



# Canlı Webinar

20 Mayıs  
Çarşamba  
Saat: 18.00

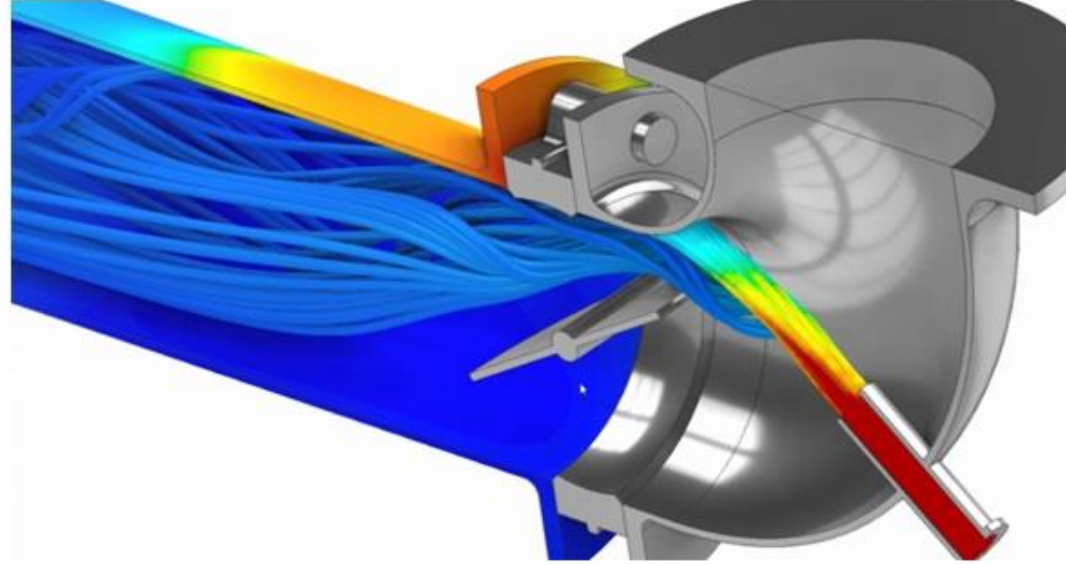
Akışkan-Katı Etkileşimi (FSI: Fluid-Structure Interaction) Eşlenik CFD-FEA Mühendislik Simülasyonları

**Sunucu: Alper Doğan**

Makina Mühendisi  
MMO Ankara Şube Üye  
İlişkileri Birimi  
[alper.dogan@mmo.org.tr](mailto:alper.dogan@mmo.org.tr)

**Eğitmen: Sinan Soğancı**

Makine Mühendisi, MBA  
CAE Takım Lideri ve Ürün Müdürü  
Akana Mühendislik  
[sinansoganci@akana.com.tr](mailto:sinansoganci@akana.com.tr)



**İçerik:**

- FSI nedir?
- Tek ve çift yönlü CFD-FEA eşlenmesi & veri aktarımı
- FSI Uygulama Alanları
- Örnek Vaka Çalışmaları



/mmoankarasb



@mmoankara



@mmoankarasube

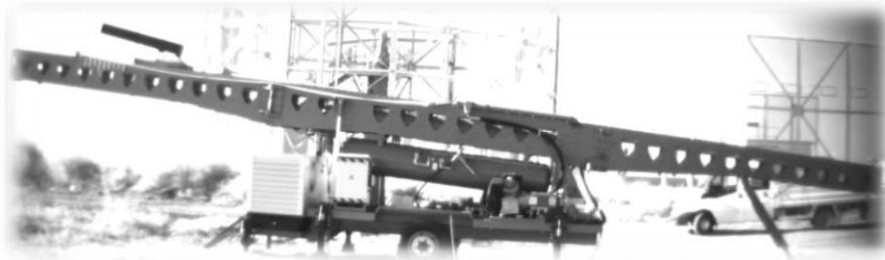


/mmoankarasube

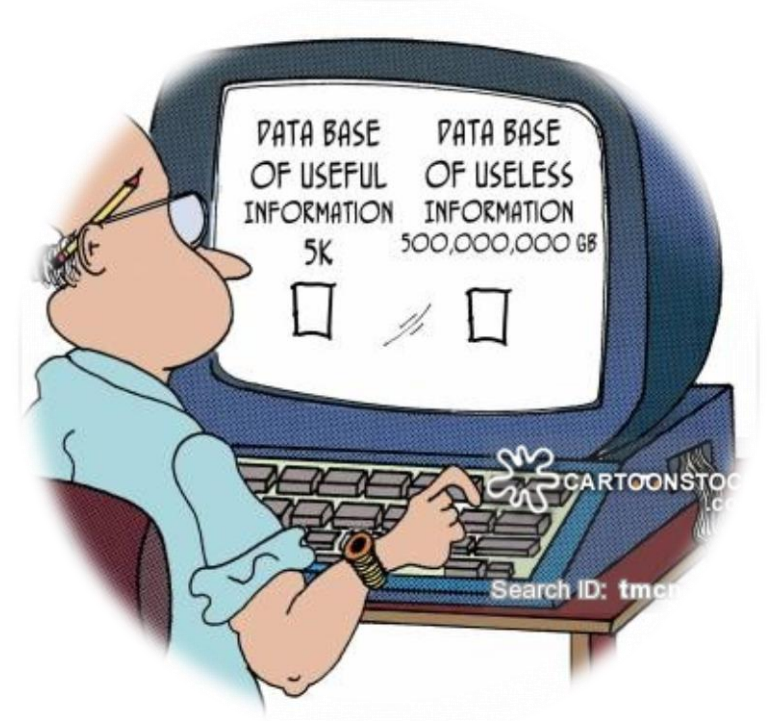
Web: <https://www.mmo.org.tr/ankara>

- **Sinan Soğancı**
  - Makine Mühendisi, MBA
- **Fankom Mühendislik**
  - 2009 – 2015 → FlowVision Türkiye Temsilciliği
- **Capvidia NV (Belçika)**
  - 2015 – 2017 → FlowVision Global Satış, Pazarlama ve Kanal Müdürü
  - 2017 – 2020 → FlowVision Global İş Geliştirme Müdürü
- **MMO Ankara Şube Eğitim Birimi**
  - 2011 – ... → CFD Eğitmeni
- **Akana Mühendislik**
  - 2015 – ... → CAE Takım Lideri
- **IBPSA TR**
  - 2018 – ... → Yönetim Kurulu Üyesi
- **TTMD**
  - 2019 – ... → Yönetim Kurulu Üyesi

- **Milli savunma, havacılık ve uzay sanayii**
  - Stratejik çözüm ortağı
  - Alt sistem tasarımcısı/tedarikçisi
- **Alt sistem ve sistem seviyeleri**
  - Müşteri gereksinimi odaklı tasarım
    - Mekanik, elektromekanik, hidrolik, pnömatik, kontrol, kimyasal süreçler...
  - CFD/FEA analizleri
  - Prototip üretim & test
  - Üretim & kalite kontrol
  - Devreye alma & teknik destek
- **Ar-Ge Merkezi > 40 Teknik Personel**
- **Fabrika > 15.000 m<sup>2</sup>**

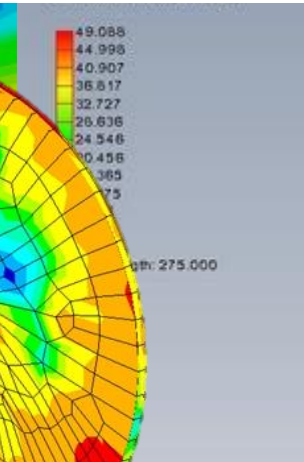
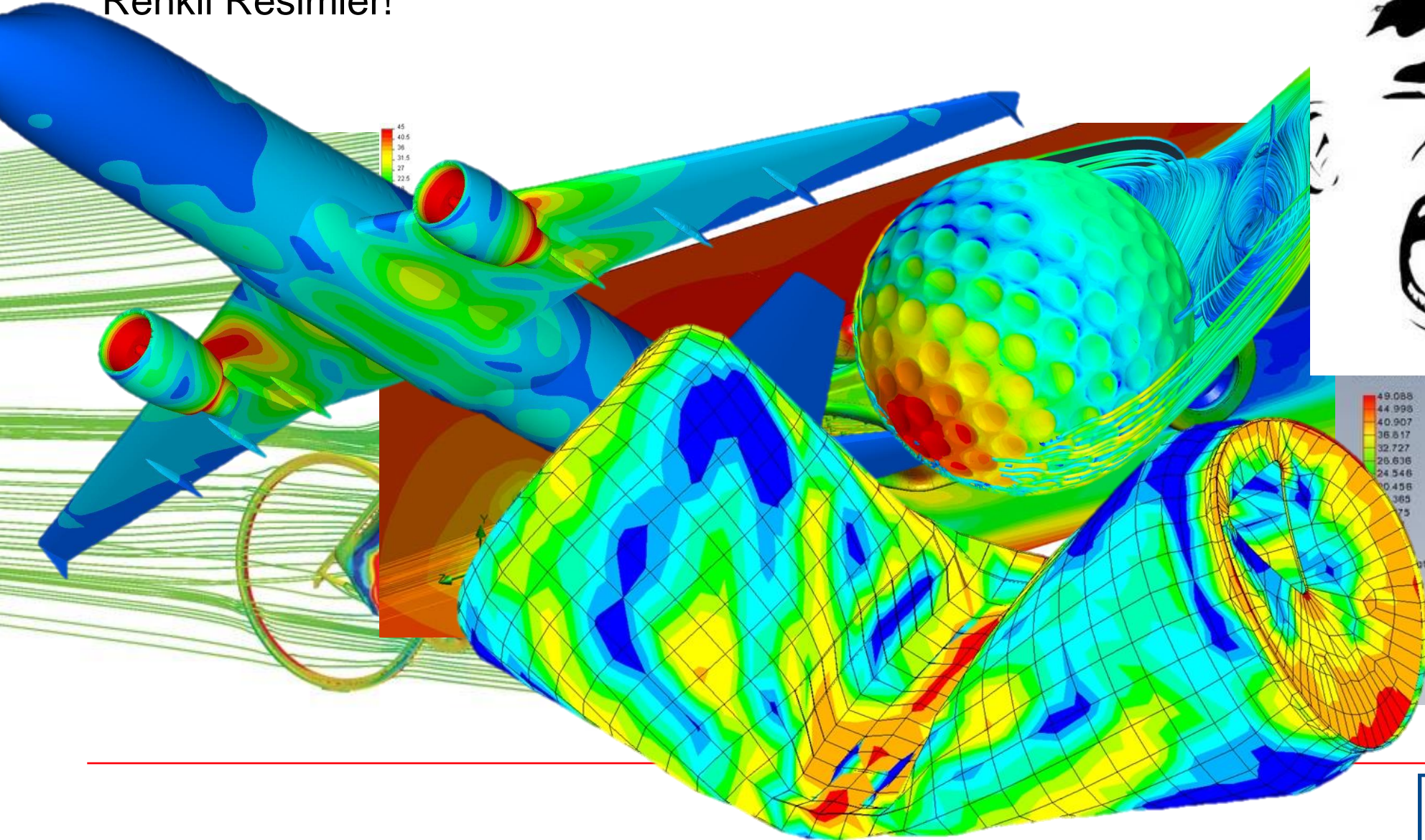


- CFD: **C**omputational **F**luid **D**ynamics
- HAD: **H**esaplamalı **A**kışkanlar **D**inamiği
- FEA: **F**inite **E**lement **A**nalysis (Structural Analysis)
- SEA: **S**onlu **E**lemanlar **A**nalizi (Yapısal Analiz)
- FSI: **F**luid **S**tructure **I**nteraction
- AKE: **A**kışkan **K**atı **E**tkileşimi
- CAE: **C**omputer **A**ided **E**ngineering
- BDM: **B**ilgisayar **D**estekli **M**ühendislik



# CAE Nedir?

Renkli Resimler!



# CAE Nedir?

- Tasarım Aracı?
- Mühendislik Yazılımları
  - Çizim Programlarının Benzeri
  - Kullanımı Çok Zor
  - Akışı / Deformasyonları Gösterir 😊



# CAE Nedir?

- Mühendislik Yazılımları değildir!

Standart bir matematik ortamında yaratılan basit hesaplayıcılardan, kapsamlı paket programlara kadar çeşitli MATEMATİK araçları yardımıyla hesaplamalar gerçekleştirilir.

- Çok Disiplinli Bir Alandır

- Fizik
- Matematik
- Mühendislik(ler)
- Numerik
- Programlama
- Bilgi İşlem

- Tasarım çıktılarını doğrulama ve/veya alternatiflerini karşılaştırma aracıdır.



## Test

- En İyi Doğrulama ve Karşılaştırma Aracı (Çoğunlukla)
- Zor (Bazen İmkansız)
- Pahalı

**Rüzgar Tüneli  
Testlerinin Maliyeti**



**Haftalık > 100.000 USD**

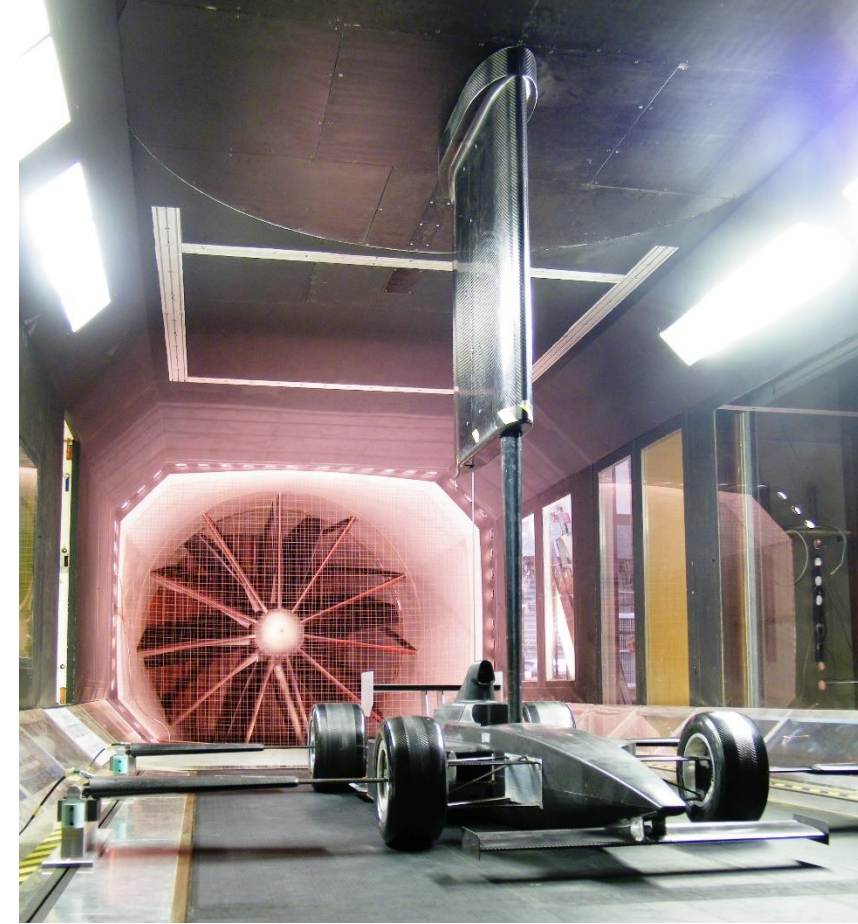
## Analiz

- Bilgisayar Ortamında Test
- Zor (Bazen İmkansız)
- Ucuz (Teste Göre)

**Dış Aerodinamik  
Analiz Maliyeti**



**Yıllık < 100.000 USD**



*The National Wind Tunnel Facility of the United Kingdom*

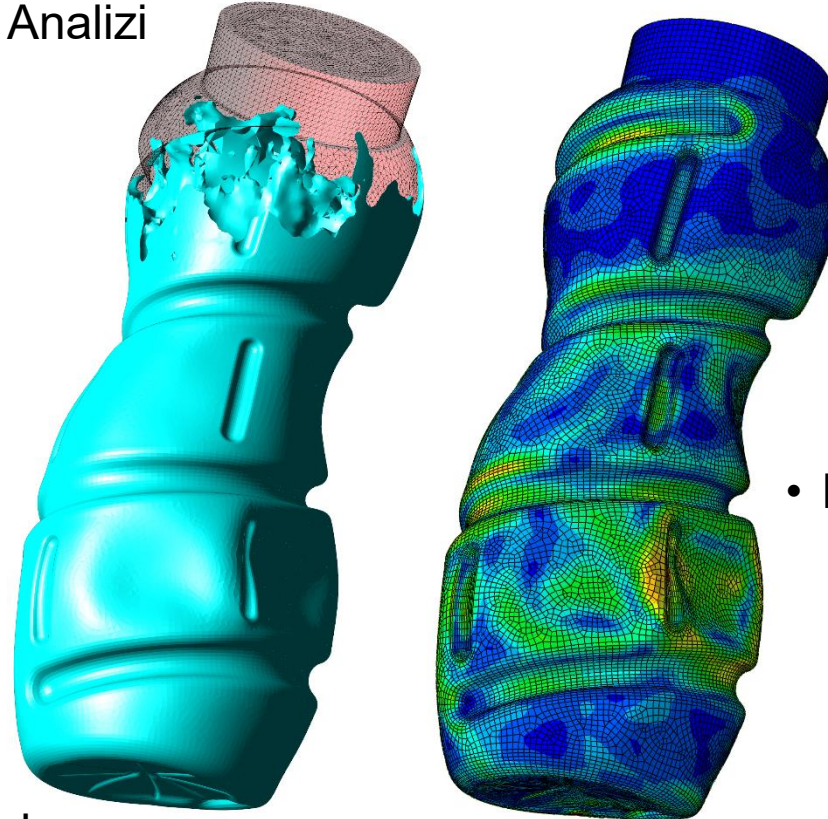


## • CFD

- Uçak/Otomobil Dış Aerodinamik Analizi
- Elektronik Sistemleri Soğutma
- Turbomakineler
- İklimlendirme
- Gemi Dış Gövde ve Pervaneleri
- İtki Sistemleri ve Yanma
- ...

## • FEA

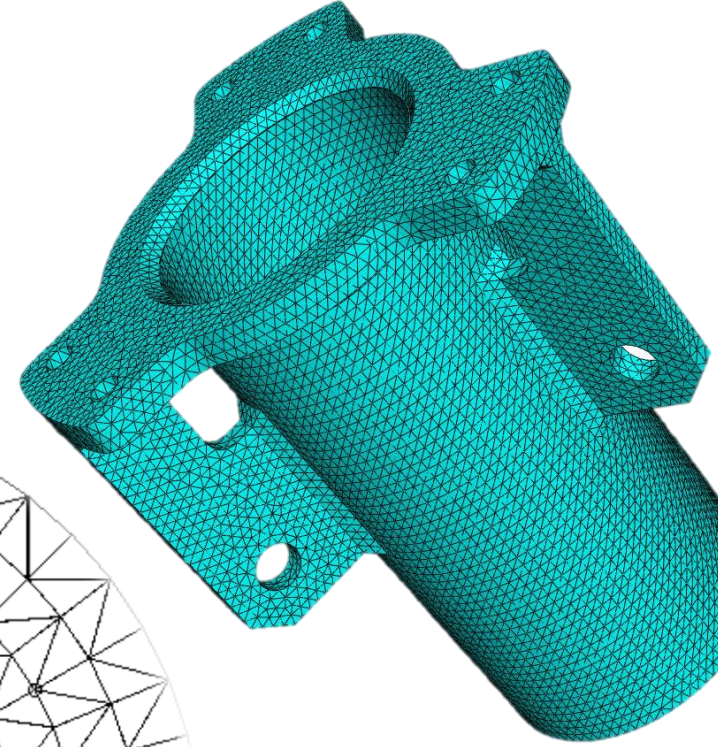
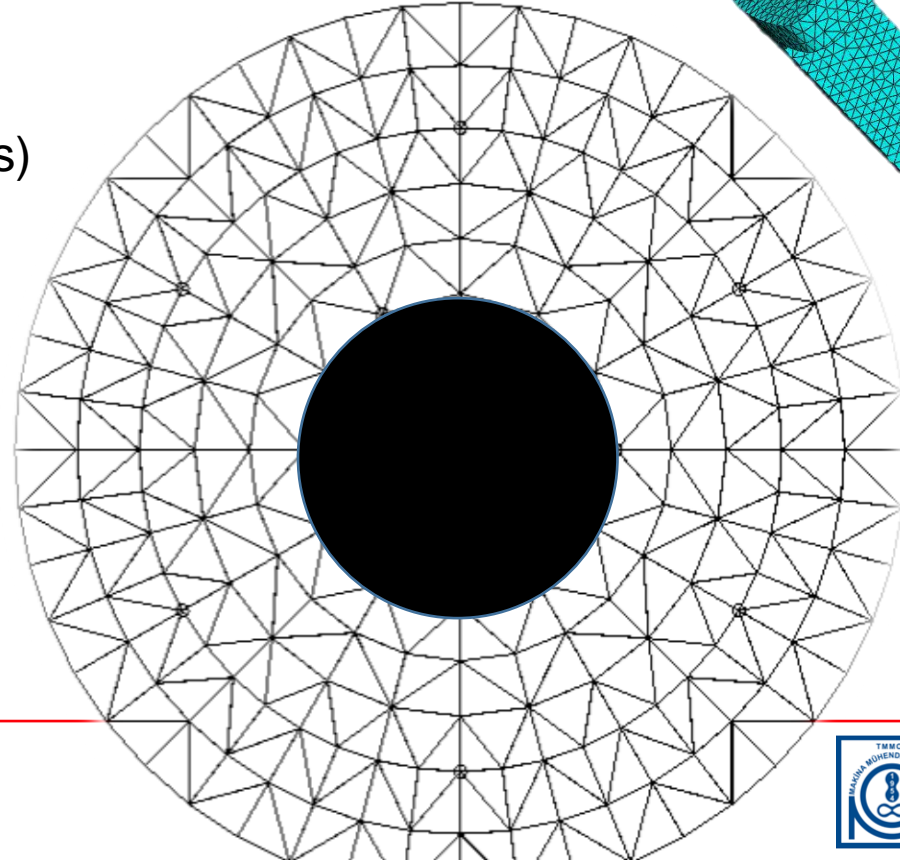
- Dinamik ve Titreşim Analizi
- Termal Stres Analizi
- Çarpışma ve Patlama
- Montajlı Parça Analizleri
- Kompozit ve Elastomer Malzemeler
- Plastik Deformasyon ve Metal Şekillendirme
- ...



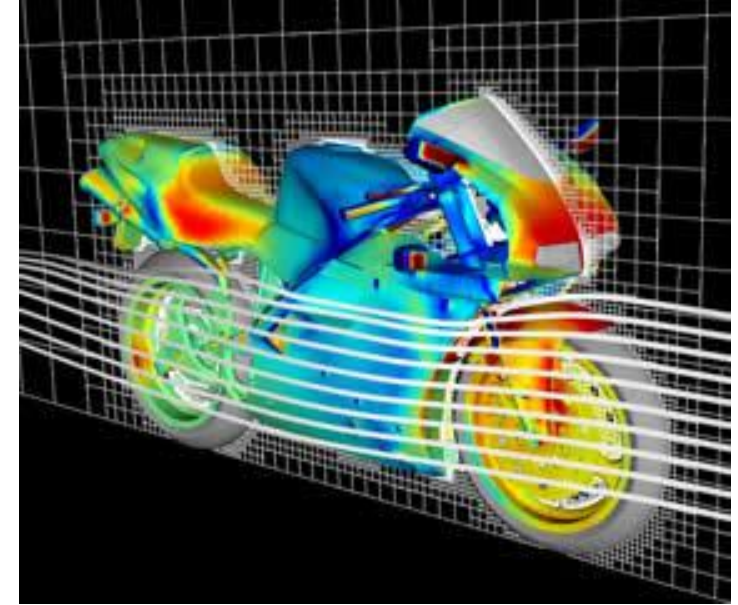
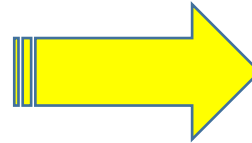
## • FSI

- Aeroelastisite & Titreşim
- Aerodinamik Yük Analizleri  
(Uçak, Otomobil, Yapılar vb.)
  - Elastik Sızdırmazlık
  - Diyafram Pompalar
- Hemodinamik ve Doku Mekaniği  
(Organ ve/veya Medikal İmplant)
- Lastik Islak Zemin Frenleme
  - Hava Yastıkları
  - Engel Dayanımı  
(Rezervuar, Set, Membran vb.)
- ...

- Çözüm Hacmini Ayırıştırma (Discretization)
  - Sonlu Hacim Yöntemi (FVM)
  - Sonlu Eleman Yöntemi (FEM)
  - Sonlu Fark Yöntemi (FDM)
- Akış/Yapısal Özellik Değişimleri (Gradients)
- Eleman Sayısı
- Eleman Boyutları & Boyut Dağılımı
- Eleman Kalitesi



- Bir CAE analizinde neler yapılır?
  - Problemin Tespiti
  - Ön İşlemler (Pre-Processing)
  - Çözüm
  - Son İşlemler (Post Processing)

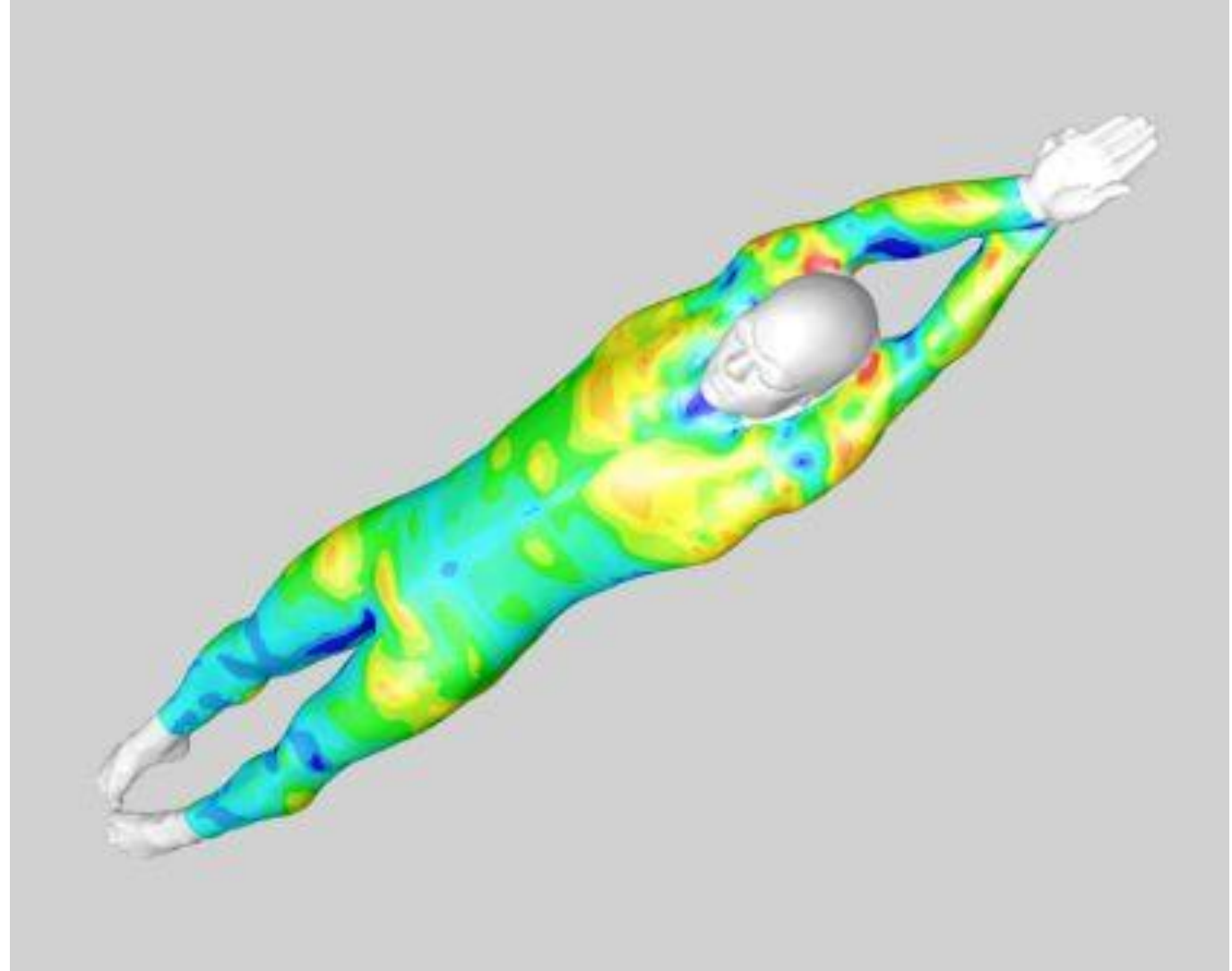


## Problem Tespiti

- Neyi elde etmek istiyorum?
  - (Basınç, sıcaklık dağılımı, stres, deformasyon, tork, güç ...)
- CAE analizi yapmalı mıyım?
  - (El hesabı, deneysel veriler ...)
- Hangi fiziksel modelleri kullanmalıyım?
  - Türbülans, ısı transferi, hiperelastisite, burkulma, faz değişimi, şok/titreşim, **akışkan katı etkileşimleri**...)
- Nasıl bir hassasiyet hedefliyorum?
- Bunun için ne kadar zamanım var?
- Katı Modeller
  - Var mı?
  - Analize uygun mu?
  - Basitleştirme yapılabilir mi?
- Gerçek fiziksel modeli analiz ile beklediğim hassasiyet ve zamanda canlandırabiliyor muyum?
- CAE analizi yapmalı mıyım?

## Ön İşlemler

- Geometri
- Sayısal Ağ
- Fiziksel Süreçler
- Çözücü Ayarları



## Geometri

- Baştan modelleme



**CAD Yazılımları**



**Taramadan Geometri Oluşturma**

- Basitleştirme



**Gereksiz Noktalar**



**Mümkün Olmayan ya da Çok Zaman Alacak Bölgeler**

- Analize Uygun hale Getirme



**Akış Hacminin Çıkarılması**



**Parçaların Birleştirilmesi / Ayrılması**

## Sayısal Ağ

- Ağ Çözünürlüğü



**Önemli / İlgilenilen Bölgeler**

**Yüksek Değişimli Bölgeler**

- Ağ Tipi



**Geometri Karmaşıklığı**

**Sınır Tabakası vb. Özel Gereksinimler**

- Bilgisayar Kaynakları



**Eleman Sayısı**

**Fiziksel Model Sayısı**

## Fiziksel Süreçler

- Malzeme Özellikleri
- Fiziksel Modeller
- Sınır Koşulları
  - CFD → Giriş/Çıkış, Duvar vb.
  - FEA → Yükler, Kontaklar, Destekler
- İlk Koşullar

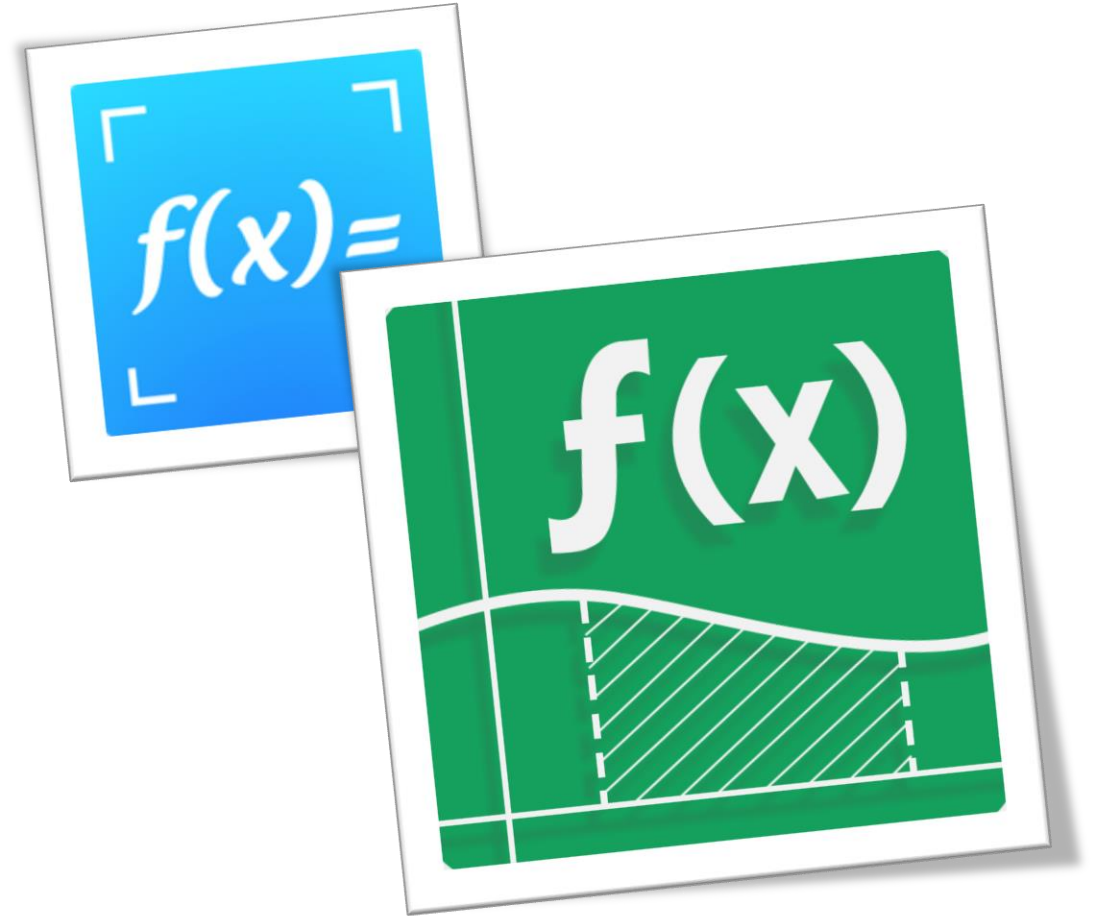


**CAE analizleri esnasında en önemli adım fiziksel süreçleri doğru benzetimlerle canlandırmaktır.**



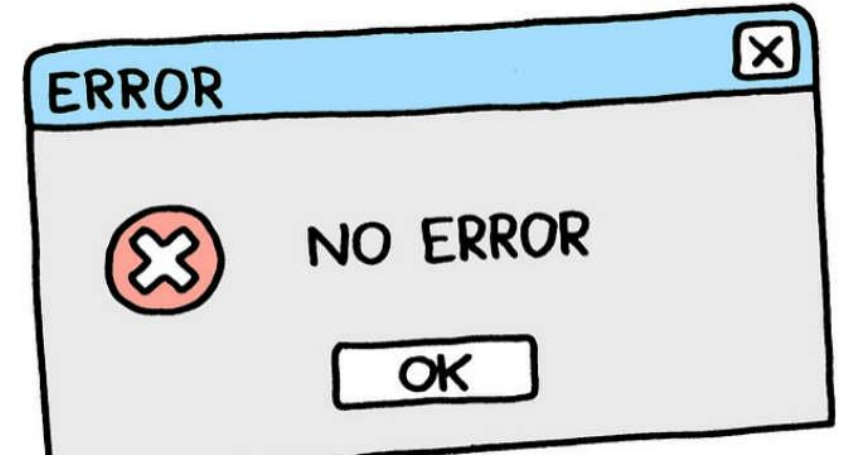
## Çözücü Tercihleri (Numerik Ayarlar)

- Çözücü Tipi
  - CFD → Basınç Temelli vs. Yoğunluk Temelli ...
  - FEA → Direct vs Iterative ...
- Eşleme (Coupling) Yöntemi
  - Implicit vs. Explicit
  - Veri Aktarım Araçları (MpCCI, MPM vb.)
- Şema Seçimi
  - Derece → Hassasiyet vs. Zaman
- Kararlılık
  - Courant Sayısı, Relaxation vb.



## Çözüm

- Amaç?
  - Yakınsamış → Güvenilir
    - Yinelemeler Arası Sonuç Farkı (Residual)  $< x$
    - Korunumlar Sağlandı mı?
    - Sayısal Ağdan Bağımsız
- Hata var mı?
  - Fiziksel Model
  - Sayısal Ağ
  - Numerik Hatalar
- Her zaman hata vardır.
- Amacımız hatayı gerektiği kadar azaltmaktır.



## Son İşlemler

- Sonuçlar beklendiği gibi mi?
- Sonuçlar mantıklı mı?
- Karşımdaki kişi (büyük ihtimalle analizci değil) ne görmek istiyor?
- Post-Process!
  - Eşdeğer Yüzeyle, Vektörler, Animasyonlar...
  - Hız, Basınç, Stres, Deformasyon...
- Sonuçlar beklendiği gibi mi?
- Sonuçlar mantıklı mı?

Revizyon  
Gerekebilir!

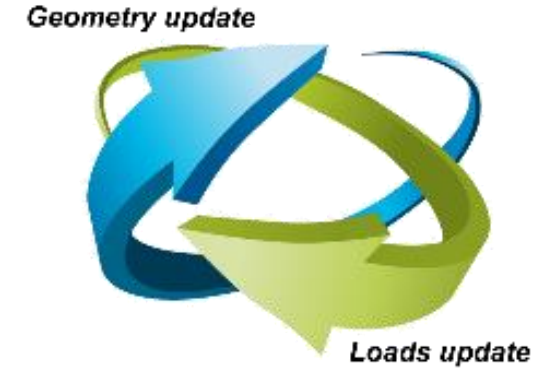
Revizyon  
Gerekebilir!

- Ne durumda ihtiyaç duyulur?

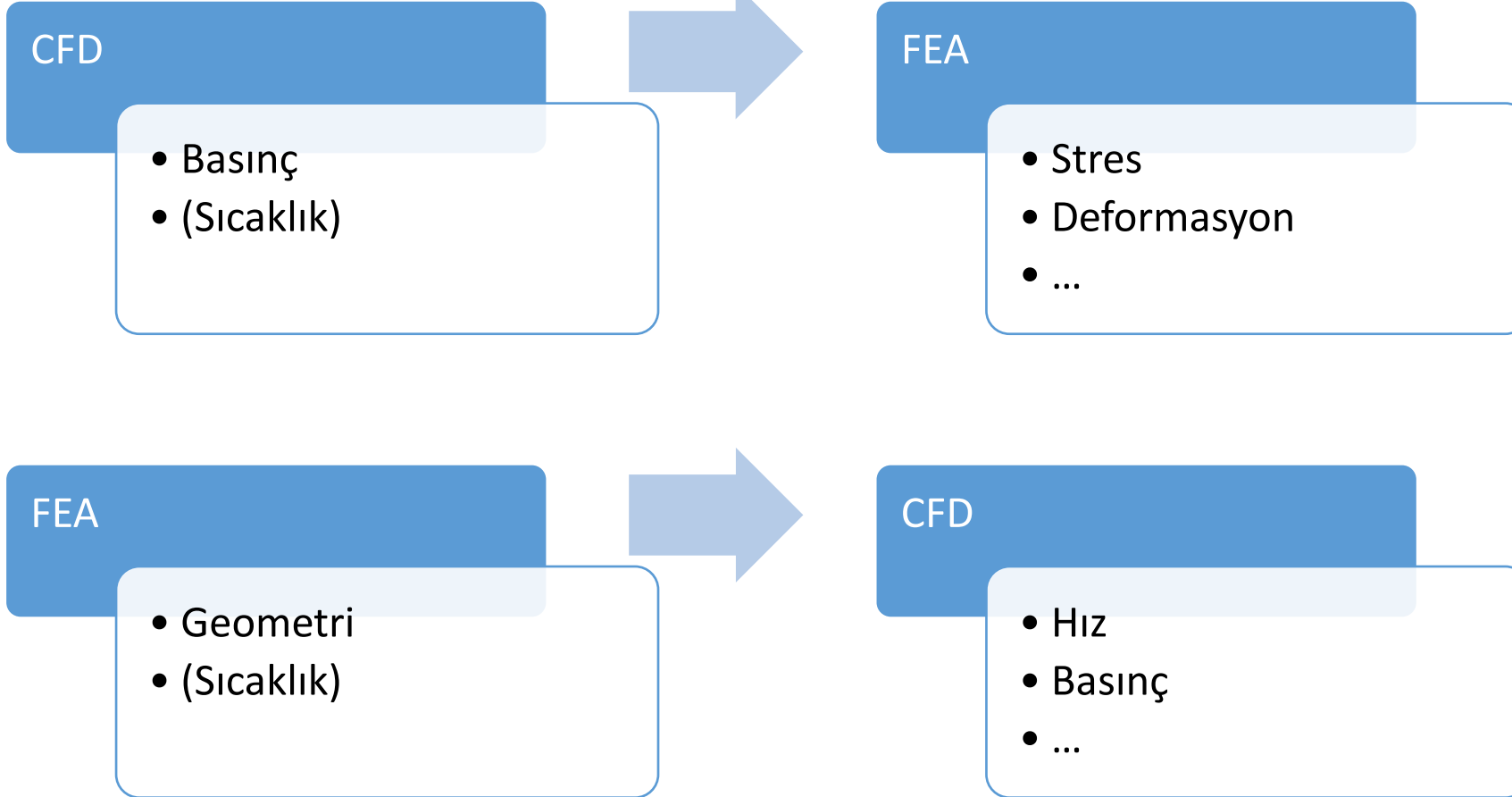
- Akış özelliklerinin (basınç, sıcaklık)  
katı üzerindeki dağılımı  
yapısal davranış (stres, deformasyon) üzerinde  
anlamlı etkiye sahipse.

*ve/veya*

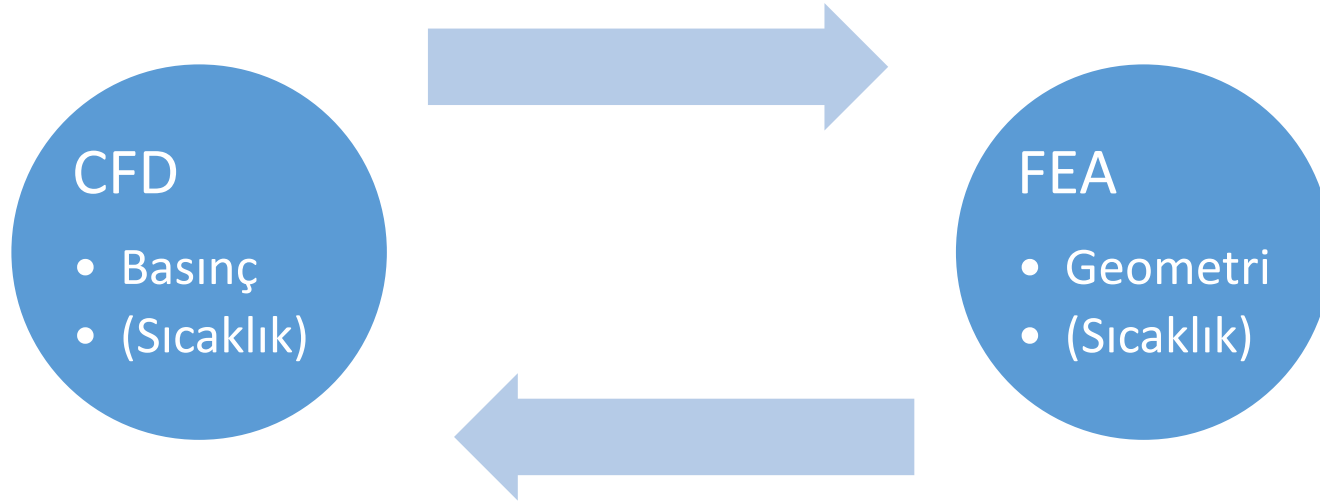
- Yapısal deformasyonların sebep olduğu  
akış hacmi değişiklikleri  
akışkan davranışları üzerinde  
anlamlı etkiye sahipse.



## • Tek Yönlü (1-Way) FSI

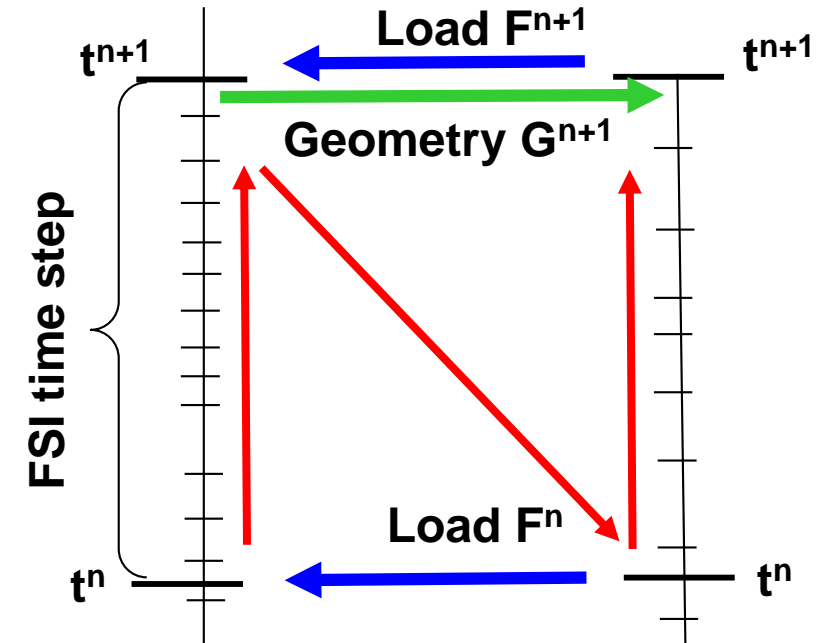


- Çift Yönlü (2-Way) FSI

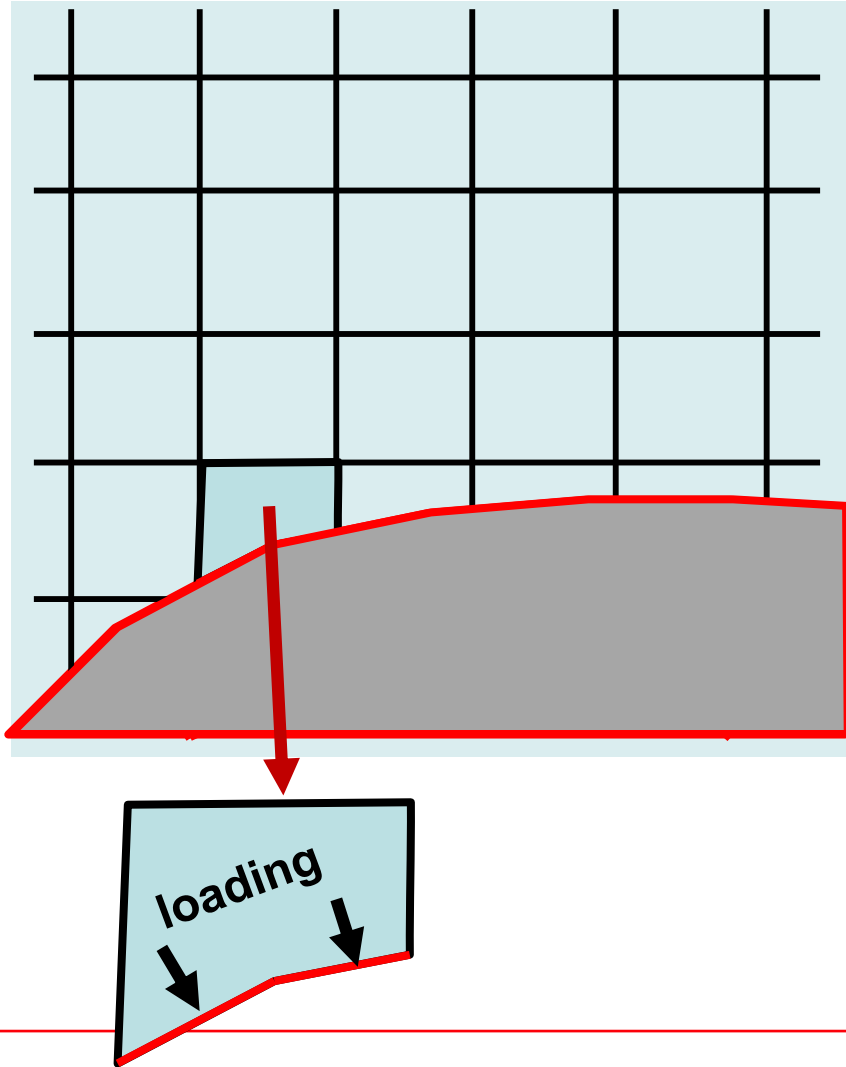


- İki yazılım (CFD & FEA)

- Eş güdümlü çalışır
- Birbirleriyle veri paylaşır



- MPM: Multi-Physics Manager



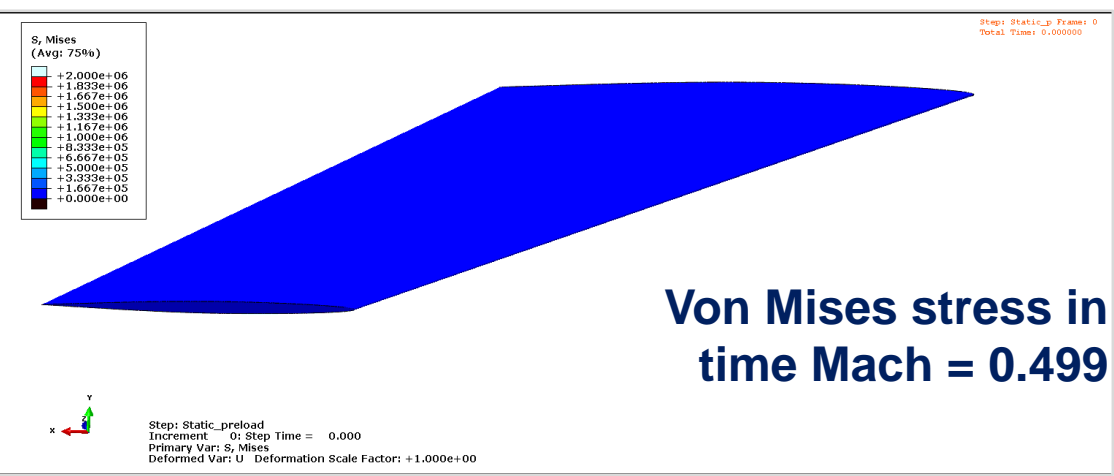
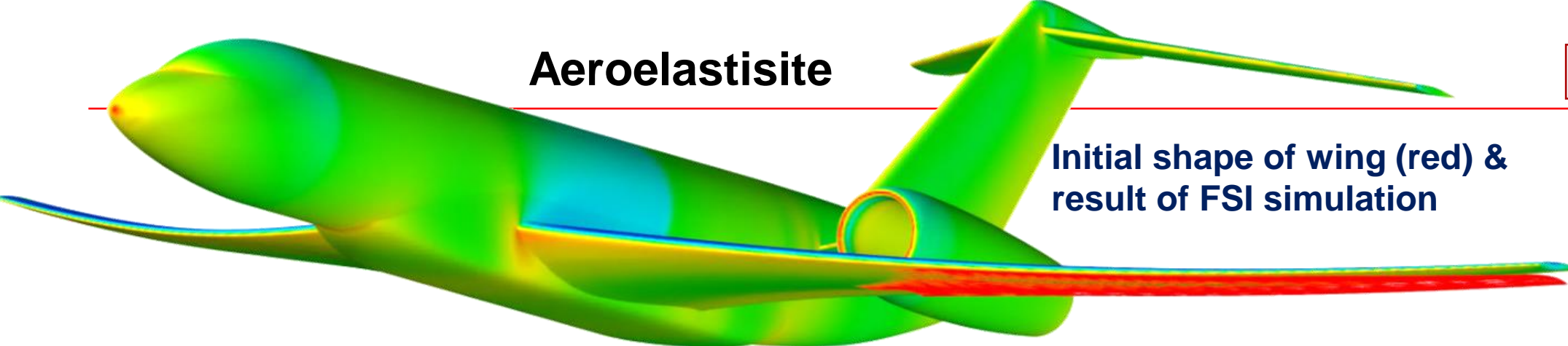
- FE sayısal ağı CFD içine aktarılır.
- FE sayısal ağ hacmi CFD hacminden çıkartılır  
**FE sınırları = CFD sınırları**
- CFD hücreleri, FE elemanlarına göre kesilir.
- Yükler ve deformasyon sonucu yüzey hareketleri takip edilir.

# AKIŞKAN-KATI ETKİLEŞİMİ (FSI: FLUID-STRUCTURE INTERACTION) EŞLENİK CFD-FEA MÜHENDİSLİK SİMÜLASYONLARI

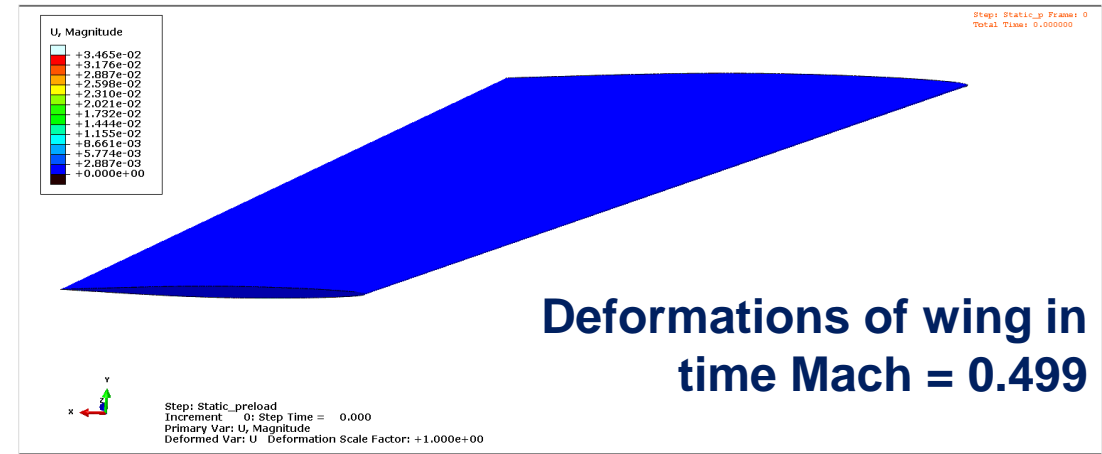
## UYGULAMA/VAKA ÖRNEKLERİ



Initial shape of wing (red) & result of FSI simulation



Von Mises stress in time Mach = 0.499



Deformations of wing in time Mach = 0.499

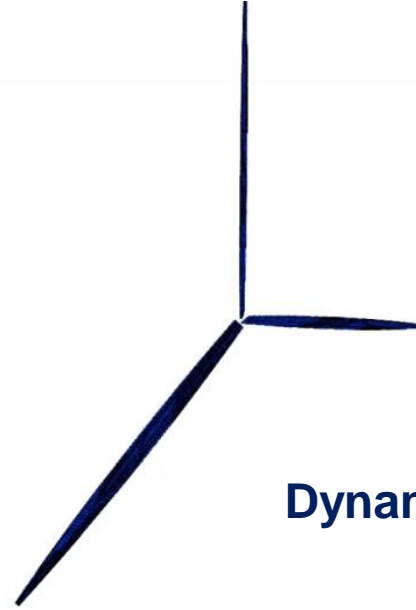
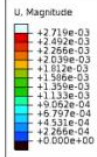
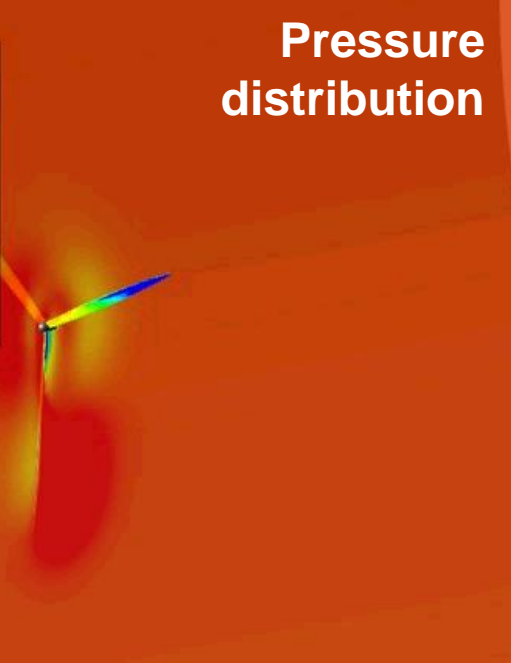


Wing oscillations Mach = 0.678

**HIRENASD Experiment  
AGARD 445.6 Wing**

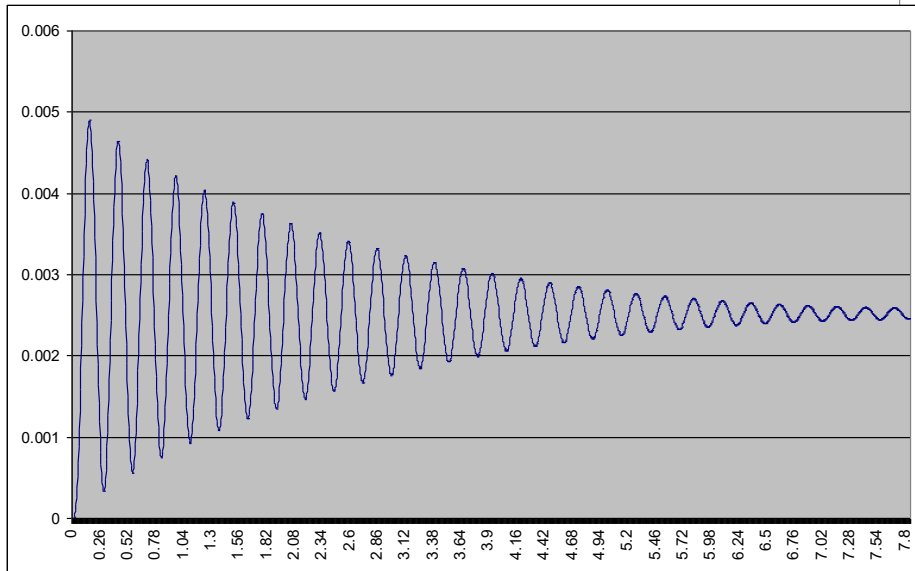
# Rüzgar Türbini Aeromekaniği

Pressure distribution



Step: Step-1 Frame: 0

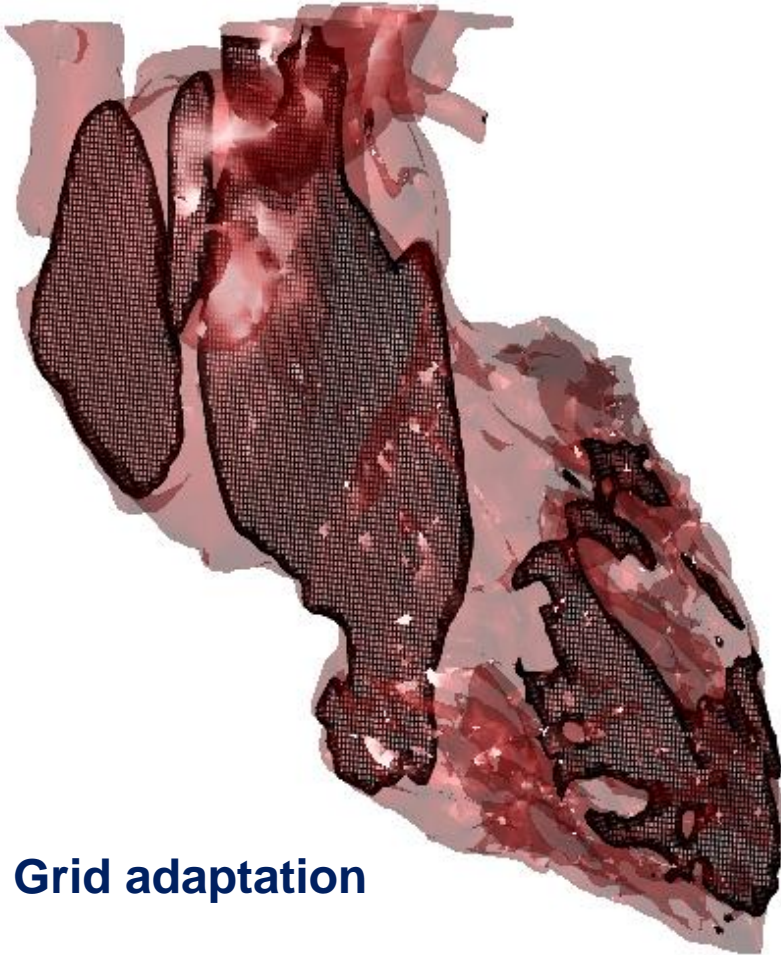
Dynamic response to wind loading



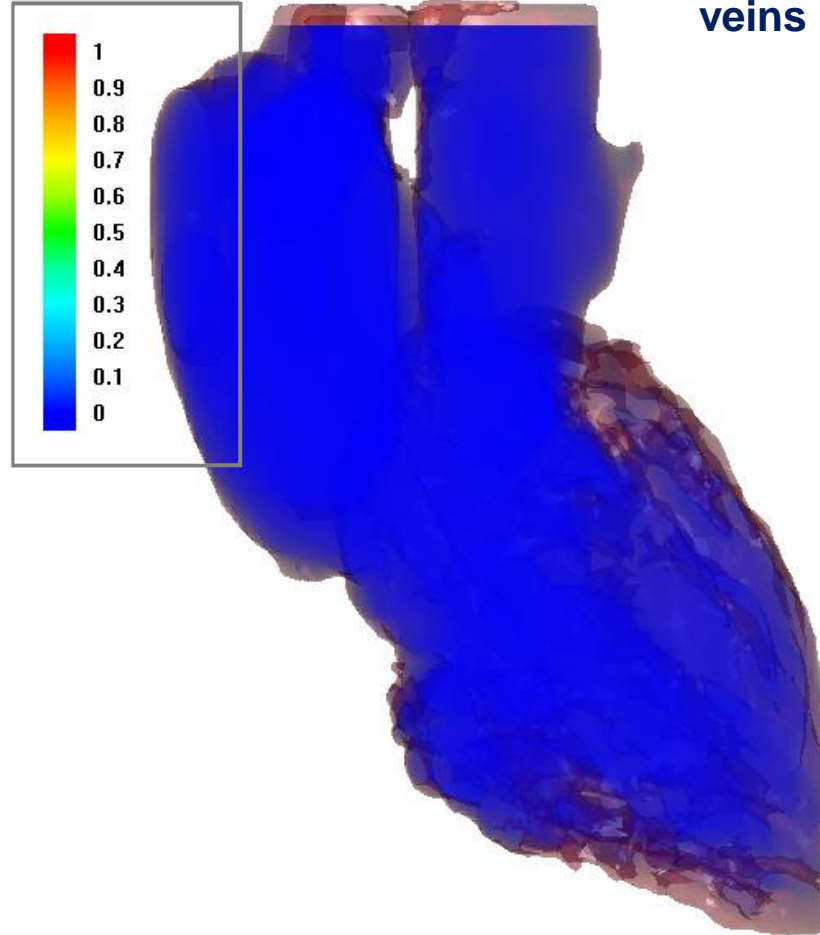
x-Direction displacement of turbine blade

Improving wind turbine efficiency by taking into account blade flexibility

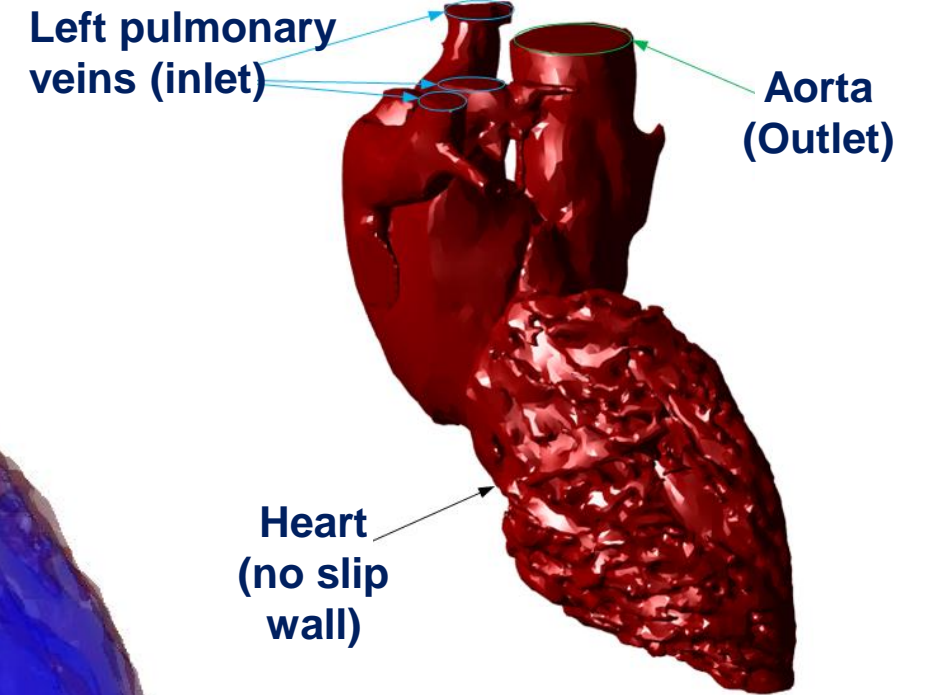
# İnsan Kalbi; Kardiyak Döngü (Optik Tarama ile Tek Yönlü FSI)



Grid adaptation



Volume visualization of Velocity



- ✓ CT scan heart geometry at 100 different instances during one beatcycle
- ✓ Import into CFD
- ✓ Perform transient analysis

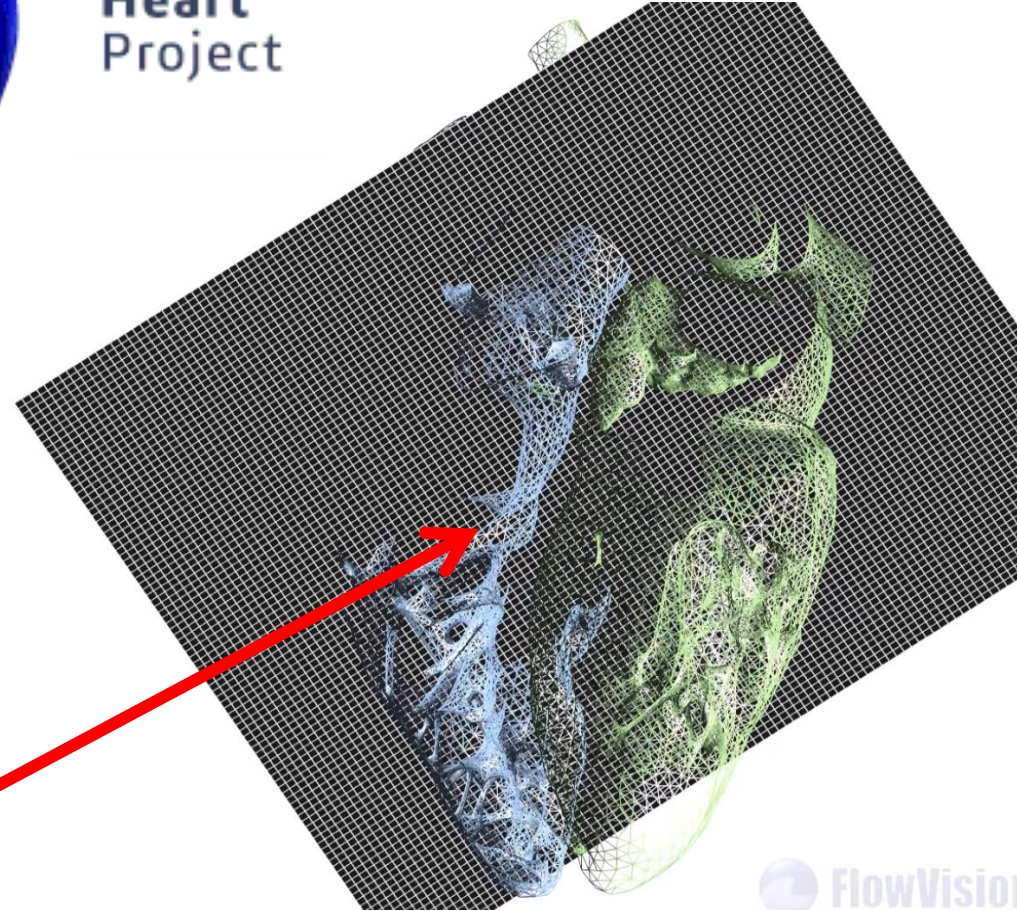
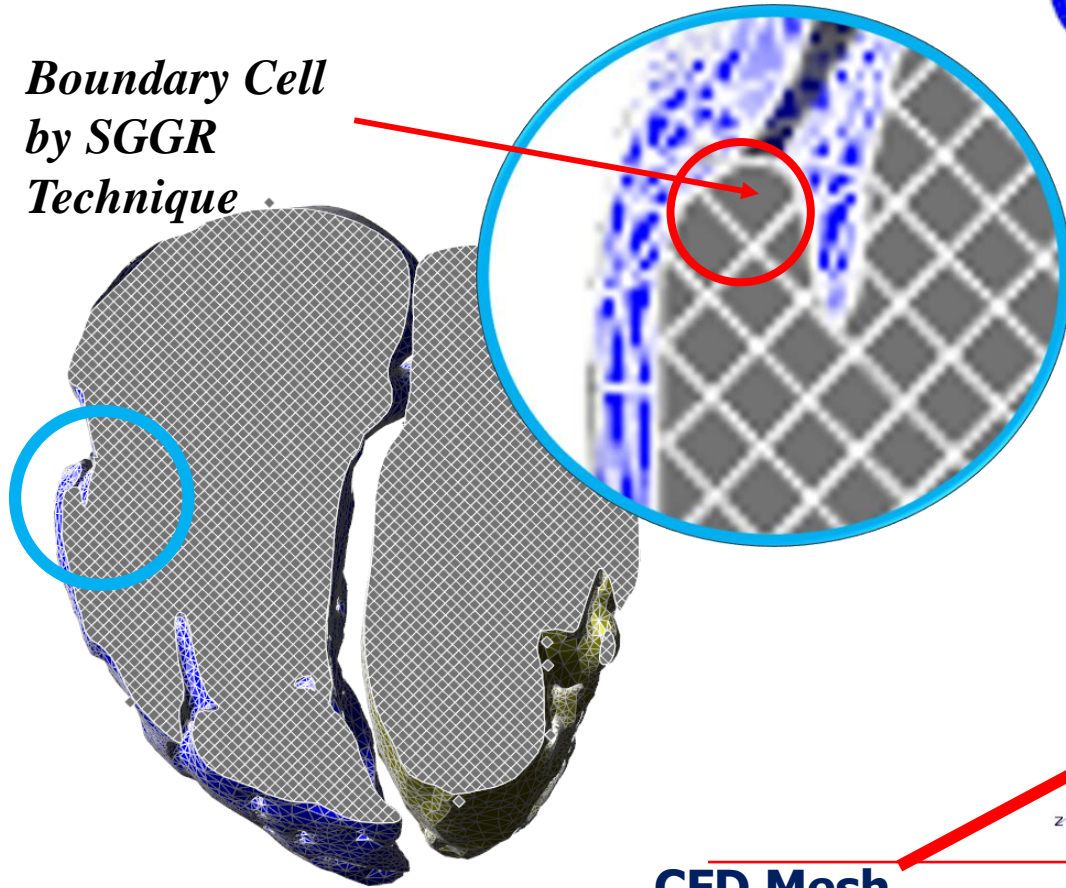
# İnsan Kalbi; Kardiyak Döngü *(Elektromekanik Model ile Tek Yönlü FSI)*

- Working with actual heart geometry
  - Complex topology
  - Large structural deformations



The  
Living  
Heart  
Project

*Boundary Cell  
by SGGR  
Technique*



**CFD Mesh**

FlowVisual



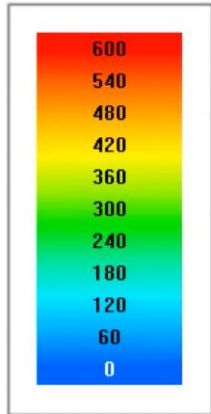
tmmob  
makina mühendisleri odası  
ankara şubesi

# İnsan Kalbi; Kardiyak Döngü (Valf FEA Modeli ile Çift Yönlü FSI)

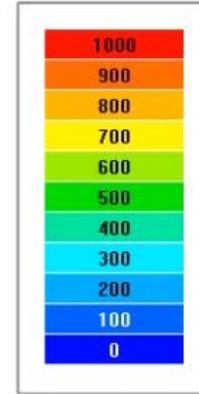
- Moving valves
  - Tissue & mechanical valves
  - Fluid driven or prescribed valve motion
  - Including contact & pinched flow
- 2-way strongly coupled FSI



The  
Living  
Heart  
Project



**Blood  
Velocity  
[mm/s]**



**Blood  
Velocity  
[mm/s]**

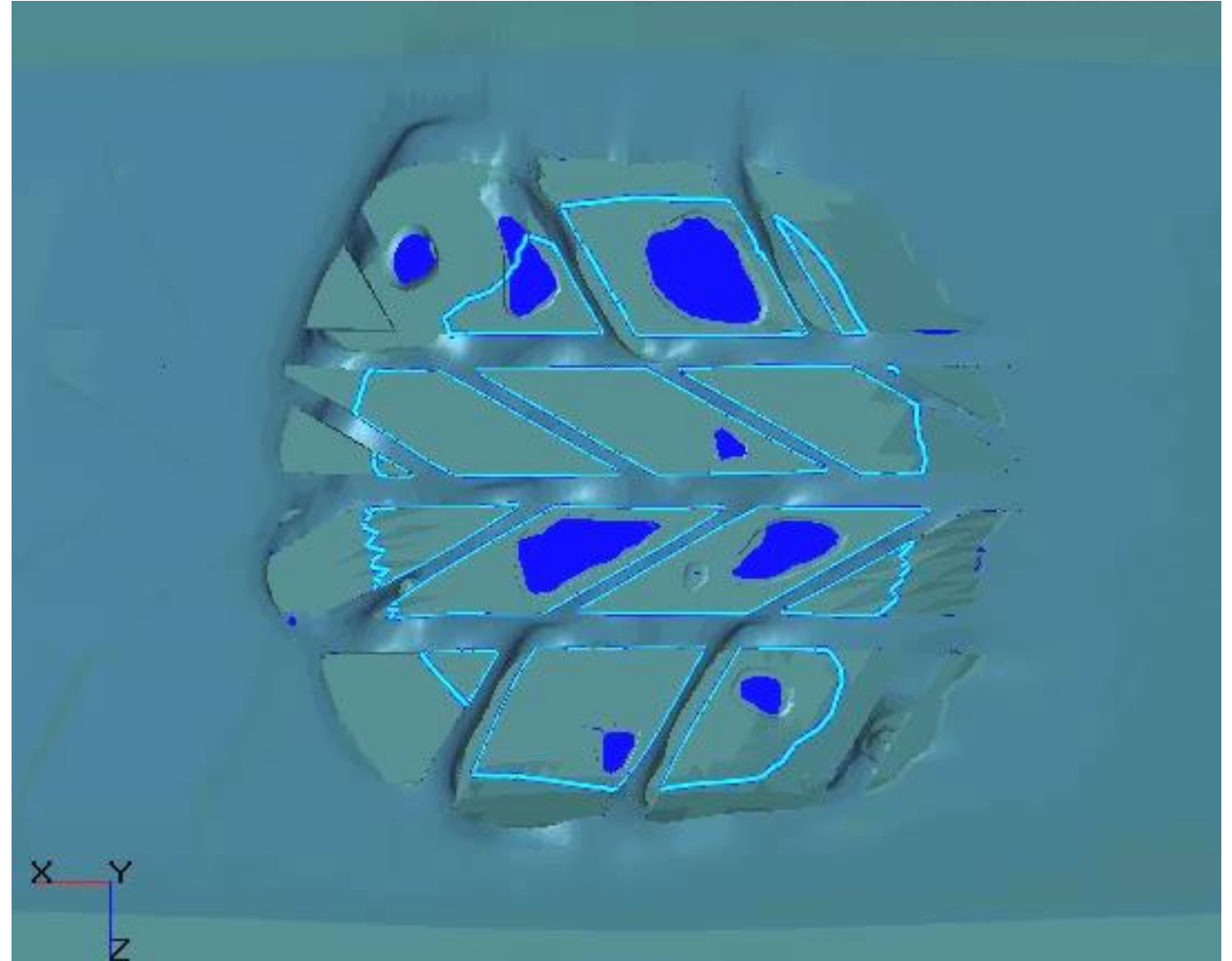
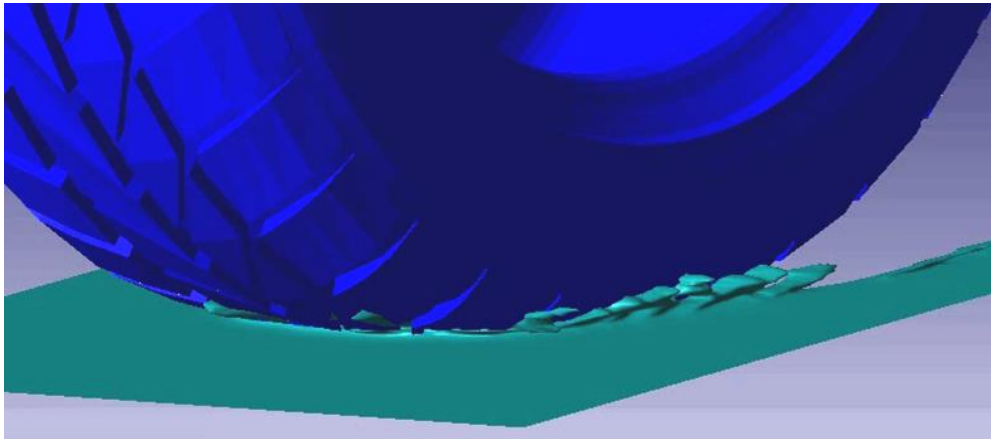


# Lastik Islak Zeminde Kayma (Aquaplaning)

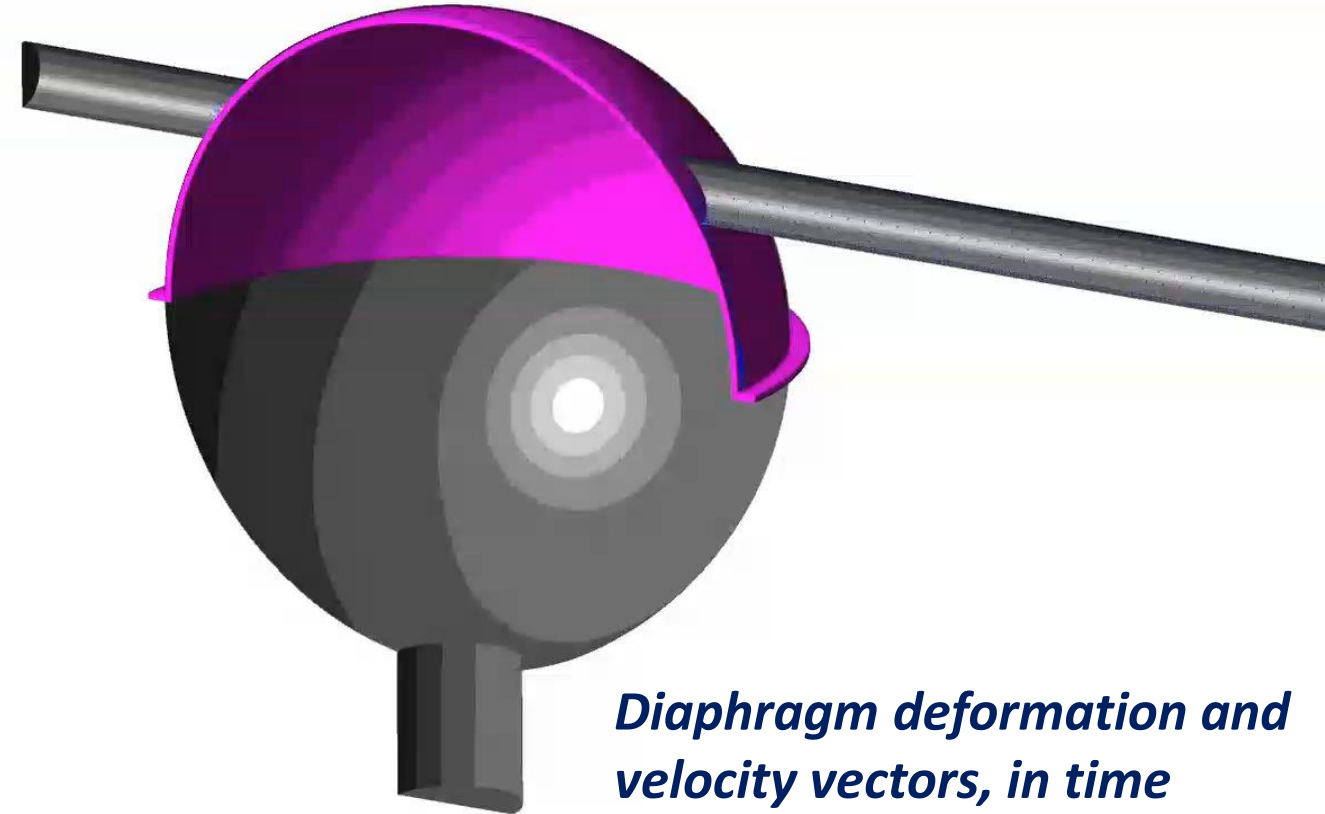
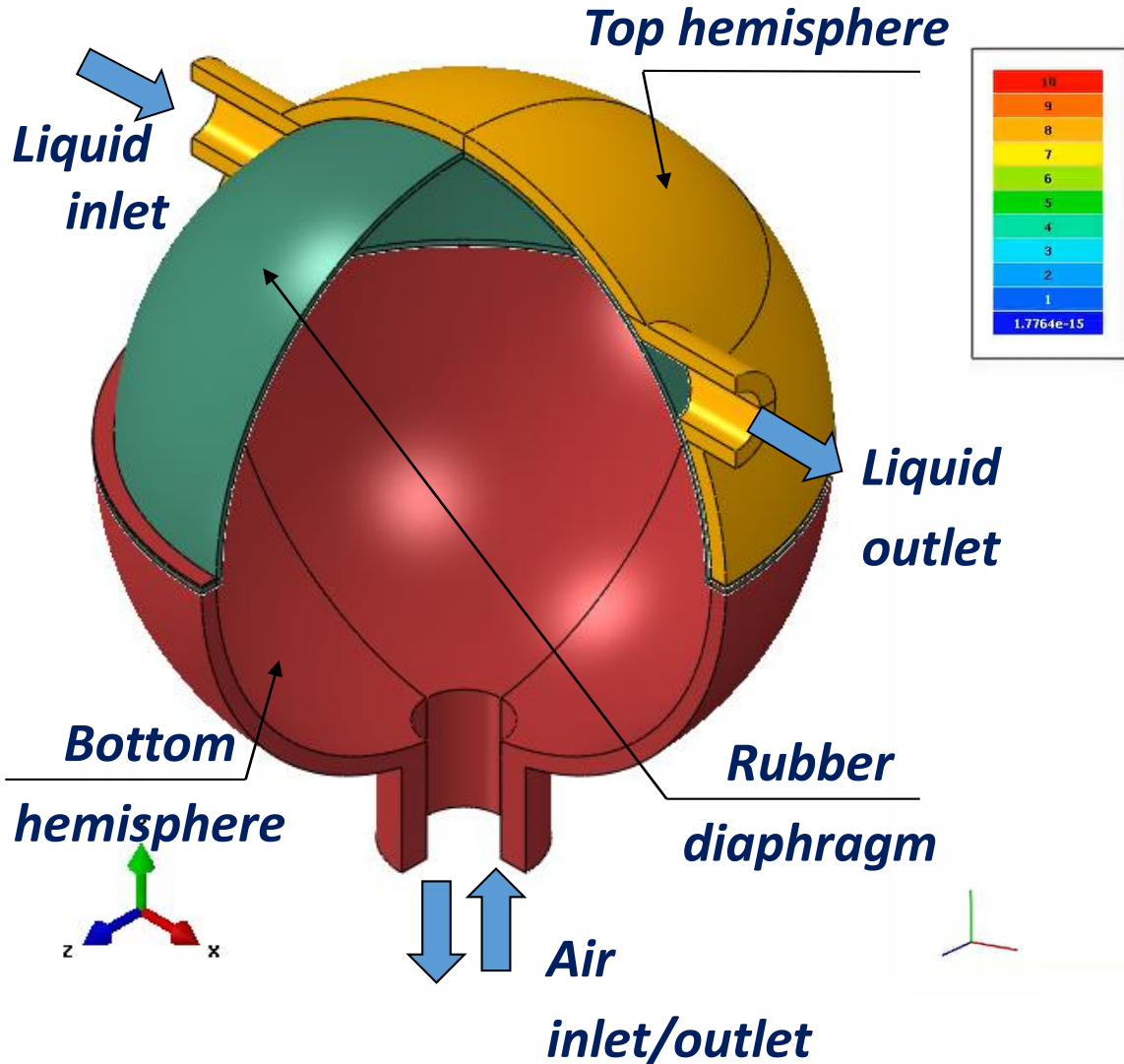


## 2-Way Coupled Fluid Structure Interaction:

Body deformations by FEA  
&  
hydrodynamics by CFD



# Diyafram Pompa



# Su Şişesi Düşme Testi

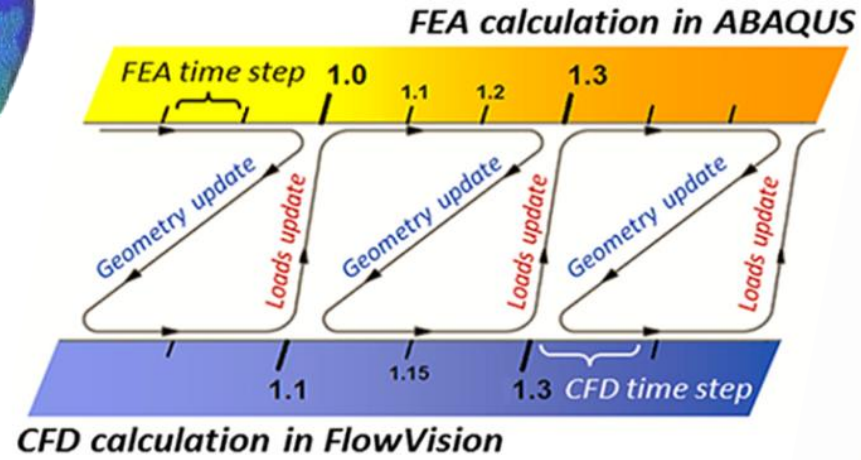
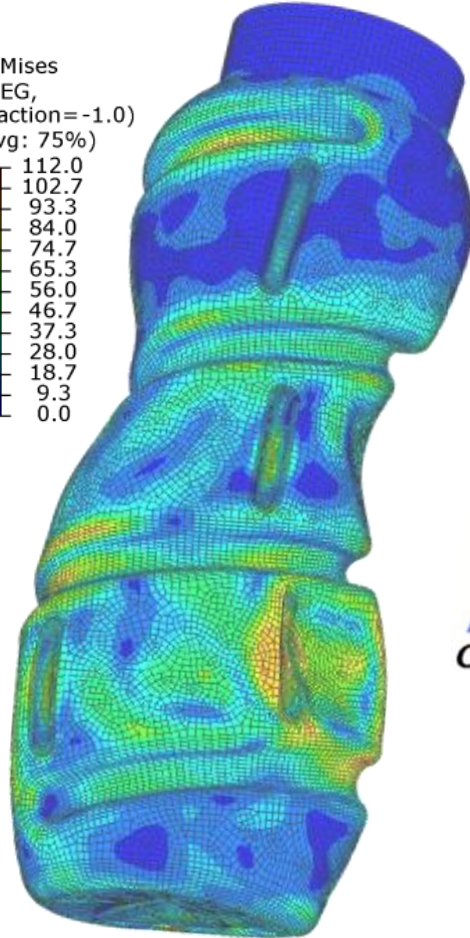
CFD

FEA



S, Mises  
SNEG,  
(fraction=-1.0)  
(Avg: 75%)

112.0
102.7
93.3
84.0
74.7
65.3
56.0
46.7
37.3
28.0
18.7
9.3
0.0



Zemin





*Dinlediğiniz için teşekkürler...*

