



EuroCC@Türkiye

Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği Yaz Okulu

Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği'ne Giriş

Doç. Dr. Nilay Sezer Uzol



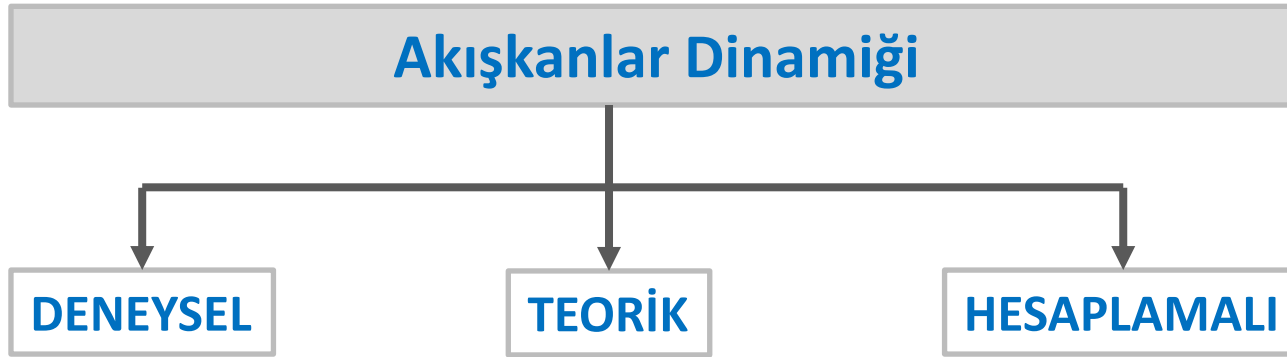
ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü

9 Ağustos 2021

İçerik

- Giriş
- Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)
- HAD Simülasyon Adımları
- Temel Akışkanlar Dinamiği Denklemleri: Navier-Stokes Denklemleri
- Türbülans Modelleme
- HAD: Model Denklemler & Sayısal Yöntemler
- Ön-İşlem: Çözüm Ağları
- Art-İşlem: Görüntüleme
- Yüksek Başarımlı Hesaplama (YBH)
- HAD Yazılımları
- HAD Simülasyon Örnekleri
- 2030 HAD Vizyon Yol Haritası
- Referanslar

AKIŞKANLAR DİNAMIĞI



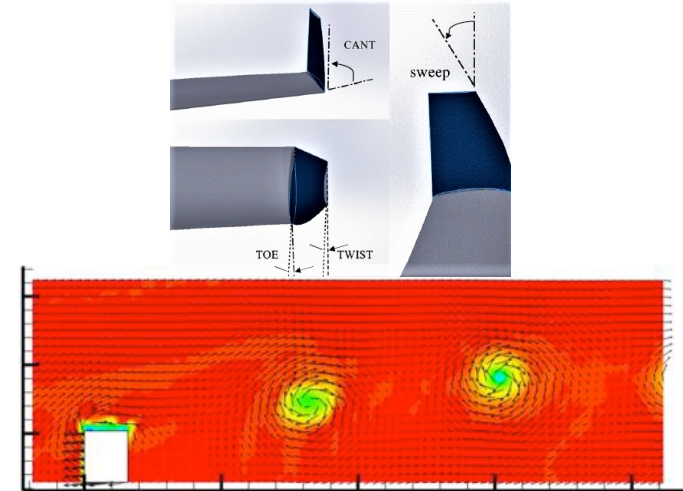
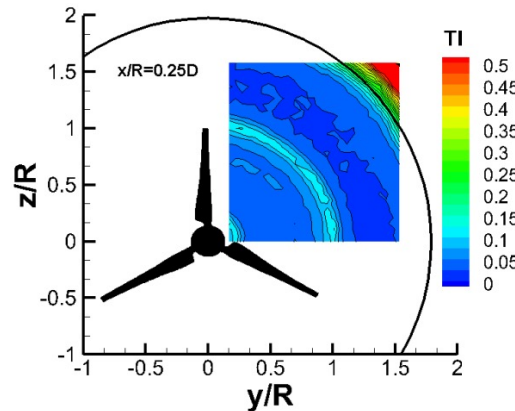
AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

DENEYSEL

- **Deneysel Akışkanlar Dinamiği**
 - Bazı verilerin ölçümü (basınç, hız, kuvvet, sıcaklık, ...)
 - Akış koşullarını sağlama zorluğu (Mach sayısı, Reynolds sayısı, ...)
 - Uzayda sınırlı noktada veri toplanabilir
 - “Herkes deneysel sonuçlara inanır, veriyi ölçen kişi hariç!”



Anas, Anik, Uzol, 2015



Ostavan & Uzol, 2016

AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

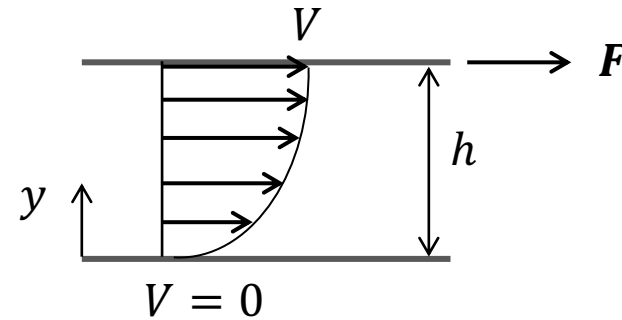
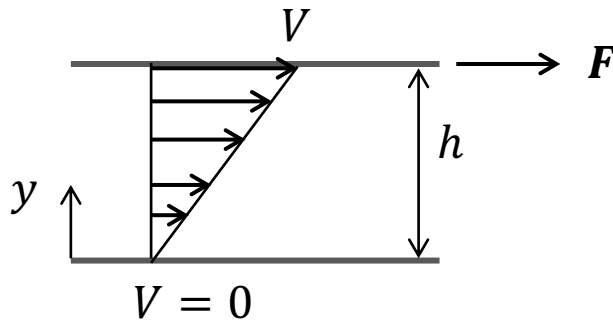
TEORİK

• Teorik Akışkanlar Dinamiği

- Temel eğilimleri görmeye yardımcı olur
- Yeni teoriler geliştirmek zor
- Genellikle, önemli basitleştirmeler gerekir (doğrusal teori, basit geometri, ...)

Kutta-Joukowski Teorem: $L = \rho \Gamma U_\infty$

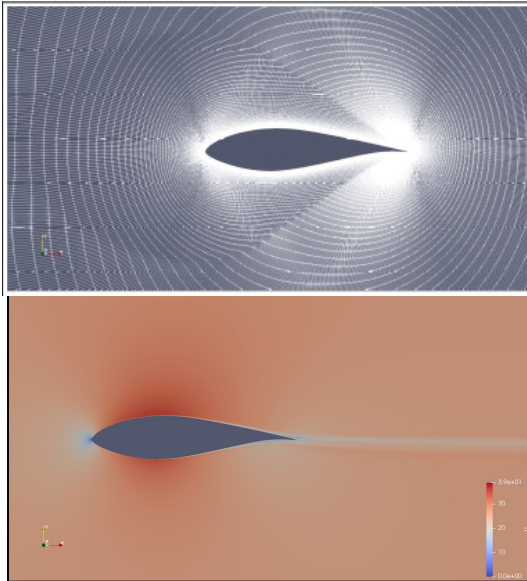
İki Paralel Plaka Arasındaki Akış: $\tau = \mu \frac{dV}{dy}$



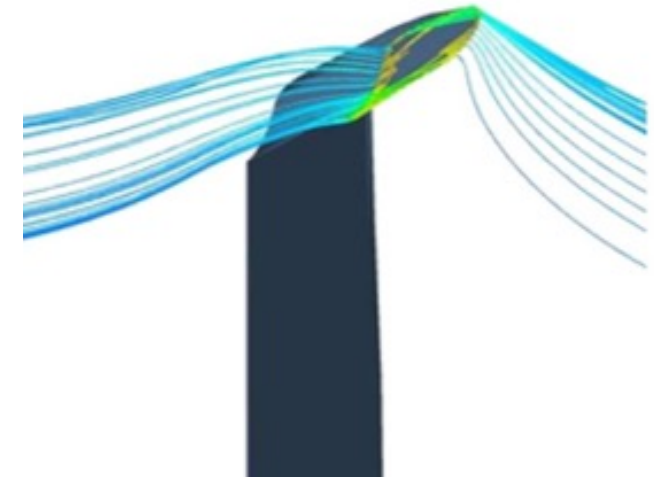
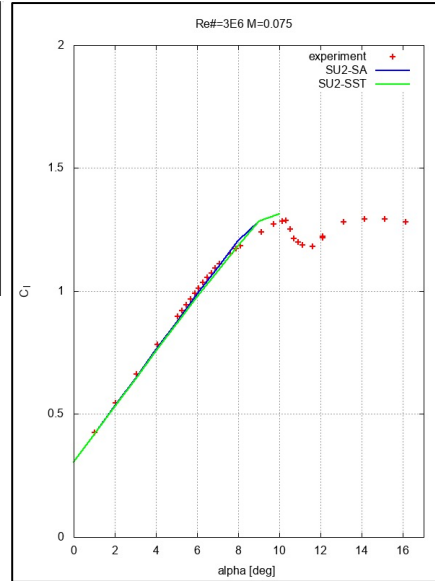
AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

HESAPLAMALI

- Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği – HAD (**Computational Fluid Dynamics – CFD**)
 - Akış alanının her noktasında veri elde edilir (eğer doğru çözüm ise..)
 - “Sayısal sonuçlara inanan tek kişi, kodu çalıştıran kişidir!”
 - HAD sonuçlarının **karşılaştırılması** ve **doğrulama** önemlidir: **Verification and Validation**



Aslan, Orbay-Akcengiz, Sezer-Uzol, 2021



Elfarrar, Sezer-Uzol, Akmandor, 2011

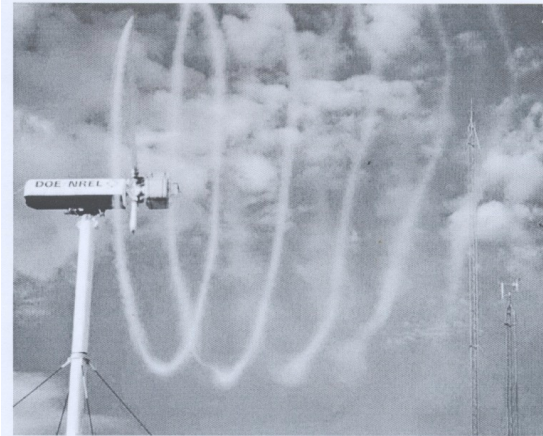
(Oberkampf, Trucano – 2002)

AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

Akışkanlar Dinamiği Problemleri

Navier-Stokes Equations

- 4-boyutlu problem (3-boyutlu uzay & zaman)
- Karmaşık Geometri: Gerçek uçak geometrileri oldukça karmaşık!
- Karmaşık Fizik Modeli: Zamana bağlı, sıkıştırılabilir, şok dalgaları, türbülans, yanma, doğrusal/doğrusal olmayan, süreklilik/moleküler ...
- Türbülans: varolan en önemli ve en zor fizik problemlerinden biri!
 - 1 Milyon Dolar Ödül, Mayıs 2000 (<https://www.claymath.org/millennium-problems/navier-stokes-equation>)



HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği

- Geometri & Fizik & Hesaplama Gücü arasında denge ihtiyacı:
 - BASİT **geometri** ile KARMAŞIK **fizik** çözümü
 - KARMAŞIK **geometri** ile BASİT **fizik** çözümü
 - Daha fazla hesaplama gücü ile DAHA FAZLA problem büyüklüğü (daha fazla hücre sayısı veya zaman adımı veya her ikisi)
 - Daha fazla hesaplama gücü ile DAHA KARMAŞIK problem (daha karmaşık geometri veya fizik)
- 2000'lerde : 40 sene önceki Doktora Tezi (1960) → bugünkü HAD ödevleri (2000)!
- 2020'lerde : 20 sene önceki Doktora Tezi (2000) → bugünkü HAD ödevleri (2020)!
- 2020'lerde : Endüstride ön-tasarım fazında HAD analizleri!

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

Akışkanlar/Gaz Dinamiği

Knudsen
Sayısı

- $Kn < 0.01$
- $Kn < 0.1$
- $Kn < 10$
- $Kn > 10$

Sürekli Ortam (*Continuum*)
Kayma (*Slip*) Akışı
Geçiş Akışı (*Transitional*)
Moleküler

$Kn = \lambda/L$
 λ : Ortalama
Serbest Yol

Mach
Sayısı

- $M = 0$
- $M < 1$
- $M = 1$
- $M > 1$
- $M > 5$

Şıkıştırılmaz
Ses Altı
Sonik / Transonik
Ses Üstü / Süpersonik
Hipersonik

$M = V/a$
 a : Ses Hızı

Reynolds
Sayısı

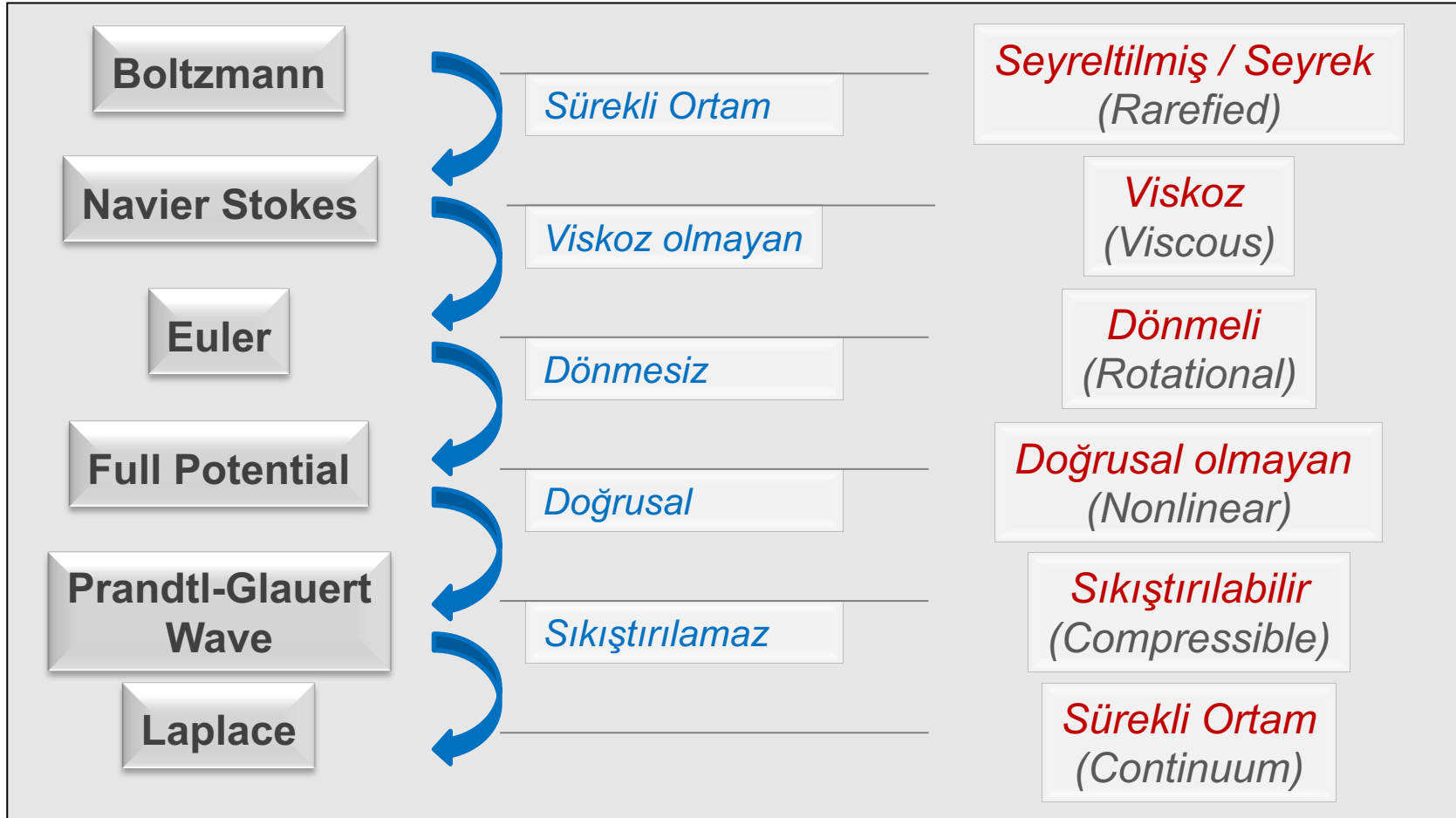
- $Re < 1$
- $Re < 300\ 000$
- $Re > 300\ 000$
- $Re > 1\ 000\ 000$

Sürünen Akış (*Creeping/Stokes*)
Laminer Akış (Düz plaka)
Türbülansa Geçiş (*Transition*) (Düz plaka)
Türbülanslı Akış (Düz plaka)

$Re = \rho VL/\mu$
 μ : Vizkozite

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

Akışkanlar Dinamiği Denklemleri ve Varsayımları

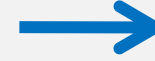


HAD Simülasyon Adımları

Ön-İşlem

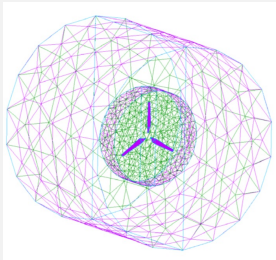
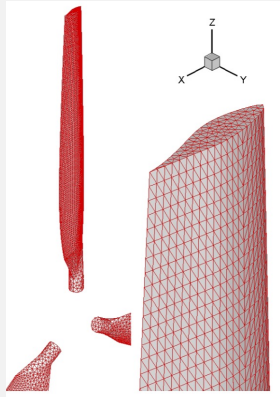
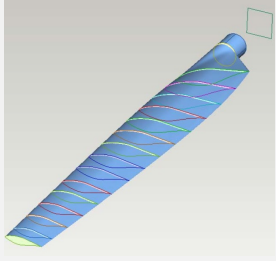


**Hesaplama:
HAD Akış Çözücü**



Art-İşlem

Pre-processing



- **Katı Modelleme**
- **Çözüm Ağı Oluşturma**
Grid Generation
- **Çözüm Ağı Bölünme**
Grid Partitioning

Computation: CFD Solver

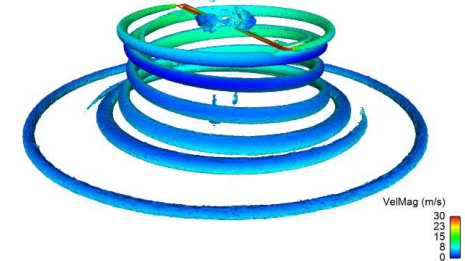
- Temel Akış Denklemleri
- Sayısal Yöntemler
- Türbülans Modelleme

Çözüm: Akış Değişkenlerinin Hesaplanması (hız, basınç, sıcaklık, yoğunluk)

Yüksek Başarımlı Hesaplama (YBH)
High Performance Computing (HPC)

- Paralel Programlama
- Bilgisayar Donanımı ve Algoritmalar

Post-processing



- **Görüntüleme**
Visualization
- Kuvvet ve Moment Hesaplanması

HAD Simülasyon Adımları

- **Temel Akışkanlar Dinamiği** (Varsayımlar) **Matematiksel Model**
- **Sayısal Ayırıklaştırma** (Ayırıklaştırma yaklaşımları)
 - Sonlu Fark
 - Sonlu Hacim **Sayısal Model**
 - Sonlu Eleman, (ve Spektral, Ağsız, vs...)
- **Sayısal Yöntemler** (Yaklaşık çözüm yöntemleri)
 - Zamanda ilerleme yöntemleri (Zamana bağlı problem)
 - Yinelemeli yöntemler (Daimi problem)
 - Akı hesaplama yöntemleri (Sonlu Fark veya Sonlu Hacim)
- **Sınır Koşulları** (Duvar veya Uzak sınırlar, Giriş Koşulları)
- **Çözüm Ağı Oluşturma** (Hesaplama alanı ayırıklaştırma)
- **Görüntüleme** (Akış alanı Çözümü)

Computational Fluid Dynamics >>> Colored Fluid Dynamics

Temel Akışkanlar Dinamiği Denklemleri

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \int_S (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) dS - \int_S (\mathbf{F}_v \cdot \mathbf{n}) dS = 0$$

Navier-Stokes (NS) Denklemleri

- 3-Boyutlu, zamana bağlı, sıkıştırılabilir, viskoz akış, ve hareketli cisim

$$Q = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ \rho e_0 \end{Bmatrix} \quad F_j = \begin{Bmatrix} \rho(u_j - b_j) \\ \rho u_1(u_j - b_j) + p\delta_{1j} \\ \rho u_2(u_j - b_j) + p\delta_{2j} \\ \rho u_3(u_j - b_j) + p\delta_{3j} \\ \rho h_0(u_j - b_j) + pb_j \end{Bmatrix} \quad F_{vj} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{1j} \\ \tau_{2j} \\ \tau_{3j} \\ (u_1\tau_{1j} + u_2\tau_{2j} + u_3\tau_{3j}) - q_j \end{Bmatrix}$$

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} + \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} I_{ij} \quad q_j = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad e_0 = e + \frac{1}{2} \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \quad h_0 = e_0 + \frac{p}{\rho}$$

Ideal Gas Eqn of State:

$$p = \rho RT$$

Sutherland Law:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S}$$

Temel Akışkanlar Dinamiği Denklemleri

Reynolds-Ortalamalı NS Denklemleri

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \int_S (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) dS - \int_S (\mathbf{F}_v \cdot \mathbf{n}) dS = 0$$

RANS Denklemleri

$$\phi = \tilde{\phi} + \phi'$$

Ortalama + Sapma

$$\tilde{\phi}' = 0$$

$$Q = \begin{Bmatrix} \tilde{\rho} \\ \tilde{\rho}\tilde{u}_1 \\ \tilde{\rho}\tilde{u}_2 \\ \tilde{\rho}\tilde{u}_3 \\ \tilde{\rho}\tilde{e}_0 \end{Bmatrix} \quad F_j = \begin{Bmatrix} \tilde{\rho}(\tilde{u}_j - b_j) \\ \tilde{\rho}\tilde{u}_1(\tilde{u}_j - b_j) + \tilde{p}\delta_{1j} \\ \tilde{\rho}\tilde{u}_2(\tilde{u}_j - b_j) + \tilde{p}\delta_{2j} \\ \tilde{\rho}\tilde{u}_3(\tilde{u}_j - b_j) + \tilde{p}\delta_{3j} \\ \tilde{\rho}\tilde{h}_0(\tilde{u}_j - b_j) + \tilde{p}b_j \end{Bmatrix} \quad F_{vj} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tilde{\tau}_{1j} - \tilde{\tau}'_{1j} \\ \tilde{\tau}_{2j} - \tilde{\tau}'_{2j} \\ \tilde{\tau}_{3j} - \tilde{\tau}'_{3j} \\ (\tilde{u}_1\tilde{\tau}_{1j} + \tilde{u}_2\tilde{\tau}_{2j} + \tilde{u}_3\tilde{\tau}_{3j}) - \tilde{q}_j - \tilde{\Theta}'_j \end{Bmatrix}$$

Closure Problem!

$$\tilde{\tau}_{ij} = 2\mu\tilde{S}_{ij} + \lambda \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} I_{ij} \quad \tilde{q}_j = -k \left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} \right) \quad \tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\tilde{\tau}'_{ij} = \tilde{\rho} \overline{u'_i u'_j}$$

Reynolds stresses

$$\tilde{p} = (\gamma - 1)\tilde{\rho}\tilde{e} \quad \tilde{e}_0 = \tilde{e} + \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{u}} \cdot \tilde{\mathbf{u}} \quad \tilde{h}_0 = \tilde{e}_0 + \frac{\tilde{p}}{\tilde{\rho}} \quad \begin{matrix} \tilde{q}'_j \\ \tilde{\Theta}'_j \end{matrix}$$

Temel Akışkanlar Dinamiği Denklemleri

Large Eddy Simulasyon Denklemleri

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \int_S (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) dS - \int_S (\mathbf{F}_v \cdot \mathbf{n}) dS = 0$$

LES Denklemleri

$$Q = \begin{Bmatrix} \bar{\rho} \\ \bar{\rho}\bar{u}_1 \\ \bar{\rho}\bar{u}_2 \\ \bar{\rho}\bar{u}_3 \\ \bar{\rho}\bar{e}_0 \end{Bmatrix} \quad F_j = \begin{Bmatrix} \bar{\rho}(\bar{u}_j - b_j) \\ \bar{\rho}\bar{u}_1(\bar{u}_j - b_j) + \bar{p}\delta_{1j} \\ \bar{\rho}\bar{u}_2(\bar{u}_j - b_j) + \bar{p}\delta_{2j} \\ \bar{\rho}\bar{u}_3(\bar{u}_j - b_j) + \bar{p}\delta_{3j} \\ \bar{\rho}\bar{h}_0(\bar{u}_j - b_j) + \bar{p}b_j \end{Bmatrix} \quad F_{vj} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \bar{\tau}_{1j} - \tau''_{1j} \\ \bar{\tau}_{2j} - \tau''_{2j} \\ \bar{\tau}_{3j} - \tau''_{3j} \\ (\bar{u}_1\bar{\tau}_{1j} + \bar{u}_2\bar{\tau}_{2j} + \bar{u}_3\bar{\tau}_{3j}) - \bar{q}_j - \Theta''_j \end{Bmatrix}$$

Closure Problem!

$$\bar{\tau}_{ij} = 2\mu\bar{S}_{ij} + \lambda \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} I_{ij} \quad \bar{q}_j = -k \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\tau''_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$$

SGS stresses

$$\bar{p} = (\gamma - 1)\bar{\rho}\bar{e} \quad \bar{e}_0 = \bar{e} + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{u}} \quad \bar{h}_0 = \bar{e}_0 + \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}}$$

$$q''_j = \overline{T u_j} - \bar{T} \bar{u}_j$$

$$\Theta''_j = (\bar{u}_1 \tau''_{1j} + \bar{u}_2 \tau''_{2j} + \bar{u}_3 \tau''_{3j}) - q''_j$$

Türbülans Modelleme

- Direct Numerical Simulations (DNS)
 - Bütün ölçekler (*scales*) çözülür

Yüksek Reynolds sayıları için yakın gelecekte pek mümkün değil

- Large Eddy Simulations (LES)
 - Sadece büyük ölçekler çözülür, küçük ölçekler modellenir

Yakın gelecekte pratikte kullanılabilir

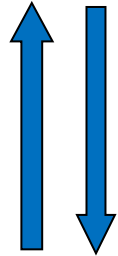
- ⇒ • Detached Eddy Simulations (DES)
 - Hibrit LES-RANS yöntemleri (DES, FSM,...)

- Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)
 - Bütün ölçekler modellenir

- Reynolds Stress Models (RSM) (→ 7 ek denklem)
- 2 – denklemliler (k- ϵ , k- ω ,...)
- 1 – denklemliler (Spalart-Almaras,...)
- Cebirsel Modeller (Baldwin-Lomax,...)

Rutin olarak kullanılır fakat birçok akış için doğru sonuç vermez

Artan Fizik



Azalan İş / Hızlı Çözüm

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

Temel Akışkanlar Dinamiği Denklemleri: Navier-Stokes Denklemleri

- **Denklemlerin Sınıflandırılması:**

- | | | |
|--------------|-----------------------|--------------------|
| ▪ Eliptik | (denge problemleri) | (daimi problemler) |
| ▪ Parabolik | (yayınım problemleri) | (zamana bağlı) |
| ▪ Hiperbolik | (yayıma problemleri) | (zamana bağlı) |

- **Akış Özellikleri:**

- Sıkıştırılmaz
- Yayınım/difüzyon
- Dalga Yayılması

$$A\phi_{xx} + B\phi_{xy} + C\phi_{yy} = D^* \quad \text{PDE}$$

$$B^2 - 4AC < 0$$
$$= 0$$
$$> 0$$

- **Akış Hız Rejimleri:**

- | | |
|------------|---------------|
| ▪ Mach = 0 | Sıkıştırılmaz |
| ▪ Mach < 1 | Subsonik |
| ▪ Mach = 1 | Transonik |
| ▪ Mach > 1 | Süpersonik |
| ▪ Mach > 5 | Hipersonik |

- **Bu farklı akış fiziği problemlerini çözebilen tek bir sayısal yöntem yok!**

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Sonlu Farklar

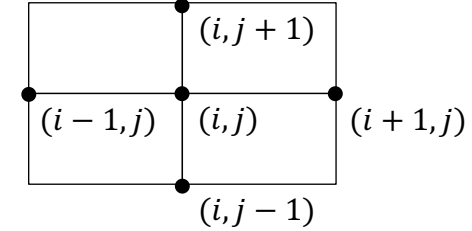
Finite Differences

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = 0$$

Euler (Viskoz olmayan NS) Denklemleri

Diferansiyel Form

FD : İleri Fark
BD : Geri Fark
CD : Merkezi Fark



Sonlu Hacim

Finite Volume

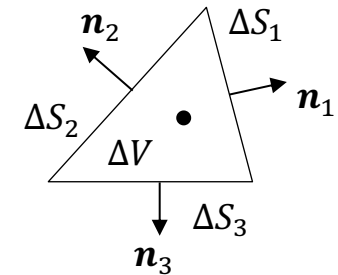
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \int_S (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) dS = 0$$



Hücre merkezli
Köşe nokta merkezli

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \Delta V \quad \sum_{\text{faces}} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) \Delta S$$

Integral Form



HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Sayısal Yöntemler

- Richardson Yinelemeli Yöntemler (1910) – Laplace denklemi çözümü
- Courant, Friedrichs, and Lewy (CFL) (1928)
- Rahatlama (relaxation) Yöntemleri (1940)
- von Neumann (1950)
- SOR (1950)
- ADI (1955)

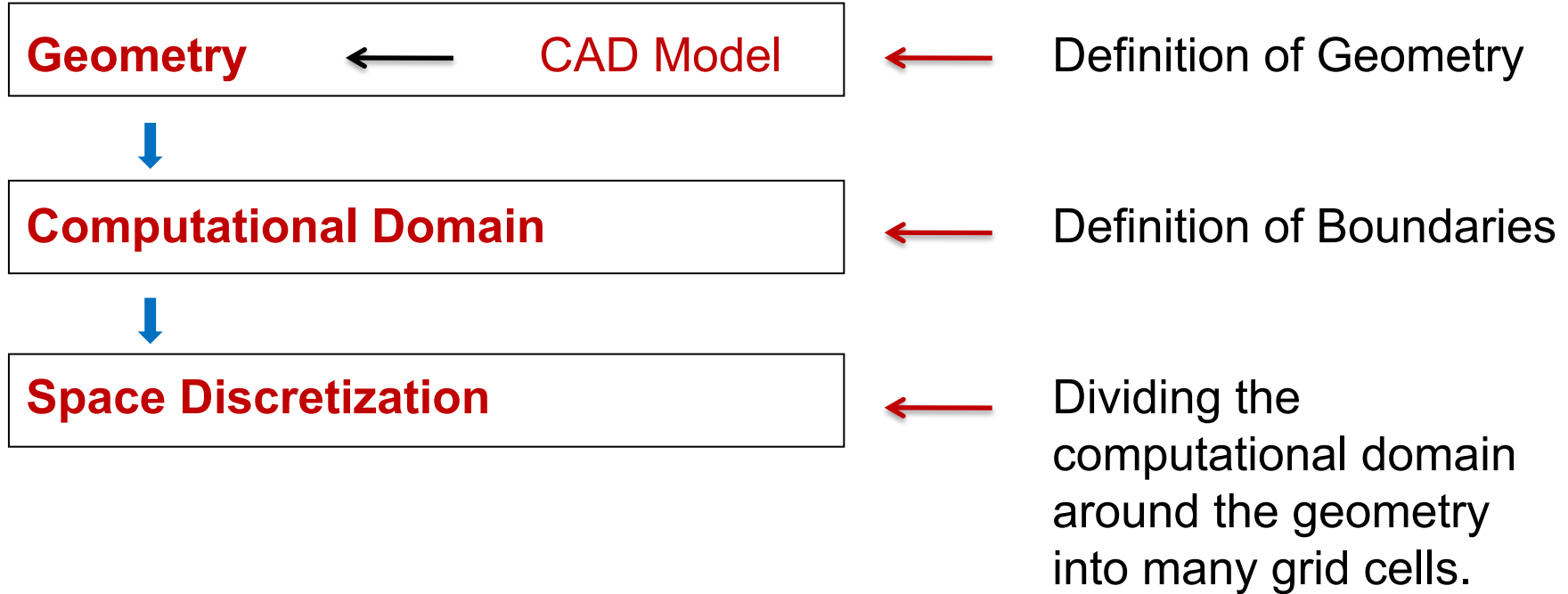
Bilgisayarlar

- Abaküs
- Analitik Makine, Charles Babbage (1833-1870)
- Delikli Kart (1890)
- Dijital Bilgisayarlar (ENIAC 1945)
- Modern Dijital Bilgisayarlar (1965)
- Düşen Bilgisayar Maaliyeti
- Moore Kanunu

➤ Hesaplamalı yöntemler, dijital bilgisayarlardan önce geliştirilip kullanılmıştır!

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

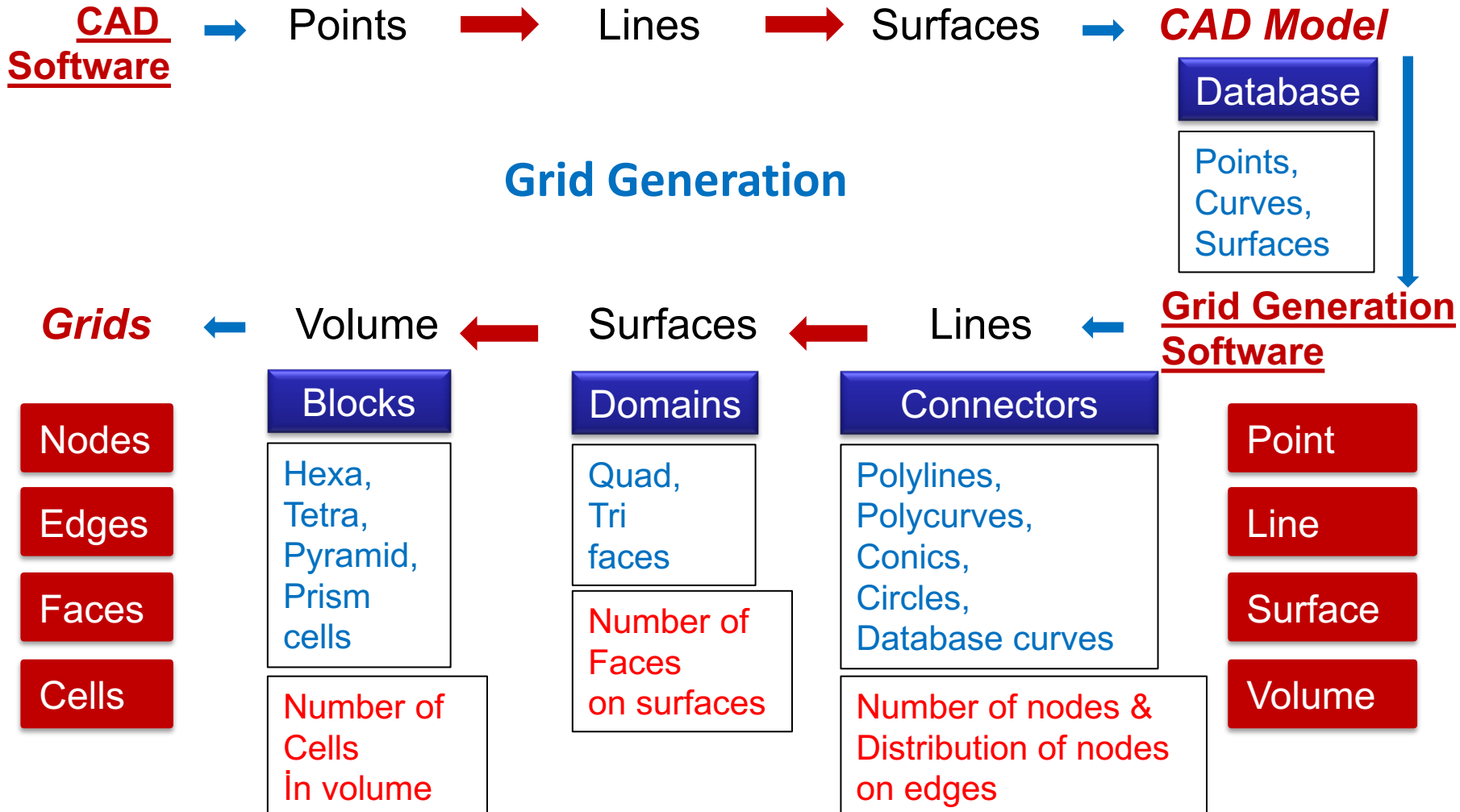
Çözüm Ağı Oluşturma (Grid Generation)





HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Çözüm Ağı Oluşturma (Grid Generation)



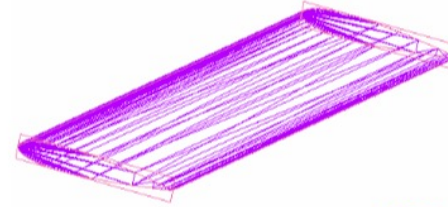
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

Çözüm Ağı Oluşturma (Grid Generation)

Data Hierarchy

DATABASE

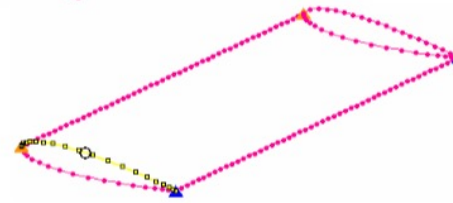
- Create/Input geometry data



- points, curves, surfaces

CONNECTORS

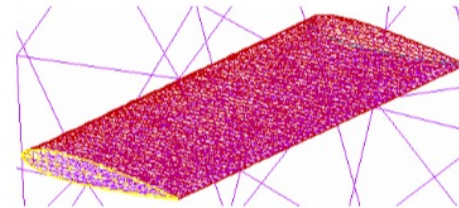
- Create curve grids



- polylines, polycurves, conics, circles, database curves

DOMAINS

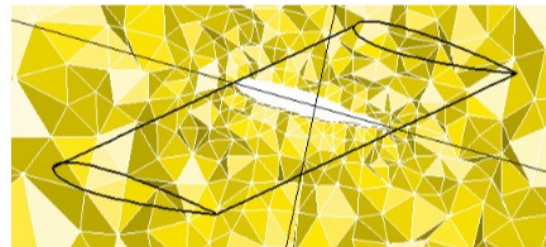
- Create surface grids



- Quadrilateral, triangular faces

BLOCKS

- Create volume grids



- tetrahedral, pyramid, prism, hexahedral cells

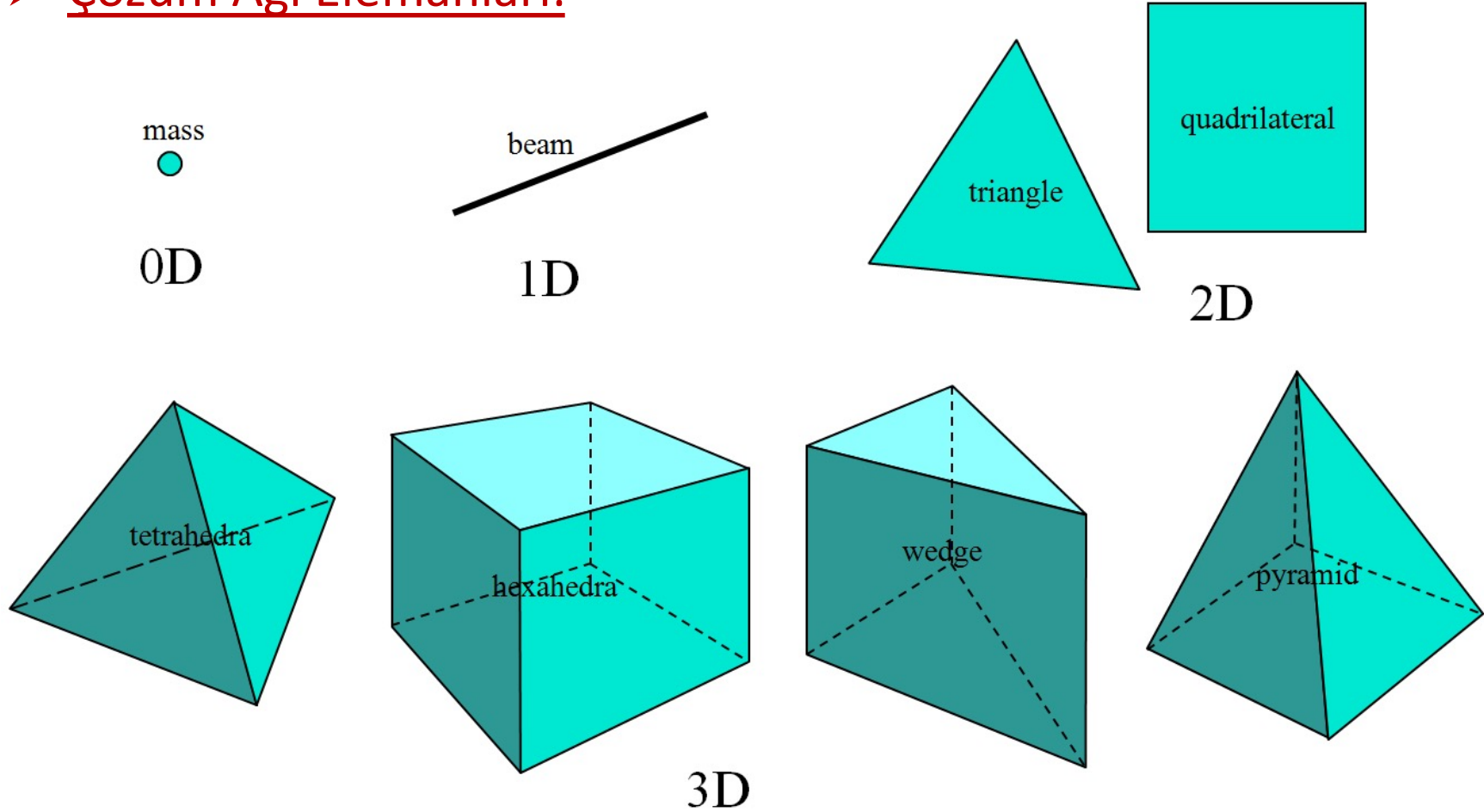
- Select boundary conditions
- Export grid data

Pointwise (Gridgen) Software

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

Çözüm Ağı Oluşturma (Grid Generation)

➤ Çözüm Ağı Elemanları:

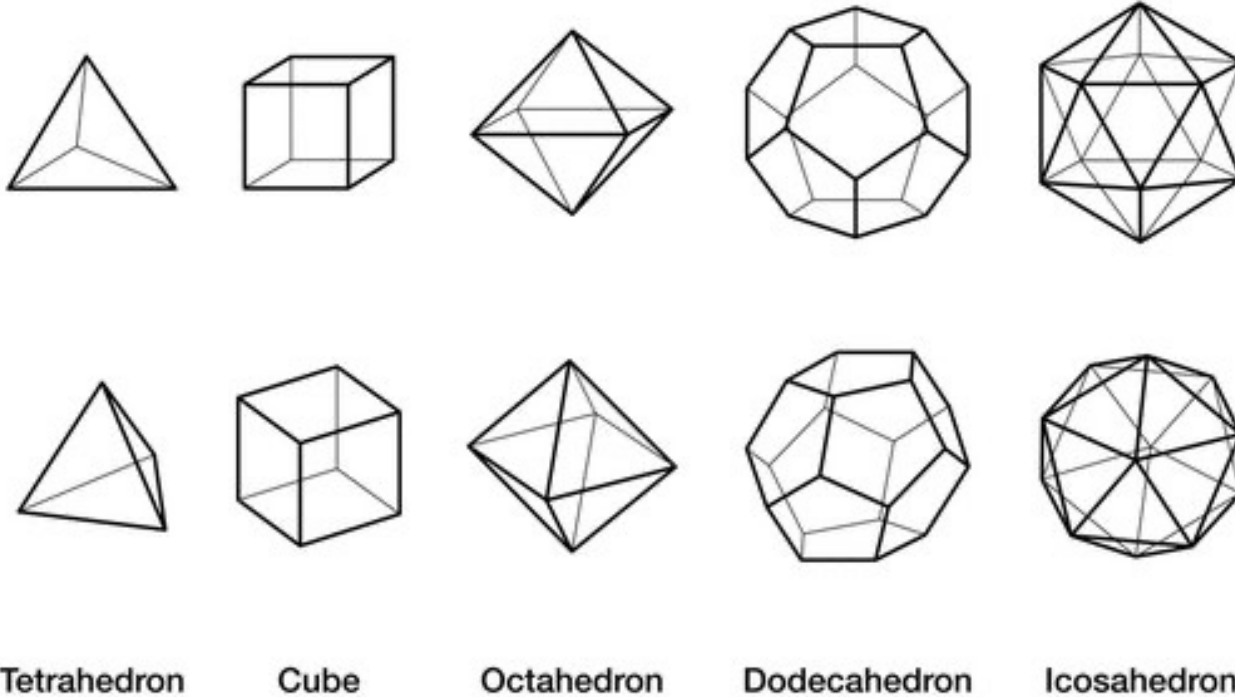


HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

Çözüm Ağı Oluşturma (Grid Generation)

➤ Çözüm Ağı Elemanları:

Polyhedron



$$V + F - E = 2 \text{ (Euler teoremi)}$$

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI

Çözüm Ağı Oluşturma (Grid Generation)

➤ Çözüm Ağı Çeşitleri:

- 2-boyutlu / 3-boyutlu çözüm ağları → Mesh / Grid
- Yapısal çözüm ağı (Structured grids)
- Yapısal olmayan çözüm ağı (Unstructured grids)
- Hibrit çözüm ağları: Yapısal ve Yapısal olmayan
- Çoklu blok (Multi Block) çözüm ağları, Kartezyen çözüm ağları
- Uyarlanabilir (Adaptive) çözüm ağları (Şoklar, Sınır tabaka, Akış kopması, Girdap)
- Hareketli çözüm ağları (Moving grids, Moving bodies)
- Üst üste binen çözüm ağları (Overset grids & Moving boundaries, parts, objects)
- Çözüm ağsız yöntemler (Gridless, Meshless)

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Çözüm Ağı Oluşturma (Grid Generation)

➤ Çözüm Ağı İyileştirme Adımları:

- Çözüm ağı hücre sayısı ve dağılımını inceleme
- Çözüm ağı sıklaştırma (clustering): Sık veya seyrek çözüm ağı bölgeleri oluşturma
- Art-işlem: Yeniden oluşturma / Sıklaştırma / İyileştirme
- Akış çözümü tabanlı çözüm ağı uyarlanabilme

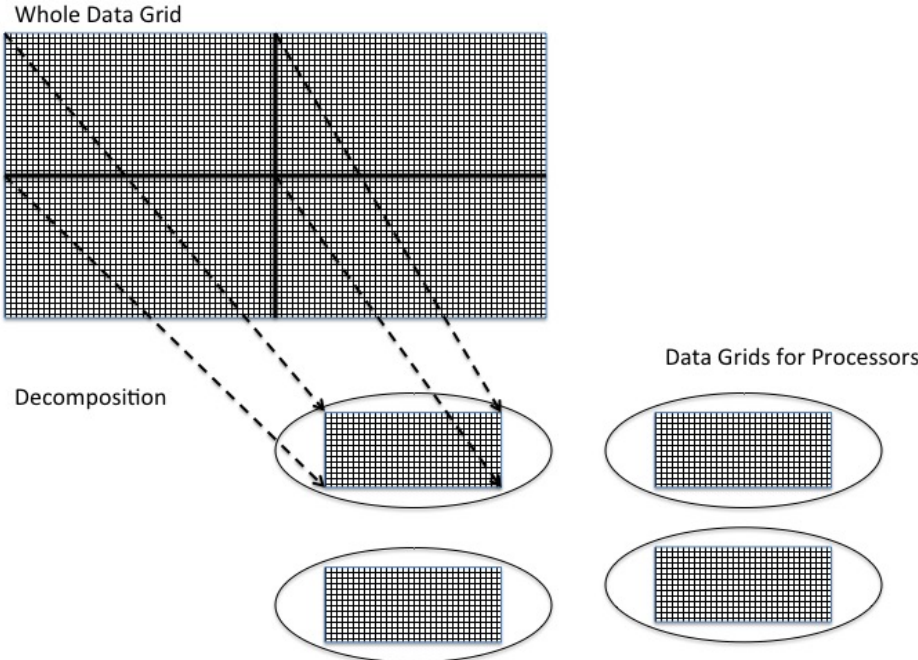
- Otomatik katı modelleme geometri ve otomatik çözüm ağı oluşturma
- Katı modelin temizlenmesi / akış alanının belirlenmesi
- Çözüm ağı oluşturma oldukça uzun zaman alabilir!

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Paralel Hesaplama:

➤ Çözüm Ağı Bölünmesi (Grid Partitioning):

- İşlemci Sayısı: **Nprocs**
- Çözüm ağı hücre sayısı: **Ncells**



- $N_{cells_per_procs} = N_{cells} / N_{procs}$
- Sınır Koşulları
- Komşu işlemciler ile sınırlar

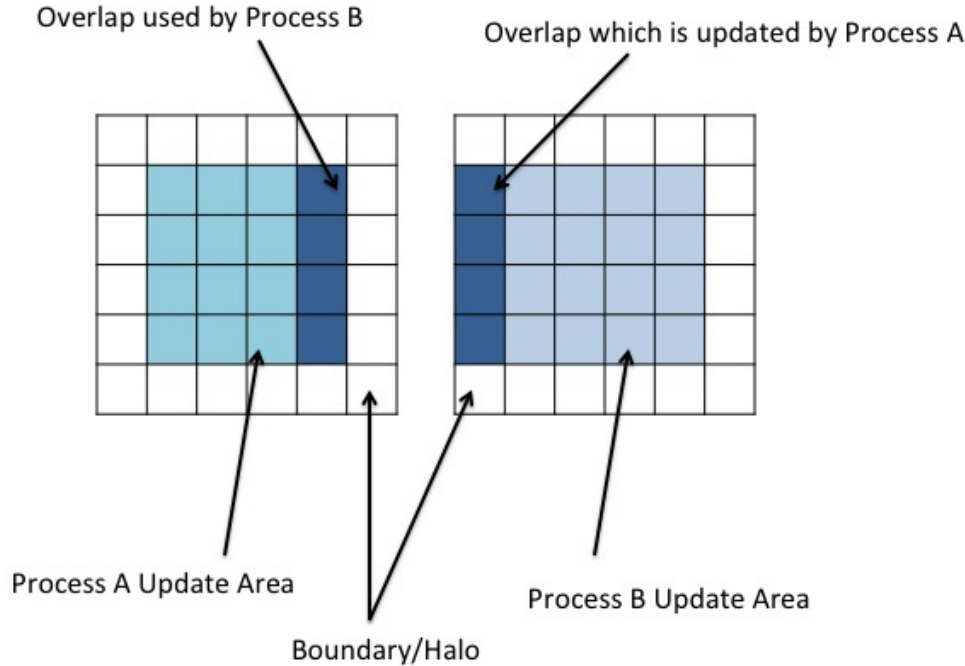
<https://www.archer.ac.uk/training/course-material/2014/09/IntroToARCHER/Exercises/CFD.pdf>

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Paralel Hesaplama:

➤ Paralel Hesaplama (Parallel Computation):

- İşlemci Sayısı: **Nprocs**
- Çözüm ağı hücre sayısı: **Ncells**



- $N_{cells_per_procs} = N_{cells} / N_{procs}$
- Paralel hesaplama
- Komşu işlemciler ile mesajlaşma (MPI)

- Hızlanma Oranı : Speed-up: $S = T_S / T_P$
- Verim : Efficiency: $E = S / P$

<https://www.archer.ac.uk/training/course-material/2014/09/IntroToARCHER/Exercises/CFD.pdf>

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Akış Çözümü ve Görüntüleme

➤ HAD analiz sonuçları ile:

- Akış değişkenleri görüntüleme: hız konturları, basınç konturları, basınç katsayısı dağılımları
- İntegral değişkenlerin hesaplanması: kuvvet ve moment
- Girdap eş-yüzey konturları ile akış görüntüleme
- Sanal gerçeklik (VR) ile akış görüntüleme
- Eş zamanlı Hesaplama Yönlendirmesi (Computational Steering)
- Büyük veri dosyaları: çok büyük çözüm ağları ve/veya çok sayıda zamana bağlı analizlerin çözüm dosyaları
- Art-işlemler için paralel hesaplama ihtiyacı
- Ticari veya Açık art-işlem yazılımları: Tecplot, Enight, Fieldview, Paraview, VisIt

YÜKSEK BAŞARIMLI HESAPLAMA (YBH)

Yüksek Başarımli Hesaplama

- Paralel Hesaplama
- Paralel Bilgisayar
- Paralel Performans:
 - Giga: 10^9 Tera: 10^{12} Peta: 10^{15} Exa: 10^{18}
- Ölçeklenebilir Hesaplama
- Paralel Hesaplama Performansı:
 - Hızlanma Oranı: Speed-up: $S = T_s / T_p$
 - Verim: Efficiency: $E = S / P$ (Load Balance & Communication!)
- Süperbilgisayarlar
- Paralel Programlama Dilleri ve Kütüphaneleri

YÜKSEK BAŞARIMLI HESAPLAMA (YBH)

TOP500 Süper Bilgisayarlar

<http://www.top500.org/>

June 2020: TOP500 List

Rank	System	Cores	Rmax (TFlop/s)	Rpeak (TFlop/s)	Power (kW)
1	Supercomputer Fugaku - Supercomputer Fugaku, A64FX 48C 2.2GHz, Tofu interconnect D, Fujitsu RIKEN Center for Computational Science Japan	7,299,072	415,530.0	513,854.7	28,335
2	Summit - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.07GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	2,414,592	148,600.0	200,794.9	10,096
3	Sierra - IBM Power System AC922, IBM POWER9 22C 3.1GHz, NVIDIA Volta GV100, Dual-rail Mellanox EDR Infiniband, IBM / NVIDIA / Mellanox DOE/NNSA/LLNL United States	1,572,480			
4	Sunway TaihuLight - Sunway MPP, Sunway SW26010 260C 1.45GHz, Sunway, NRCPC National Supercomputing Center in Wuxi China	10,649,600	93,014.6	125,435.9	15,371
5	Tianhe-2A - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692v2 12C 2.2GHz, TH Express-2, Matrix-2000, NUDT National Super Computer Center in Guangzhou China	4,981,760	61,444.5	100,678.7	18,482



1998 1 TFLOPS
 2008 1,026 TFLOPS
 2018 122,300 TFLOPS

2000 5 TFLOPS
 2010 2,566 TFLOPS
 2020 415,530 TFLOPS

415.5 petaflops

Green500 List:

MN-3 Japan (June 2020)
 21.1 gigaflops/watt
 1.62 petaflops

YÜKSEK BAŞARIMLI HESAPLAMA (YBH)

TRUBA Süper Bilgisayarlar

<https://ulakbim.tubitak.gov.tr>

Servers (Sunucular):

Levrek	(Intel Xeon E5-2690 V1)	(single, short, mid1, mid2, long)
Mercan	(AMD Opteron 6176)	(mercan)
Levrekv2	(Intel Xeon E5-2680 V3)	(levrekv2)
Sardalya	(Intel Xeon E5-2690 V4)	(sardalya)
Orkinos	(Intel Xeon E7-4580 V3)	(smp)
Barbun	(Intel Xeon Scalable GOLD 6148)	(barbun, barbun-cuda) (2xNvidia P100 GPU)
Akya	(Intel Xeon Scalable GOLD 6148)	(akya-cuda) (4xNvidia V100 GPU)
...		
Hamsi	(Intel Xeon Gold 6258R)	(hamsi)

YÜKSEK BAŞARIMLI HESAPLAMA (YBH)

TRUBA Süper Bilgisayarlar

<https://ulakbim.tubitak.gov.tr>

Truba Hesapları:

<http://portal.truba.gov.tr/>

- OpenVPN TRUBA-genel.ovpn
- [Putty](#), [WinScp](#), [MobaXterm](#)

\$ ssh username@levrek.ulakbim.gov.tr

\$ ssh username@172.16.7.1

- levrek1 : levrek1.ulakbim.gov.tr / 172.16.7.1
- sardalya1 : sardalya1.ulakbim.gov.tr / 172.16.10.1
- <https://docs.truba.gov.tr/education/CFD/index.html>
- <https://indico.truba.gov.tr/event/44/timetable/?view=standard>

YÜKSEK BAŞARIMLI HESAPLAMA (YBH)

Paralel Programlama

Programlama Dilleri:

- Fortran (F90, HPF)
- C / C++

Paralel Mesajlaşma Kütüphaneleri:

- MPI (CPU, distributed memory)
- OpenMP (CPU, shared memory)
- CUDA (GPGPU) (GPU)

Paralel Mimari ve Algoritmalar:

- SIMD
- MIMD
- Master/Slave model
- Hybrid Architecture

HAD Hesaplama Alanı Bölünmesi (Domain Decomposition / Partitioning):

- Graph Partitioning
- METIS

HAD Yazılımları

Ticari / Açık / Özgün HAD Yazılımları

- ❑ Üniversite: CFL3D, TURNS, PUMA, PMB3D Euler code, HELIFP Full potential code, Vorticity Confinement, YALES2
- ❑ ODTÜ/METU: AeroSIM, FlowSIM, METUDES, In-house codes, *etc.*
- ❑ Araştırma Enstitüleri (USA):
 - OVERFLOW (NASA)
 - FUN3D (NASA)
- ❑ Endüstri (EU):
 - elsA (Eurocopter S.A.S.)
 - FLOWer (Eurocopter Deutschland GmbH)
 - HMB (Westland Helicopters Ltd) and
 - ROSITA (Agusta S.p.a.)
 - Discontinuous Galerkin MTMG approach combined with ENSOLV (NLR)
 - Onera: WAVES
- ❑ Ticari HAD yazılımları
 - Ansys Fluent, CFX
 - Star-CCM+
 - CFD++
- ❑ Açık Kaynaklı HAD yazılımları
 - OpenFoam
 - SU2
 - Code Saturne
 - Basilisk
 - Nektar++

Çözüm Ağı / Görüntüleme Yazılımları

Ticari / Açık / Özgün Yazılımlar

❑ Commercial

- Pointwise
- Ansys Mesher
- ...

- Tecplot
- Fieldview
- Enight

❑ Open source

- Salome
- Gmsh
- ...

- Paraview
- VisIt
- Gnuplot
- pgfplots

Referanslar – *Bazı Kitaplar*

- Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, 2. Baskı, 1997 (1. Baskı 1984), J.C. Tannehill, D.A. Anderson, and R.H. Pletcher.
- Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, 2. Baskı, 2007 (1. Baskı, 1988), C. Hirsch.
- Computational Fluid Dynamics (Vol 1 & Vol 2), 4. Baskı, 2000 (1. Baskı 1989), K.A. Hoffmann & S.T. Chiang.
- Computational Fluid Dynamics, 1. Baskı, 1995, J. Anderson.
- Large Eddy Simulation for Incompressible Flows: An Introduction, 1. Baskı, 2006, P. Sagaut.
- Large Eddy Simulation for Compressible Flows, 1. Baskı, 2009, E. Garnier, N. Adams, P. Sagaut.

Referanslar

- AEE 544 “Advanced Airfoil and Propeller Theory” Course Notes, METU AEE, Spring 2020.
- MAK 488/563 “Computational Fluid Dynamics” Course Notes, TOBB ETU ME, Summer 2015.
- Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, J.C. Tannehill, D.A. Anderson, and R.H. Pletcher, 2. Baskı, 1980.

Doç. Dr. Nilay Sezer Uzol
nuzol@metu.edu.tr