

---

# Süperbilgisayarların Otomotiv Sektöründe Araç Geliştirme Çalışmalarında Kullanımı

Necmettin Kaya

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi  
Makine Mühendisliği Bölümü

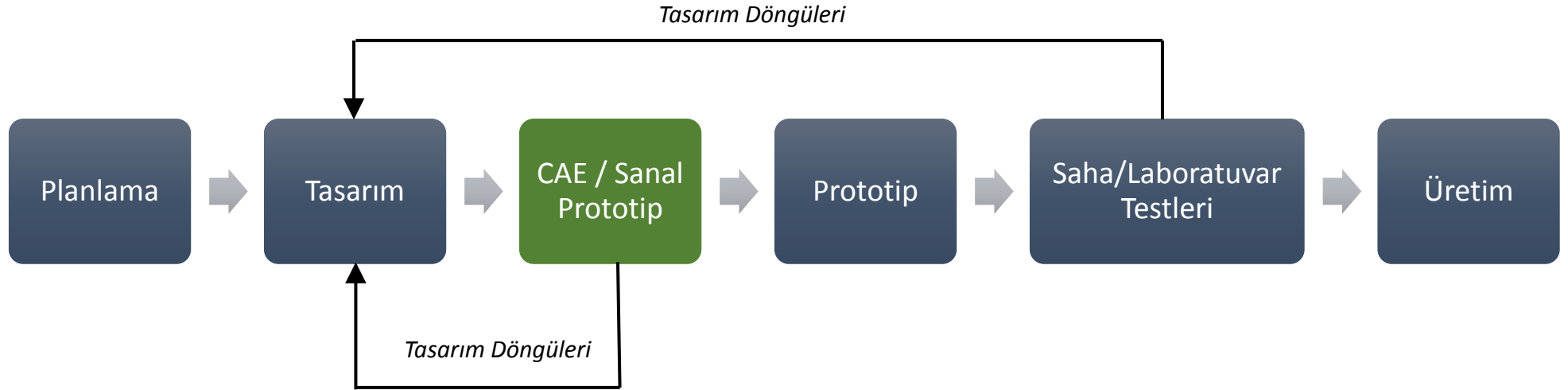
06.02.2021 EuroCC Semineri

# Geleneksel Araç/Araç elemanları Geliştirme Süreci

---



# Mevcut Araç/Araç elemanları Geliştirme Süreci



CAE: Computer Aided Engineering / Virtual Prototyping

- Daha az prototip, düşük maliyet
- Tasarımdan üretime daha kısa zamanda geçiş
- Daha güvenli, uzun ömürlü araçlar

Sanal prototip oluşturmada temel hesaplama yöntemi: **Sonlu Elemanlar Yöntemi**  
(Finite Element Method)

# Sonlu Elemanlar Yöntemi

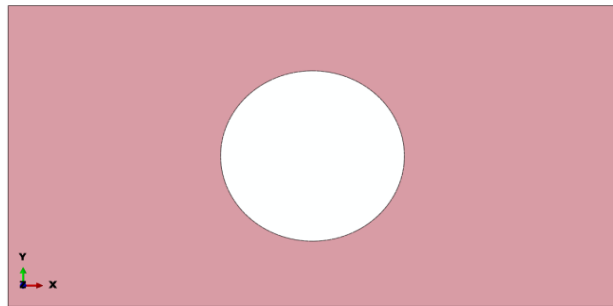
---

- Mühendislik problemlerinin çözülmesi için **sayısal** bir çözüm yöntemidir.
- Geometrik model (CAD) üzerinden **sonlu sayıda** elemandan oluşan modelinin çıkarılarak **sayısal işlemlerin** bu model üzerinden yapılmasıdır.
- Analitik olarak **çözülemeyen**, geometrisi ne kadar **karmaşık** olursa olsun problemler **yaklaşık olarak** çözülebilir.

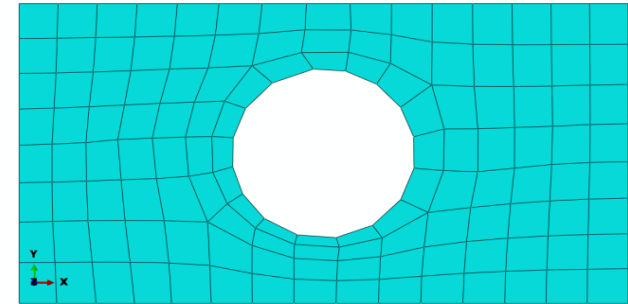
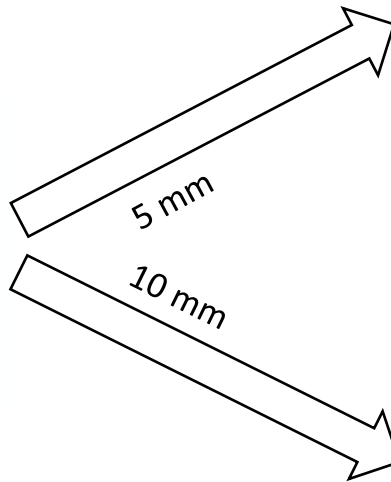
Araç geliştirme sürecinde karşılaşılan problem türleri:

- Statik analizler, mukavemet analizleri
- Titreşim-akustik analizler (NVH)
- Çarpışma analizleri
- Akışkanlar dinamiği
- Isıl analizler
- Yorulma-ömür analizleri
- Yapısal optimizasyon problemleri
- Üretim proses simülasyonları vd.

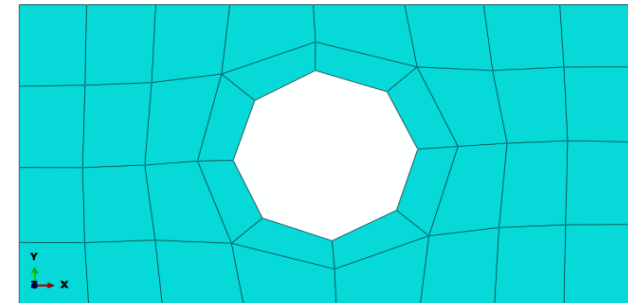
# Elemanlara ayırma (mesh)



Geometri



Sonlu elemanlar modeli  
125 eleman

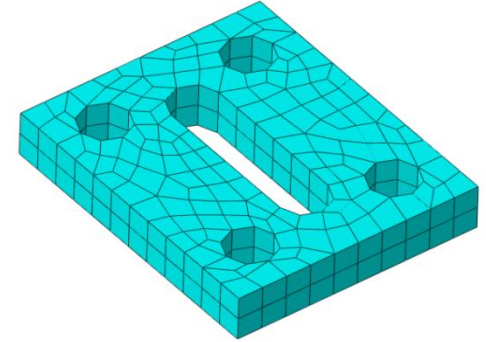


Sonlu elemanlar modeli  
36 eleman

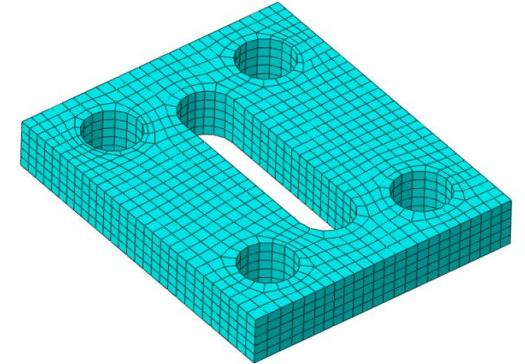
# Elemanlara ayırma (mesh)

Aynı geometri, farklı eleman dağılımları

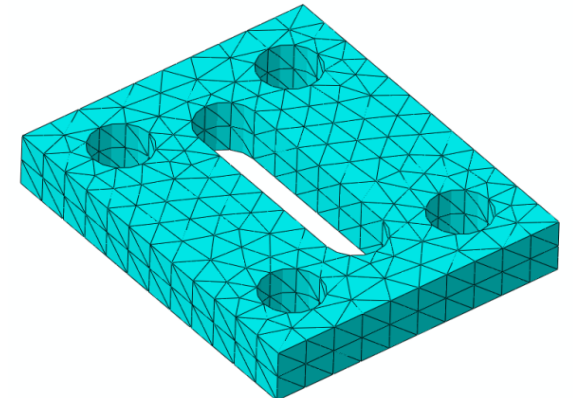
Hexahedral elemanlar,  
eleman büyüklüğü 20



Hexahedral elemanlar,  
eleman büyüklüğü 5



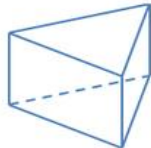
Tetrahedral elemanlar,  
eleman büyüklüğü 15



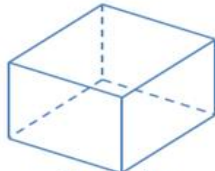
Tetrahedron



Pyramid



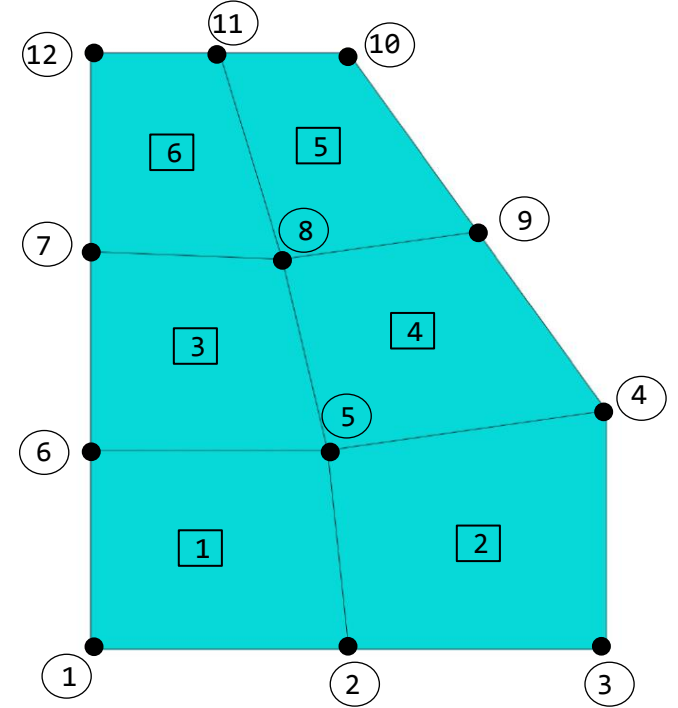
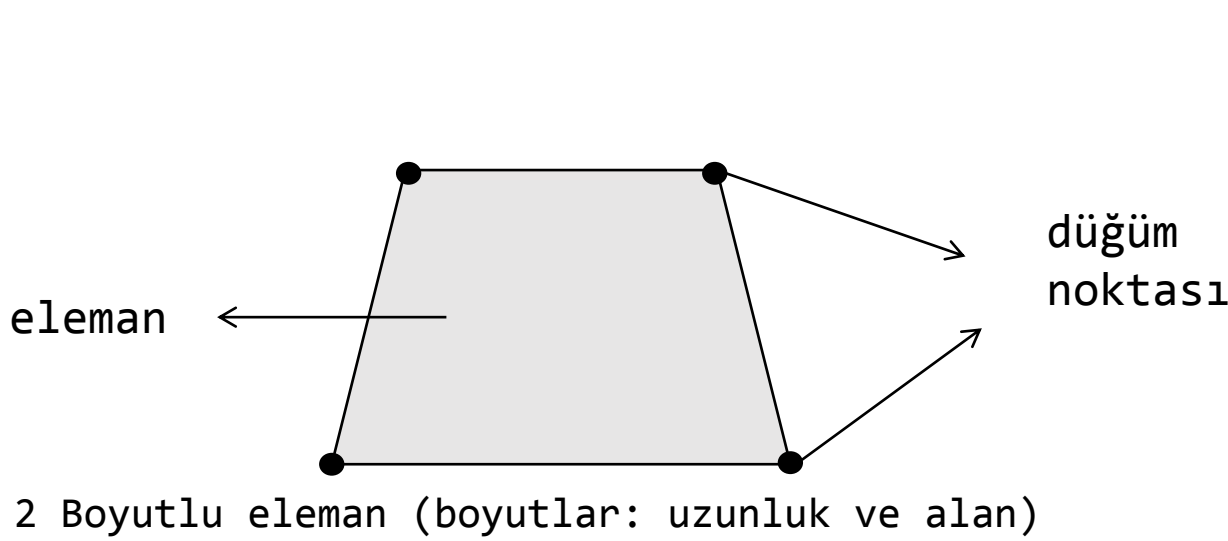
Triangular Prism



Hexahedron

# Sonlu Elemanlar Yöntemi

- Modeli oluşturan elemanlar (**element**) birbirlerine düğüm noktaları (**node**) ile bağlıdır.



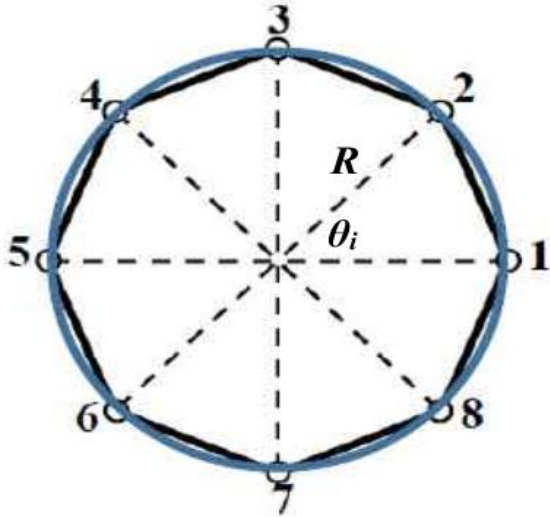
- Bu şekilde gerçek yapının davranışı, **birbirine bağlı elemanlardan** elde edilen denklemlerin topluluğu ile incelenmektedir.
- Sonucun **doğruluğu** bir çok **parametreye** (eleman sayısı, malzeme modeli, sınır şartlarının doğru tanımlanması vb.) bağlıdır ve genellikle **yaklaşık sonuç** verir.

# Sonlu Elemanlar Yöntemi

---

Eleman sayısı?

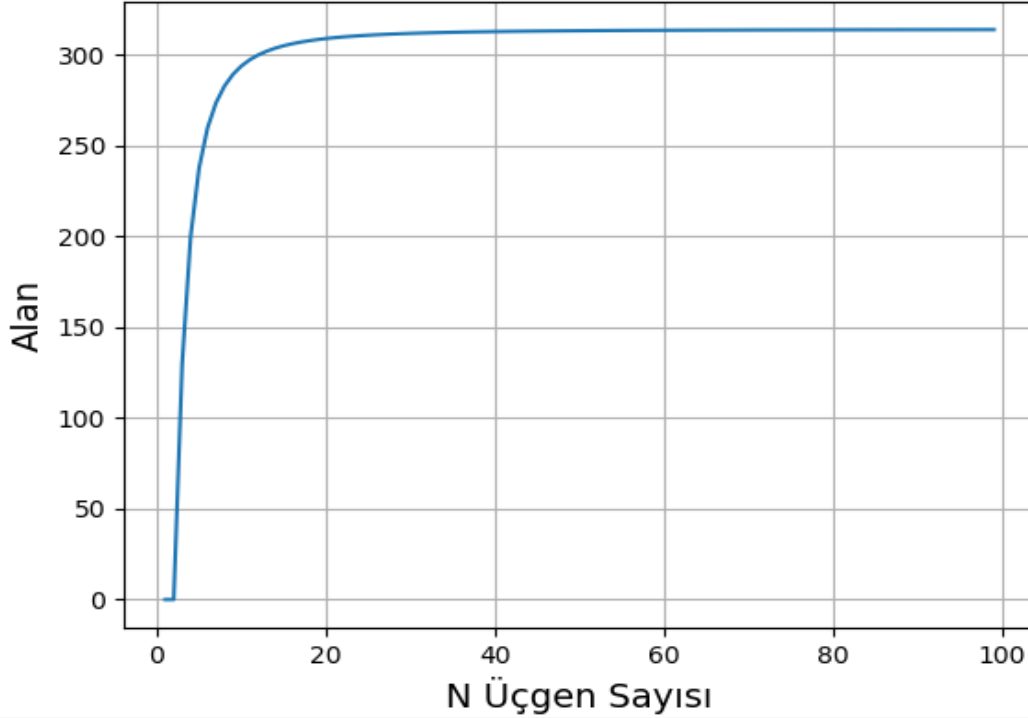
**Geometriden bir örnek: Dairenin alanının bulunması**



Dairenin içine çizilen üçgenlerin alanlarının toplamı ile dairenin alanının yaklaşık olarak hesaplanması



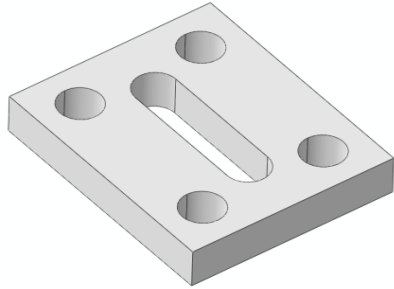
# Sonlu Elemanlar Yöntemi



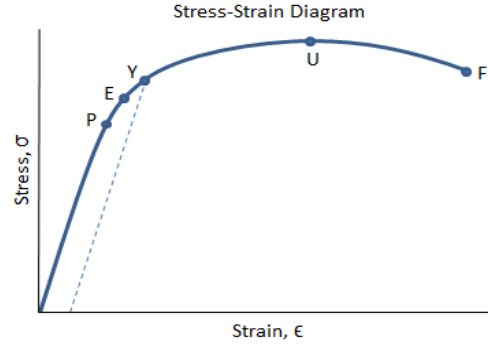
Eleman sayısı **yüksek** ise çözümün **doğruluğu artar**, ancak belli bir sayıdan sonra sayıyı artırmak çözüme fazla **katkı yapmaz**.

Sonlu elemanlar modellerinde, hesaplama **alt yapısı yetersiz** ise eleman sayısı optimumda tutulmaya çalışılır, eleman yoğunluğu parçanın kritik bölgelerinde artırılır.

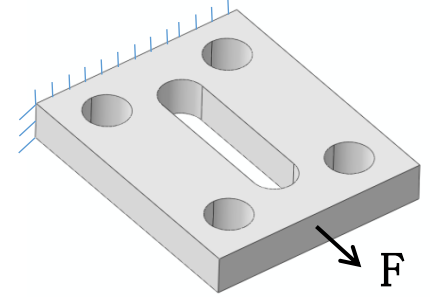
# Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çözüm



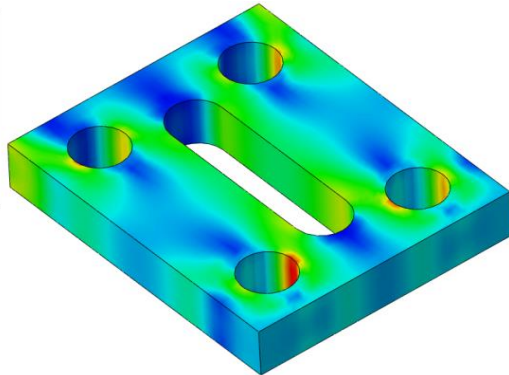
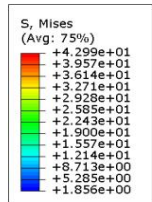
Geometri modeli



Malzeme tanımı



Sınır şartları tanımı  
(sabitlemeler ve yükler)

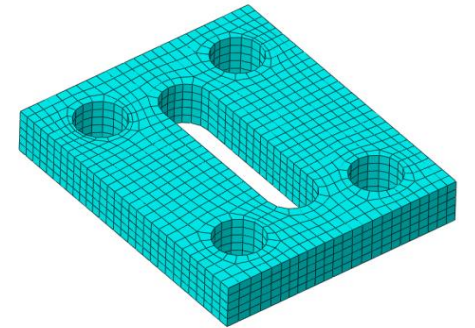


Sonuçlar

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n} = b_1$$
$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n} = b_2$$



Çözüm



Sonlu elemanlar modeli

# HPC alt yapısı kullanımı

---

- 1) Doğrusal statik analiz (Linear statics)
- 2) Doğrusal olmayan analiz (Nonlinear) → HPC altyapısı kullanımı
- 3) Dinamik analiz (Dynamics)
- 4) Isıl analiz (Thermal) → HPC altyapısı kullanımı
- 5) Yorulma analizi (Fatigue)
- 6) Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi (CFD) → HPC altyapısı kullanımı
- 7) Çarpışma mekaniği analizi (Crash) → HPC altyapısı kullanımı
- 8) Titreşim analizi (NVH)
- 9) Etkileşimli analiz (Coupled-field) → HPC altyapısı kullanımı
- 10) Diğerleri

# Implicit (Kapalı form) – Explicit (Açık form) Çözüm

---

## Implicit (Kapalı) Çözüm:

- Statik veya düşük dereceli dinamik analizler
- Doğrusal/doğrusal olmayan statik analizler
- Modal ve titreşim analizleri
- Burkulma analizleri
- Geri yaylanma analizleri

## Explicit (Açık) Çözüm:

- Yüksek dereceli dinamik analizler
- Araç çarpışma analizleri
- Çarpma/penetrasyon analizleri
- Patlama analizleri

# Açık Formda Sonlu Elemanlar Çözümleri

---

- Yapının davranışı zamana bağlı ve fiziksel olay çok kısa süre içinde gerçekleşiyorsa (çarpma, patlama vb.) **açık form** (explicit) çözüm yöntemi tercih edilir.
- Problem belli bir zaman dilimi içinde belli **adım büyüklükleri** için çözülür. Yakınsama problemi olmaz.

$$M a = F_{ext} - F_{int}$$

$M$ : sistemin kütle matrisi,  $a$ : ivme,  $F_{ext}$ : dış yükler,  $F_{int}$ : iç yükler

ivme, hız ve yerdeğiştirme eşitlikleri açık formda merkezi farklar zaman entegrasyonu ile elde edilir.

$$a_n = M^{-1}(F_{ext} - F_{int})_n$$

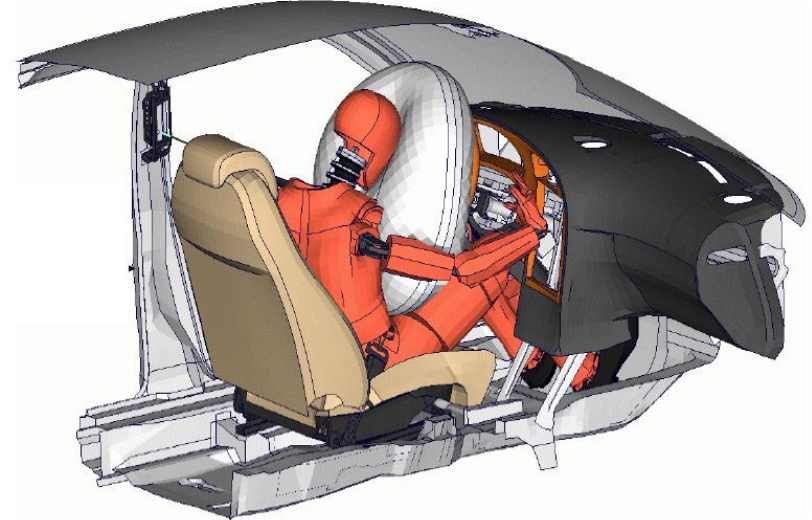
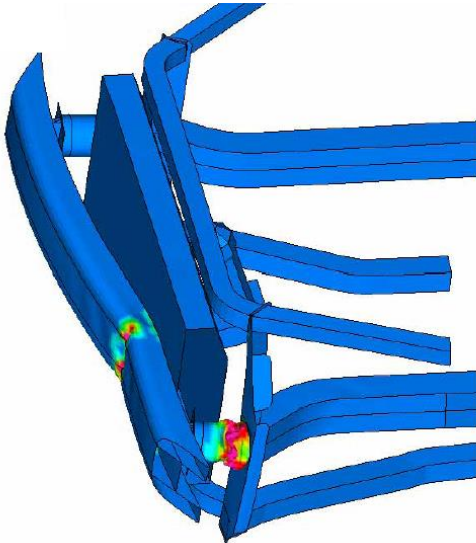
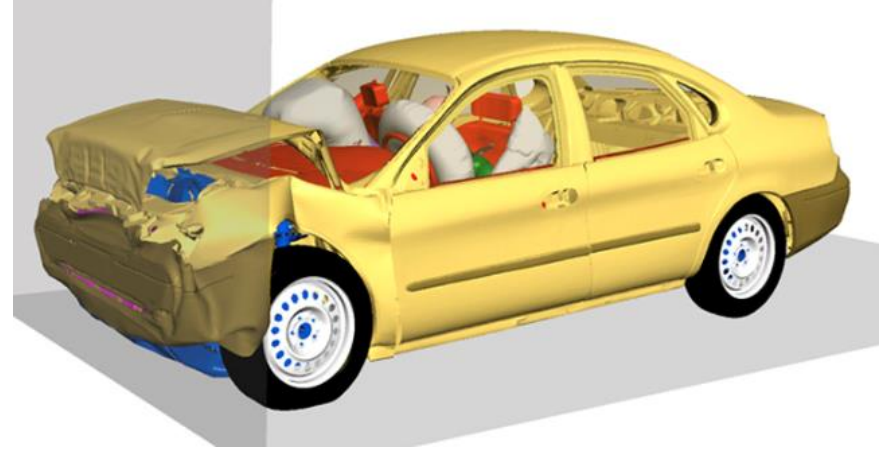
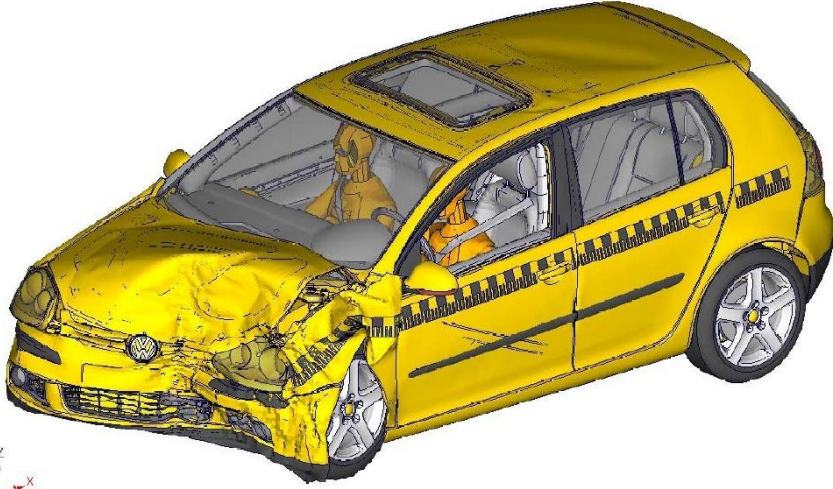
$$v_{n+1/2} = v_{n-1/2} + a_n \Delta t_n$$

$$u_{n+1} = u_n + v_{n+1/2} \Delta t_{n+1/2}$$

Çözümün kararlılığı için kritik zaman adımı:

$$\Delta t = d_{min} \sqrt{\frac{\rho}{E_0}}$$

# Araç çarpışma güvenliği analizleri



# Modellerin Doğrulanması

---



# Araç Çarpışma Analizleri için Süperbilgisayar Kullanımı

---

Ls-Dyna Çözücüleri:

- **SMP** (Symmetric Multi-Processing): OpenMP ile paralel çözümler aynı hafıza biriminde gerçekleşir. 8 CPU'ya kadar ölçeklenebilir.
- **MPP** (Massively Parallel Processing): MPI protokolü ile bölge ayrıklaştırması (domain decomposition) yapılarak ağ üzerindeki çekirdekler arasında iş yükü dağıtılır. 8 CPU'dan fazla ölçeklenebilir.

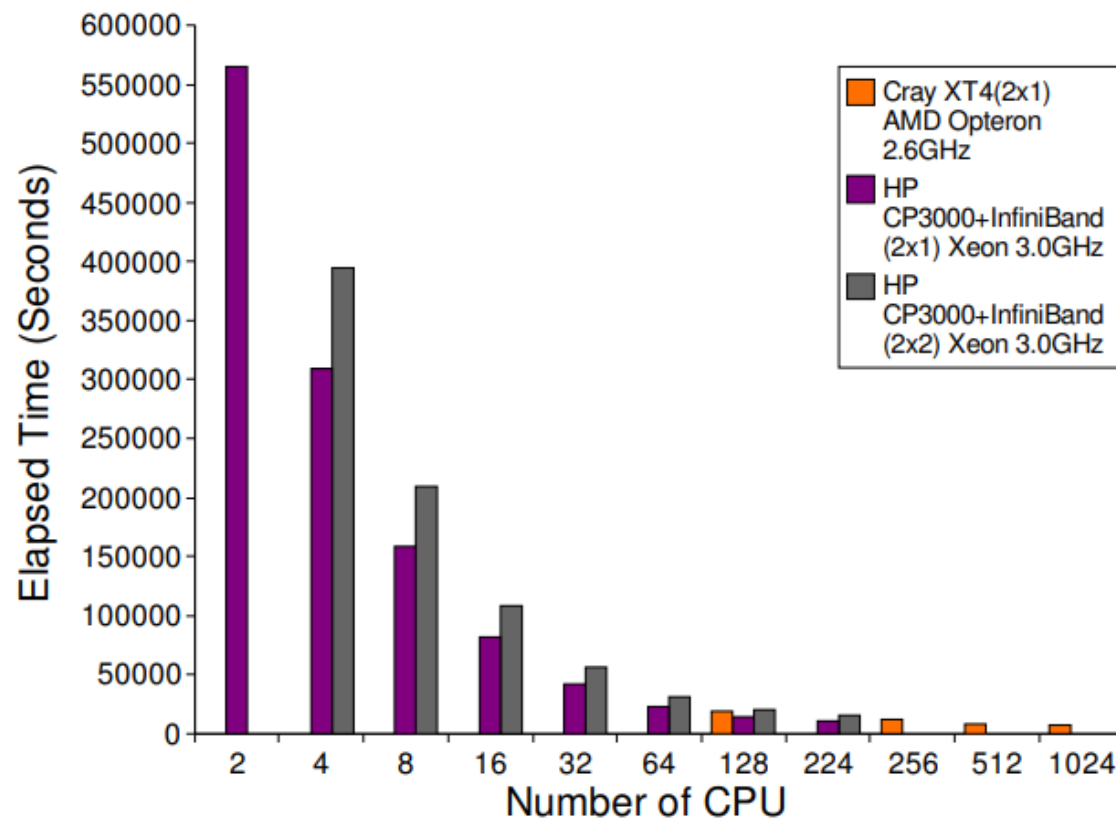
Bölge ayrıklaştırma (domain decomposition):





# MPP Ölçekleme

## Scalability on Large Number of CPUs

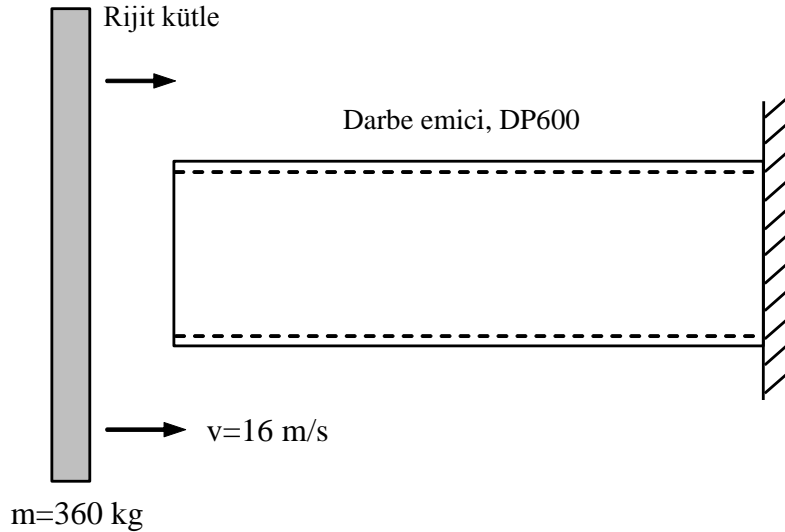


# LS-Dyna ile Analiz Süreci

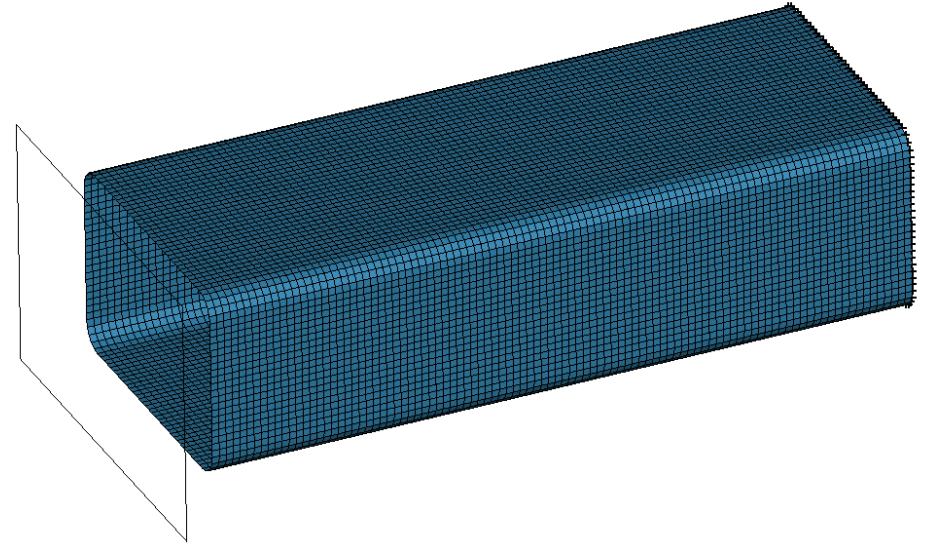
## 1. Ön İşlemler (Pre-processing):

CAD modeli hazırlanır. Model elemanlara ayrılır, malzeme modeli tanımlanır, sınır şartları, temas tanımları yapılarak model çözülebilir hale getirilir.

Hypermesh, LS Prepost vb. yazılımlar kullanılır.



Darbe emici problem tanımı



Sonlu elemanlar modeli ve sınır şartları

# Ls-Dyna key dosyası

## 2. Çözüm: Çözüm için Ls-dyna key dosyası oluşturulur\*

```
*KEYWORD
*TITLE
rect6040
*CONTROL_TERMINATION
$$ ENDTIM      ENDCYC      DTMIN      ENDENG      ENDMAS
    0.012
*DATABASE_GLSTAT
1.0000E-05      1
*DATABASE_MATSUM
1.0000E-05      1
*DATABASE_RCFORC
1.0000E-05      1
*DATABASE_SPCFORC
1.0000E-05      1
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
$$ DT/CYCL      LCDT      BEAM      NPLTC
5.0000E-05
    0
*NODE
    1      -150.0      0.0      5.0
    2      -150.0      0.0      6.5
    3      -150.0      0.0      8.0
*ELEMENT_SHELL
    1      2      327      329      323      324
    2      2      329      319      320      323
    3      2      328      330      329      327
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
$HMNAME MATS      1dp600
                17.8500E-09  210000.0      0.3      390.0
*SECTION_SHELL
$HMNAME PROPS      1shell
    1      2
    1.5      1.5      1.5      1.5
*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE_ID
    2
    0      0
    0.08      0.08
*RIGIDWALL_PLANAR_MOVING_ID
    1
    0
    10.0      30.0      20.0      9.0      30.0
    20.0
    0.36      15600.0
*DEFINE_CURVE
$HMCURVE      1      0 DP600
    1      0      1.0      1.0      0.0
    0.0      0      4.1E-05      390.0
    1.16E-04      395.8
    4.84E-04      408.01
    1.064E-03      419.53
    0.00235      436.51
    0.005231      461.66
    0.01144      497.92
*END
```

\*Dosya kısaltılmıştır.

# Çözüm adımları

---

Süperbilgisayarda çözüm adımları:

1. key dosyası (input) Secure Copy (scp) komutu ile süperbilgisayardaki kullanıcı klasörüne kopyalanır.
2. Secure Shell (ssh) ile süperbilgisayara bağlantı yapılır.
3. qsub ile Ls-dyna (MPP) script dosyası çalıştırılır. qs ile süreç izlenir.

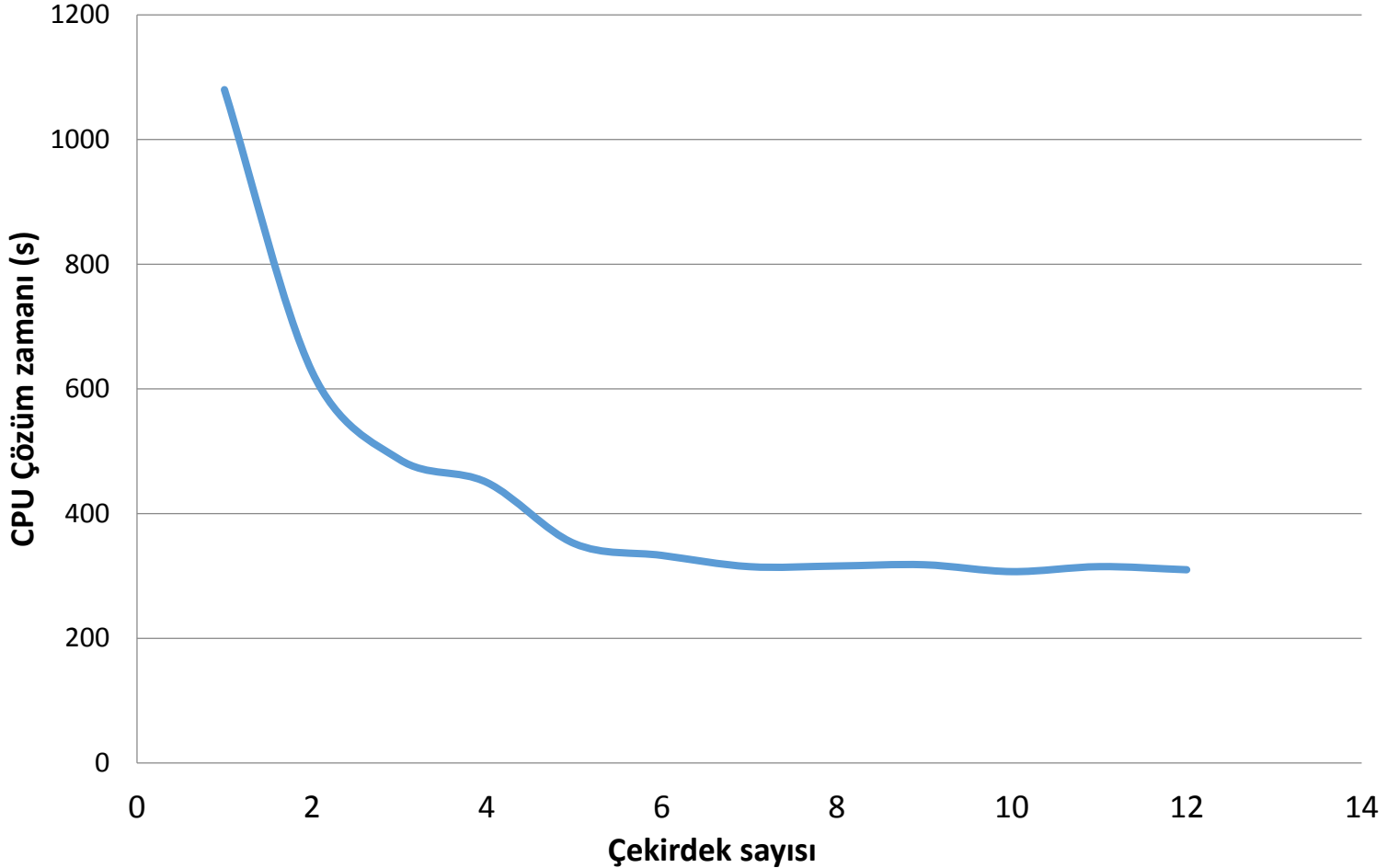
Örnek bir script dosyası:

```
#!/usr/bin/ksh
#PBS -A hpc13369
#PBS -q dq                # queue: dq for <=8 CPUs
#PBS -l cpunum_prc=4      # cpus per Node
#PBS -b 1                 # number of nodes
#PBS -l cputim_job=5000   # max accumulated cputime
#PBS -l memsz_job=4gb     # max accumulated memory
#PBS -j o                 # join stdout/stderr
#PBS -N dyna              # job name
#PBS -M necmi@uludag.edu.tr # you should always specify your email address
export LSTC_LICENSE_SERVER=asama.hww.de
/app/sx/struct/dyna/970_6763/ls970_d_6763_necsx_141_p ncpu=12 i=1060_th075.key
```

4. Çözüm dosyaları yerel bilgisayara kopyalanarak Ls Pre-post ile sonuçlar incelenir.

# Ls-dyna SMP ölçekleme

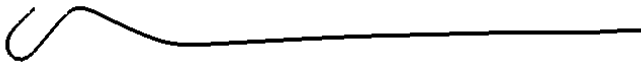
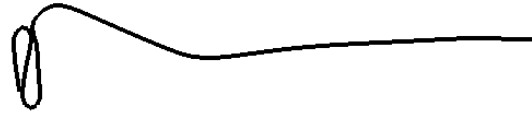
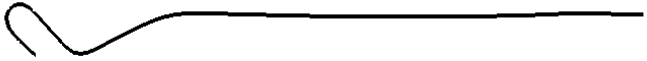
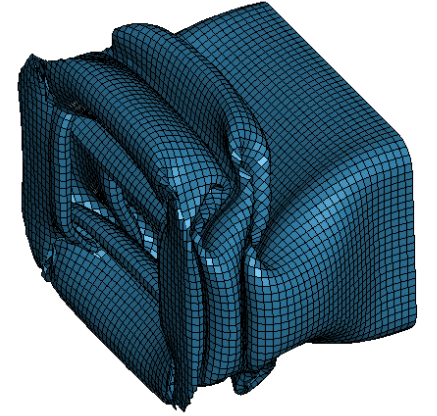
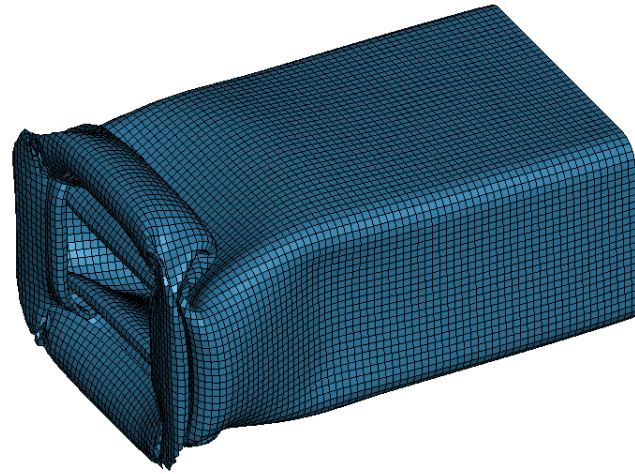
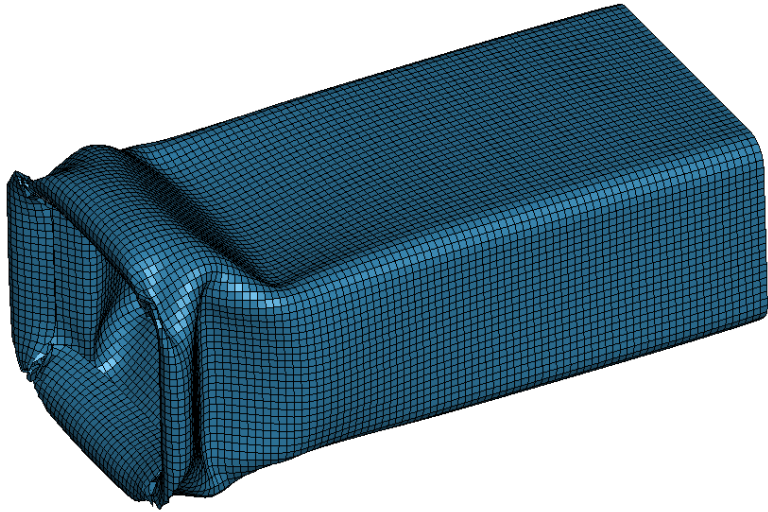
Ls-dyna SMP versiyonu ile ölçekleme sonuçları (İş istasyonu):



# Sonuçlar

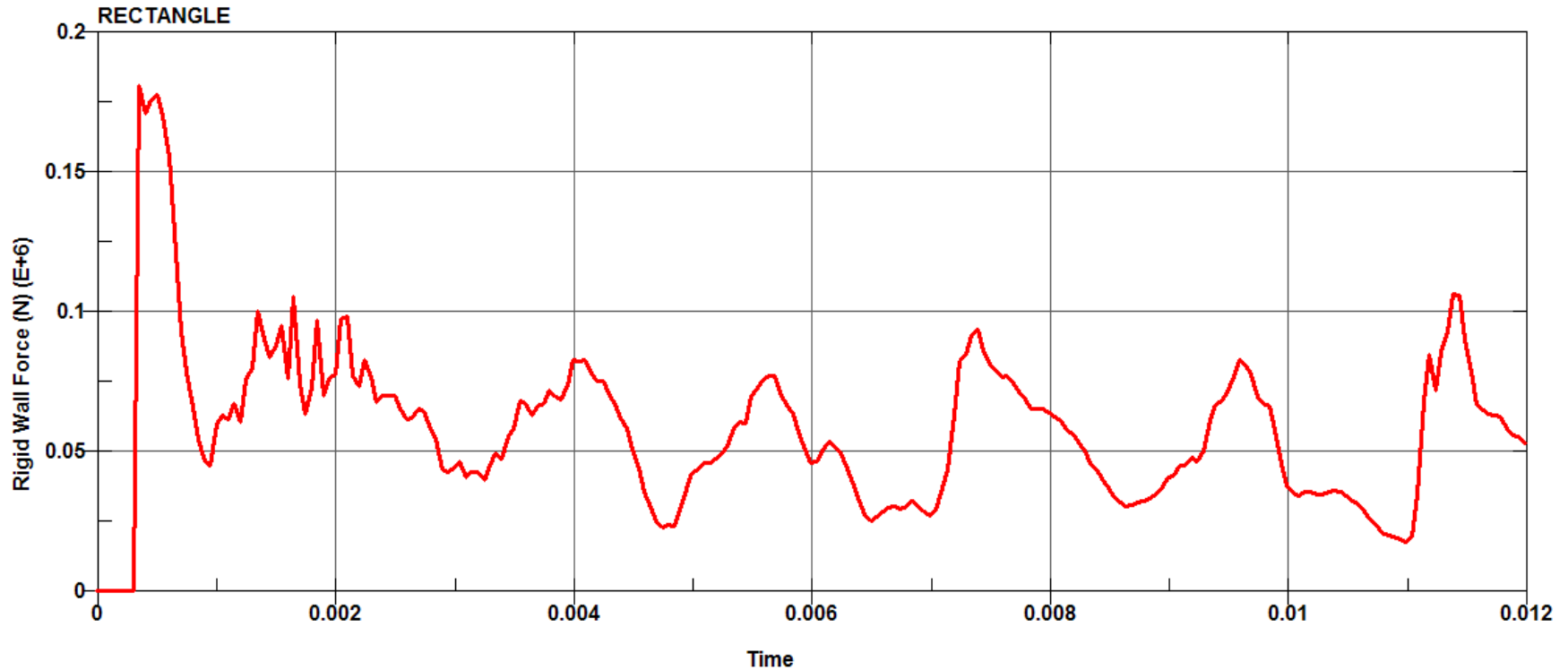
---

## 3. Sonuçların incelenmesi (Post-processing):



# Sonuçlar

Dikdörtgen kesit tepki kuvveti değişimi:



$F_{init}=181$  kN

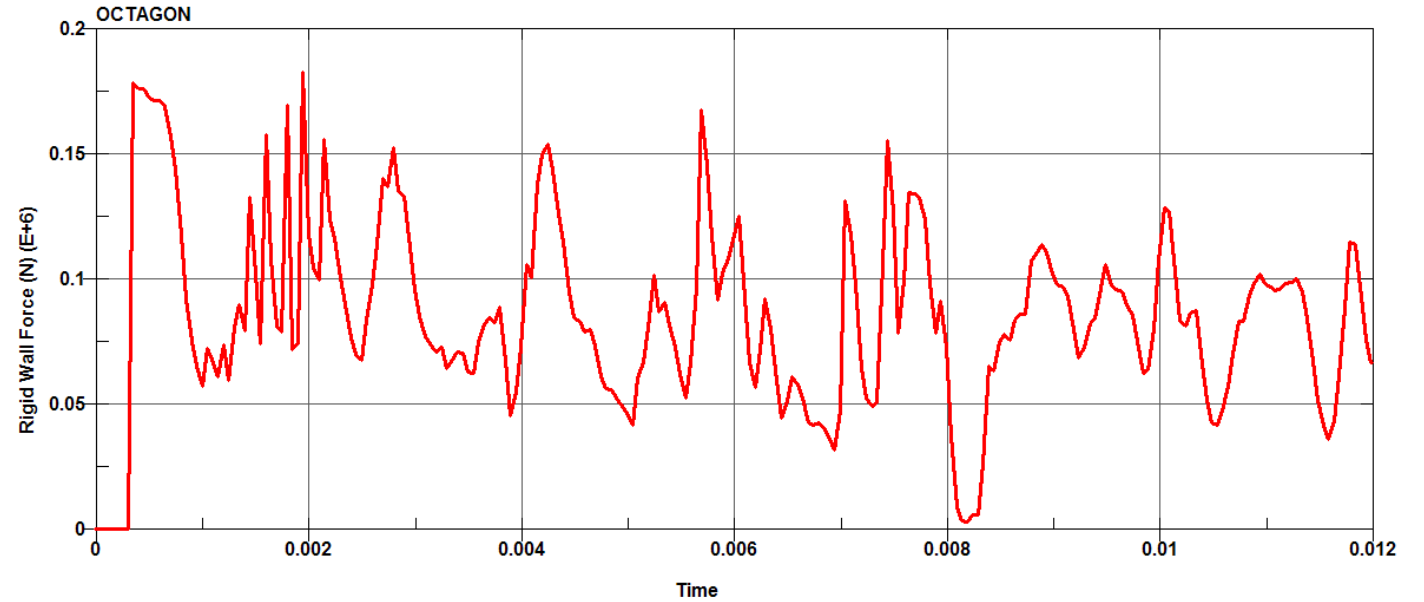
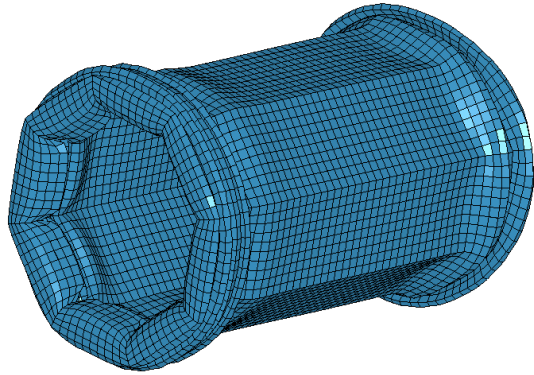
$F_{max}=181$  kN

$E_{abs}=9.88$  kJ

$disp_{max}=175.22$  mm

# Sonuçlar

Sekizgen kesit:



$$F_{init}=178 \text{ kN}$$

$$F_{max}=182 \text{ kN}$$

$$E_{abs}=14.22 \text{ kJ}$$

$$disp_{max}=170.16 \text{ mm}$$

**Kaynak:** Necmettin Kaya and Ferruh Öztürk, Multi-objective crashworthiness design optimisation of thin-walled tubes, *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 52, Nos. 1/2/3/4, 2010



# Değerlendirme ve Yorumlar

---

- Doğrusal olmayan ve yüksek sayıda eleman içeren sonlu elemanlar modellerinde **süperbilgisayar** alt yapısı kullanılması kaçınılmazdır.
- Araç geliştirme sürecinde **daha fazla eleman** kullanımı ile daha doğru sonuçların elde edilmesi bir çok tasarımın analizler ile doğrulanması sonucu üretime geçiş süreci **hızlanmıştır**.
- Sadece ana araç üreticileri değil, **yan sanayi** firmaları ve **mühendislik** firmalarının da yakın gelecekte süperbilgisayar altyapısına ihtiyacının artacağı söylenebilir.
- Araçlarda **aktif güvenlik, ileri sürüş yardımcı sistemleri ve otonom sürüş** özellikleri geliyor. Gelecekte araçlarda da süperbilgisayar altyapılarını görmeye başlayabiliriz.

“ Finite Element Analysis makes  
a *good* engineer *great*,  
and  
a *bad* engineer *dangerous* !”

Robert D. Cook,  
Professor of Mechanical Engineering  
University of Wisconsin, Madison

- Eleman sayısı ? Eleman tipi?
- Doğru analiz türü?
- Sınır şartları ?
- Malzeme modeli ? Malzeme değerleri?
- Sonuçları yorumlama ?

---

Dinlediđiniz için teŝekkürler.