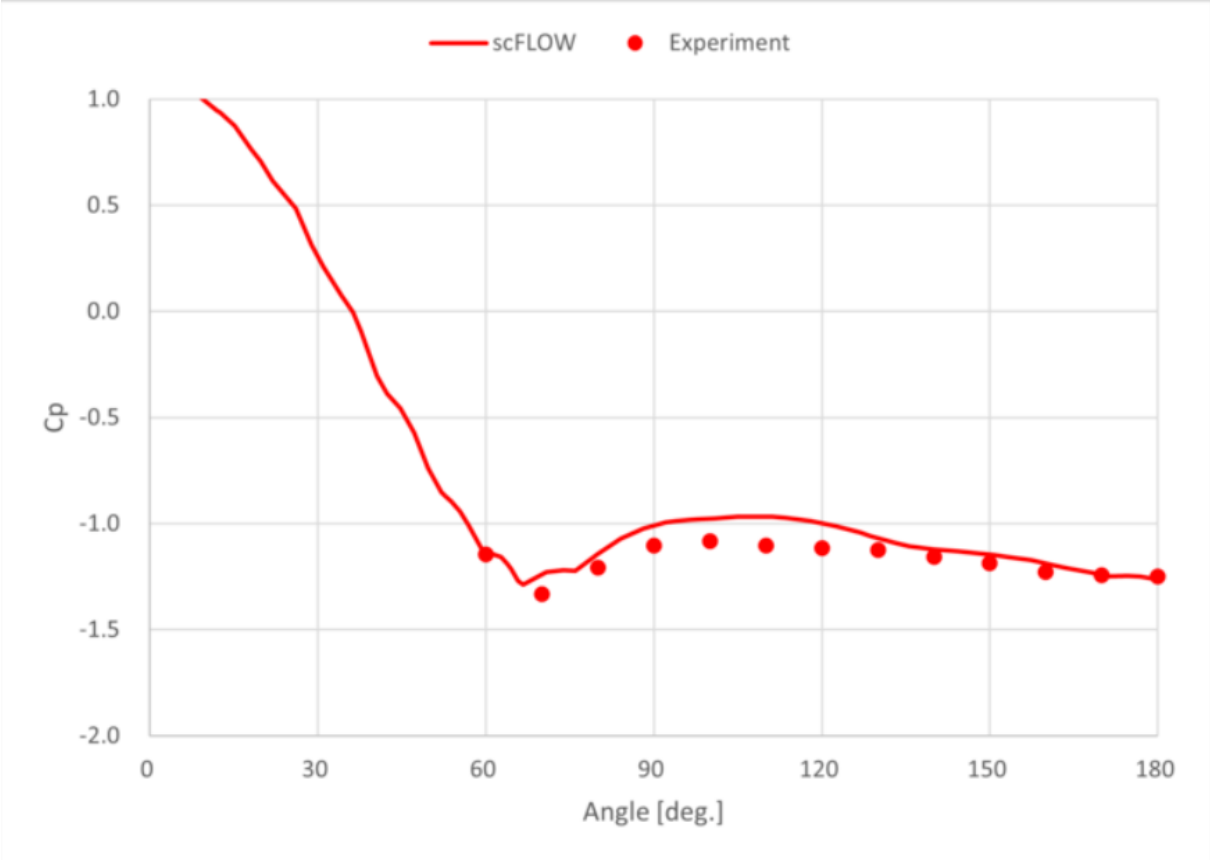
- Örnekleme hesaplaması

  Döngü sayısı : 40.001 - 80.000 [döngü]

  Sabit zaman adımı: 2,0×10-6 [s]



Şekil 12 Ağ Yapısı



Şekil 13 Silindir etrafındaki Z = 0,01 [m] kesitindeki basınç katsayısı (Cp) profili

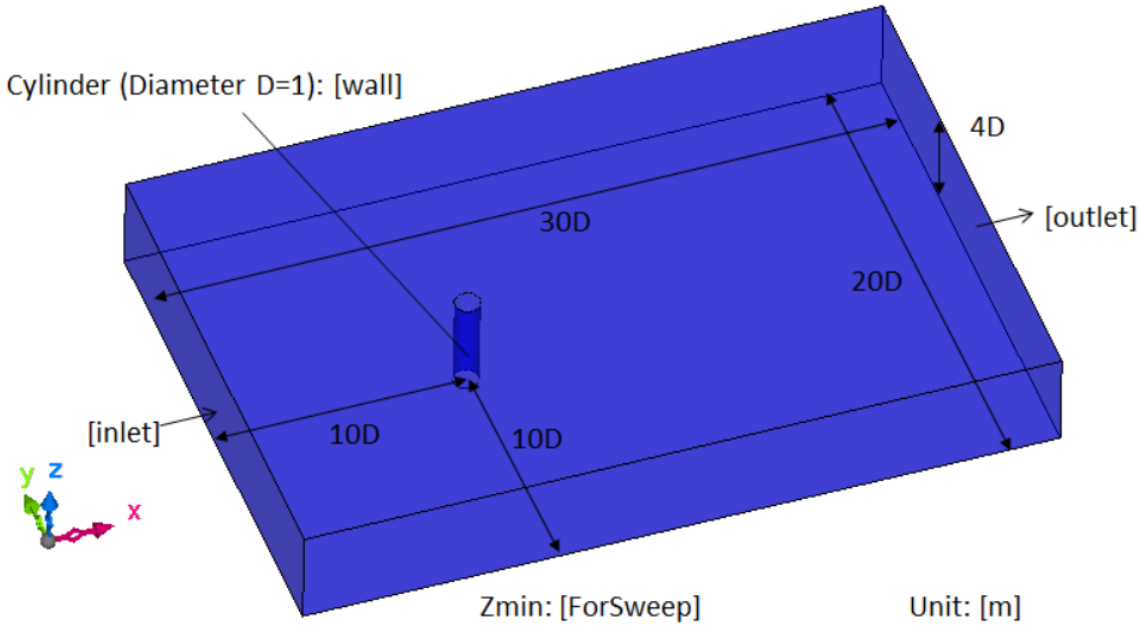
LES türbülans modeli kullanılarak **Kaynakça** 3 numaralı bölümden elde edilen deneysel verilerle sonuçlar karşılaştırılmış olup >%5 altında bir hata ile deneysel verilerle analiz neticesinde elde edilen veriler örtüşmüştür.

Tablo 1 Srütünme katsayısı ve Strouhal number

	Cd	St(Strouhal number)
Cradle CFD	1.29	0.183
Kato et al. [1]	1.15	0.2
Inagaki et al. [2](Cs = 0.15)	1.19	0.21
Inagaki et al. [2](Cs = 0.1)	1.32	0.21
Deneysel	1.1-1.2	0.2-0.21

Analiz 2-DES Kullanılarak 3 Boyutlu Silindirin Akış Analizi

DES, 3 boyutlu bir silindirin akış aşağısında gelişen türbülanslı akış alanını analiz etmek için kullanılır. Sonuç, aynı ağ kullanılarak hesaplanan RANS sonucuyla karşılaştırılır.



Şekil 14 Analiz Modeli

- Çözülmesi gereken denklemler

- Momentum denklemleri
- Kütle korunumu (Basınç düzeltme) denklemi
- K-w denklemleri

- Analiz türleri

- Akış (Türbülanslı akış): Türbülanslı akış analiz edilir.

- Malzeme özellikleri

- [Hesaplamalı Etki Alanı] : Yoğunluk: 100 [kg/m^3]
  Viskozite: 0.0166667 [Pa.s]

- Sınır şartları

- Giriş ve çıkış Giriş [giriş] : Normal Hız 5,0 [m/s]
  Giriş türbülans özellikleri
  Türbülans kinetik enerji 0.015 [m^2/s^2]
  Türbülans yayılım oranı 0.000486 [m^2/s^3]

  Çıkış [çıkış] : Statik basınç (Çıkış) 0,0 [Pa]

- Duvar kayma gerilimi Duvar yüzeyi [duvar] : Kayma yok
- Periyodik sınır Periyodik sınır yüzeyi [pa], [pb] : Projeksiyon tipi Düzlem

- Diğerleri

- Türbülans modeli

  DES (SST k-w), RANS (SST k-w)

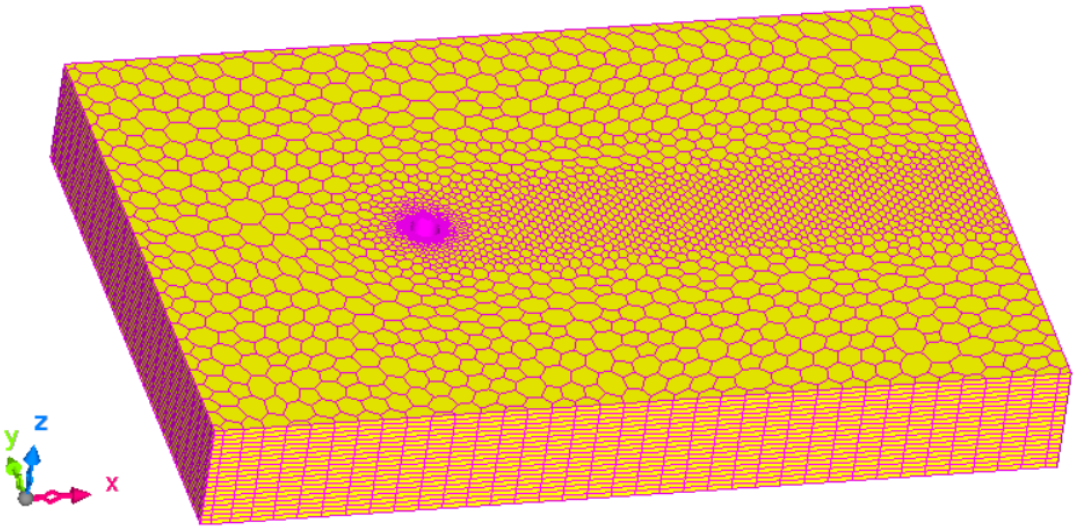
- Simülasyonun zamana bağımlılığı

  Geçici analiz

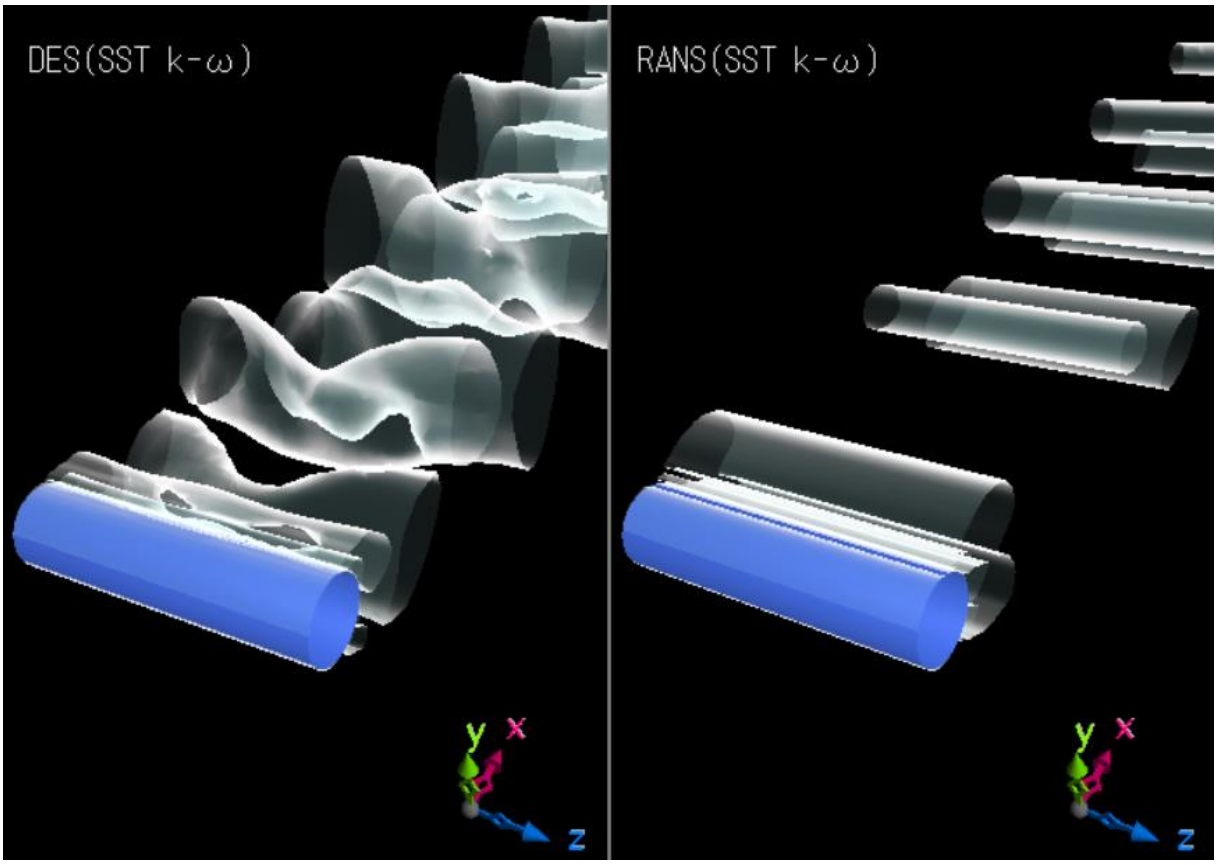
- Döngü sayısı ve zaman adımları

  Döngü sayısı : 5500 [döngü]

  Sabit zaman adımı : 0.003 [s]



Şekil 15 Ağ Yapısı



Şekil 16 Analiz Sonucu (Q kriterinin eş yüzeyi (hız gradyanı tensörünün ikinci değişmezi))

Kaynakça

[1] C. Kato et al., "Numerical prediction of aerodynamic sound by large eddy simulation (1st report, aerodynamic sound radiated from two-dimensional circular cylinder)," Trans. JSME (B), Vol. 60, No.569, (1994), pp.126 - 132 (in Japanese).

[2] Inagaki et al., Predictions of wall-pressure fluctuation in separated complex flows with improved LES and quasi-DNS, 3rd Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, Sendai, Vol.Ⅲ, (2003), pp.941 - 946.

[3] M. Miyata and T. Okuyama, Some methods for drag reduction of circular cylinder in uniform flow, Proc. of JSFM Symp. on Turbulent Flows, (1997), pp.147 - 148 (in Japanese).

[4] Kato M. and Launder B.E. "The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders", Ninth symposium on turbulent shear flows, 10-4, (1993).

[5] Shih T.H., et al., "A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows", Computers Fluids Vol.24, No. 3,pp.227-238, (1995).

[6] Daiguji H., et al.(ed.)., "Computational Fluid Dynamics Models and Methods of Calculation for Turbulence", University of Tokyo Press, pp.334-335, (1998). (In Japanese)

[7] Abe K., Nagano Y. and Kondoh T., "A k-ε model designed with application to turbulence fields accompanied by separation and reattachment," in Japan Society of Mechanical Engineers Collected Articles, Series B, Vol. 58, No. 554, pp.3003-3010, (1992). (In Japanese)

[8] Murakami S., et al., "New low-Reynolds-number k-ε model including damping effect due to buoyancy in a stratified flow field," in International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 16, pp.3483-3496, (1996).

[9] Cradle CFD User's Guide - Turbulent Flow