

# ADAMS KONTAK MEKANİĞİNE GİRİŞ

HAZIRLAYAN	KONTROL EDEN
EREN MORGİL MEKANİK SİMÜLASYON ADAY MÜHENDİSİ	UMUT CAN SALMAN MEKANİK SİMÜLASYON MÜHENDİSİ

Tarih: 20/04/2022

Nesneler arasındaki temas (contact), çoklu cisim dinamiği analizlerinin önemli bir faktörüdür. Süreksiz (discontinuous), doğrusal olmayan (nonlinear) bir olgudur ve yinelemeli (iterative) hesaplamalar gerektirir. Dünyada en yaygın kullanılan çoklu cisimler dinamiği yazılımı olan Adams, bu hesaplamaları yapmakta ve gerçekçi sonuçlar verebilmektedir. Gerçeğe yakınlık, kullanıcı tanımlı değerlere bağlıdır. Bu nedenle kullanıcının program, algoritmalar ve değişkenler hakkında bilgi sahibi olması önemlidir.

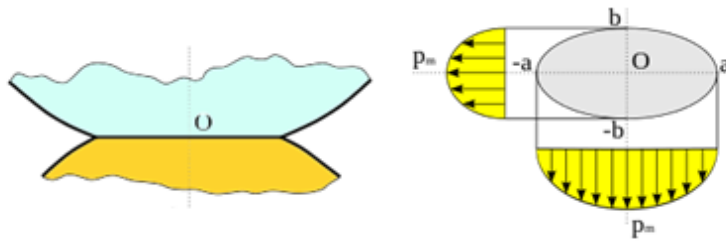
Adams'in temas anlayışı, Hertzian Temas Teorisi'ne dayanmaktadır. Bu yazıda öncelikle, Adams tarafından kullanılan temas yöntemleri (IMPACT Fonksiyon Modeli, POISSON Restitüsyon Modeli ve Coulomb Sürtünme Modeli) ile ilgili teori ve arka plan bilgileri ele alınacaktır. Daha sonra, oluşturulan iki Adams View modelinde, temas yöntemlerinin parametreleri değiştirilerek temas davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilecektir.

## 1. HERTZIAN TEMAS TEORİSİ

Temas mekaniği, bir veya daha fazla noktada birbirine değen katıların deformasyonunun incelenmesidir. Temas mekaniğinde merkezi bir ayırım vardır. Bu ayırım, temas eden cisimlerin yüzeylerine dik olarak etki eden gerilmeler (normal yön olarak bilinir) ile yüzeyler arasında teğet olarak etki eden sürtünme gerilmeleri arasındadır.

**Hertzian teorisi, aşağıdaki gibi bir dizi varsayıma dayanmaktadır:**

- Temas eden gövdeler, yapışma kuvvetleri olmadan ayrılabilir. Yani, yapışma ihmal edilir.
- Yüzeyler süreklidir. İlk temas bir nokta veya bir çizgidir.
- Malzemelerdeki basınçlar, sadece elastik deformasyonlara neden olacak kadar küçüktür.
- Temas alanı, cismin karakteristik yarıçapından çok daha küçüktür.
- Yüzeyler tamamen pürüzsüzdür, yani temas halindeki parçalar arasında yalnızca normal bir kuvvet etki eder.



**Şekil 1** Hertzian Temas Teorisi'nin Şematik Gösterimi

Şekil 1'de Temas halindeki iki nesnenin (turkuaz ve turuncu) yandan görünümünü görmekteyiz. Gri alan, eliptik temas alanının üstten görünümünü temsil eder, sarı alanlar her iki boyutta da yarı elipsoidal basınç dağılımlarıdır.

**Kontak direngeliği aşağıdaki denklemlerle her iki cismin malzeme özelliklerine bağlıdır:**

Kontak Direngeliği:

$$k_c = 2aE^*$$

Hertz Kontak Yarıçapı:

$$a = \left(\frac{3LR}{4E^*}\right)^{1/3}$$

Eşdeğer Young's Modülü

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^{-1}$$

Eşdeğer Eğrilik Yarıçapı:

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1}$$

Normal Kuvvet:

$$L$$

$$F = k_c(x_1 - x) = 2aE^*(x_1 - x) = 2 \left( \frac{3L \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1}}{4 \left( \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)^{-1}} \right)^{1/3} \left( \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)^{-1} (x_1 - x)$$

Yukarıdaki formülde yay kuvveti, direngenlik ve penetrasyon derinliğine ( $x_1-x$ ) bağlıdır. Direngenlik, her iki malzemenin Young Modülü ve Poisson Oranlarına, her iki nesnenin yarıçapına ve nesnelerin birbirine bastırıldığı kuvvete bağlıdır. Daha büyük bir penetrasyon derinliği, daha büyük bir geri yükleme normal kuvvetine ( $L$ ) yol açar. Bu nedenle temas direngenliği sabit değildir. Bu da kuvveti doğrusal olmayan hale getirir. Bundan dolayı ampirik değer olan, ek bir kuvvet üssü ( $e$ ) kullanılır.

## 2. ADAMS GEOMETRİ MOTORLARI

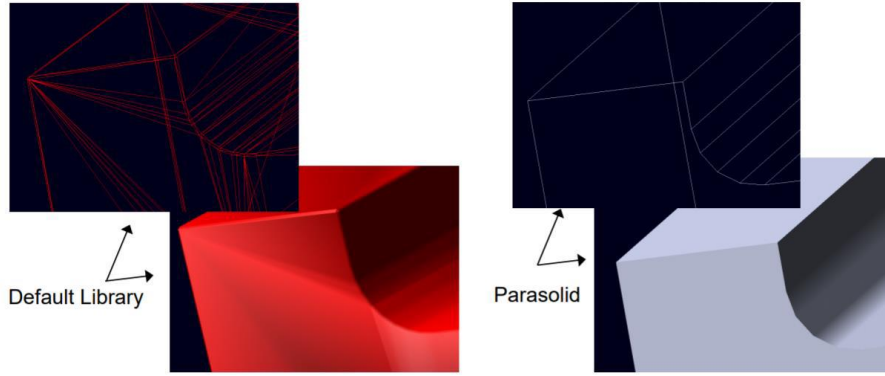
Temas kuvvetleri, iki bileşenden oluşur. Bir bileşen normal (temas yüzeyinin) yönündedir ve diğer bileşen bu normale diktir. Birincisine normal kuvvet denir ve ikincisine teğetsel kuvvet veya daha yaygın adıyla sürtünme olarak bilinir. Adams'ın bu bileşenleri hesaplaması için temas noktalarını ve kantağın ortak normalini belirlemesi gerekir. Adams, bunları belirlemek için iki yerleşik geometri motorundan birini kullanır. Parasolid ve Rapid.

### 2.1. Parasolid

Parasolid, geometrilerin belirli sınırlarla temsil edildiği ve daha küçük parçalarla temsil edilmediği bir modelleme motorudur. Kavisli yüzeyler olduğu gibi yansıtılır ve çokgenlerden oluşturulmaz. Yüzeyler daha küçük parçalara ayrılmadığından, gösterimleri mümkün olduğu kadar gerçeğe yakındır. Parasolid geometri motoru kullanılırken simülasyon süreleri nispeten uzundur.

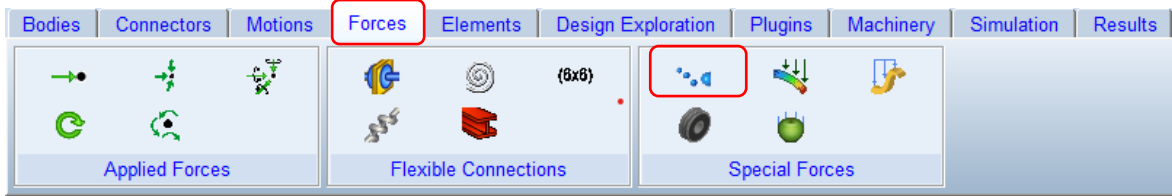
### 2.2. Rapid

Rapid, Adams'ta varsayılan geometri motorudur. Cisimler büyük miktarda çokgenlere bölünür. Temas sınırında çokgenlerin kullanılması nedeniyle Parasolid'in oluşturduğu kesin temas sınırından daha az doğrudur. Rapid'in avantajı Parasolid'den daha hızlı olmasıdır.



Şekil 2 RAPID ve Parasolid Motorunun Karşılaştırılması

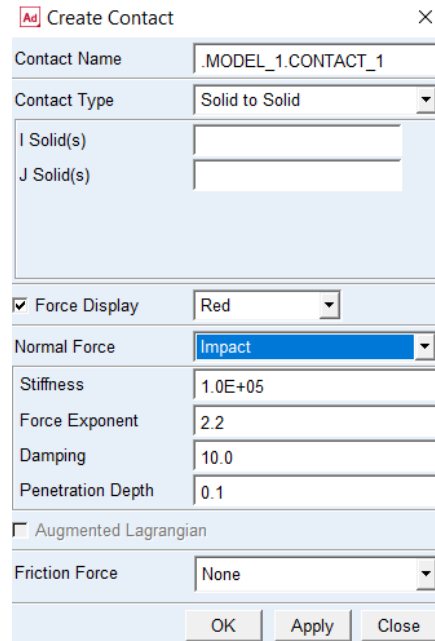
### 3. ADAMS'TA KONTAK OLUŞTURMA



Şekil 3 Adams View Arayüzünde Kontak Oluşturma

#### 3.1. IMPACT Fonksiyon Modeli

- Şekil 4'te Adams'ta '**Create Contact**' iletişim kutusunu göstermektedir.
- Bir Adams kullanıcısı iki cisim arasında bir temas oluşturacaksa, ilk önce normal kuvvetin hesaplanması için bir model seçmelidir.
- IMPACT fonksiyon modeli ve POISSON modeli (Restitution) arasında bir seçim yapılır.
- IMPACT fonksiyon modeli seçildikten sonra dört değişken tanımlanmalıdır; dirençlik, kuvvet üssü, sönümleme ve penetrasyon derinliği.



Şekil 4 IMPACT Fonksiyon Seçimi

$$IMPACT(x, \dot{x}, x_1, k, e, c_{max}, d)$$

$x$	IMPACT fonksiyonunu hesaplamak için kullanılan bir mesafe değişkenini belirten ifadedir.
$x'$	$x$ 'in IMPACT'a zaman türevini belirten bir ifadedir.
$x_1$	$x$ 'in serbest uzunluğunu belirten pozitif bir reel değişken. $x, x_1$ 'den küçükse, Adams kuvvet için pozitif bir değer hesaplar. Aksi takdirde, kuvvet değeri sıfırdır.
$k$	Sınır yüzey etkileşiminin direngenliğini belirten negatif olmayan bir gerçek değişken.
$e$	Kuvvet deformasyon karakteristiğinin üssünü belirten pozitif bir gerçek değişken. Direngenleştirici bir yay özelliği için, $e > 1.0$ . Yumuşatıcı yay özelliği için $0 < e < 1.0$ .
$c_{max}$	Maksimum sönümleme katsayısını belirten negatif olmayan bir gerçek değişken.
$d$	Adams'ın tam sönümleme uyguladığı sınır penetrasyonunu belirten pozitif bir gerçek değişken.

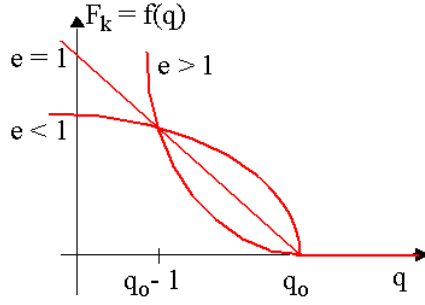
$$F = \begin{cases} 0 & \text{if } x > x_1 \\ k(x_1 - x)^e - c_{max}\dot{x} * STEP(x, x_1 - d, 1, x_1, 0) & \text{if } x \leq x_1 \end{cases}$$

IMPACT fonksiyonu yukarıda yazılmıştır. İki nesne arasındaki mesafe,  $x$ 'in serbest uzunluğundan ( $x_1$ ) daha küçük olduğunda etkinleştiği görülebilir. Böyle olduğunda, kuvvet sıfır olmaz, üstel bir yay kuvveti ve STEP fonksiyonunu izleyen bir sönüm kuvveti olarak iki kısımdan oluşur. Her iki kuvvetin de kesinlikle pozitif olduğuna dikkat edilmelidir. Bunun nedeni, hesaplanan normal kuvvetin penetrasyon sırasında oluşan sıkıştırmaya karşı gelmesidir. Negatif kuvvetler, gerçek bir normal kuvvetin asla yapmayacağı sıkıştırmayı destekleyecektir.

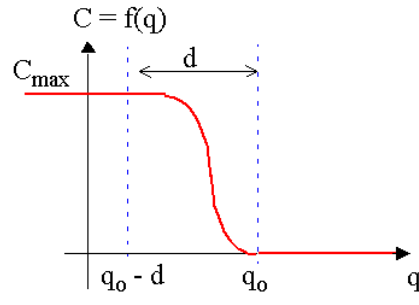
Temassız alandan temas alanına geçerken bile yay kuvvetinin eğiminin sürekli olması için  $e > 1$  kullanılması tavsiye edilir. Yapılan araştırmalardan<sup>[ii]</sup>, direngen metallerin  $e \cong 2.2$ , daha yumuşak metallerin  $e \cong 1.5$  ve kauçuk gibi daha yumuşak malzemelerin  $e \cong 1.1$  değerini gerektirdiği söylenebilir.

$x, x_1$ 'den küçük olduğunda, doğrusal bir sönümleyici ( $F = -cx'$ ) sönümleme kuvvetinde bir süreksizliğe neden olacaktır. Bu problemden kaçınmak için, sönümleme kuvvetini sıfırdan  $c_{max}x'$  değerine çıkarmak için  $d$  penetrasyon derinliğinin de içinde bulunduğu bir STEP fonksiyonu kullanılır. Penetrasyon derinliğinin  $d$ , bir çarpışma sırasında mutlaka maksimum penetrasyon derinliği olmadığı unutulmamalıdır. Sadece sönümlemenin maksimum olduğu bir penetrasyon derinliğidir.

Compression-only spring force from one-sided IMPACT function



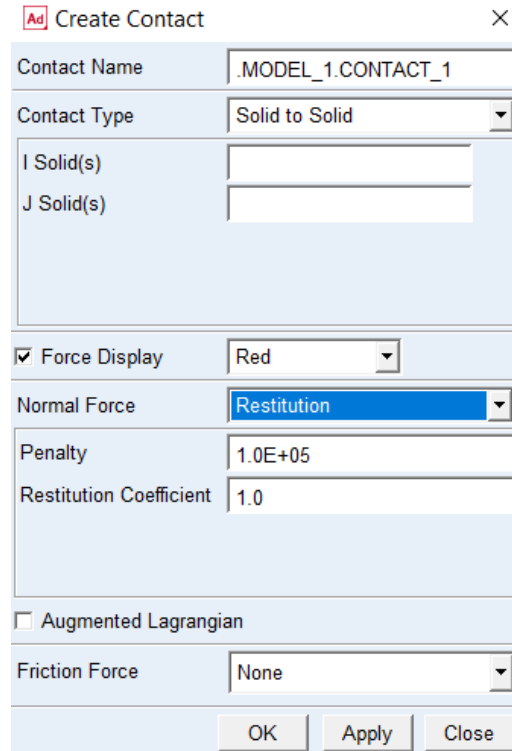
Compression-only damping force from one-sided IMPACT function



Şekil 5 IMPACT Fonksiyonunun yay kuvveti ve sönümleme kuvvetinin davranışı

### 3.2. POISSON Restitution Modeli

- Normal kuvvetleri hesaplamak için bir diğer yöntem ise Adams'ta Restitution'dır.
- Restitution yöntemi normal kuvvetleri hesaplamak için kullandığımız diğer bir yaklaşımdır.
- Bu yöntemde restitüsyon katsayısı kritiktir. Tam esnek (**COR= 1.0**) ve tam esnek olmayan (**COR = 0.0**) çarpışma arasındaki sürekliliği tanımlar.
- Direngenlik parametresine benzer bir **Penalty** parametresi vardır. Küçük bir **Penalty** değeri, geçilmezlik kısıtlamasına (nesneler arasında negatif boşluk olmaması) uyulmaması ile sonuçlanacak ve dolayısıyla hatalı sonuçlar verecektir. Giesbers<sup>[ii]</sup> yaptığı çalışmada, MMKS (mm, kg, N, s, deg) birim sistemi uygulanan modelde  $10^5$  veya  $10^6$  değeri kullanılabileceğinden bahsetmiştir.



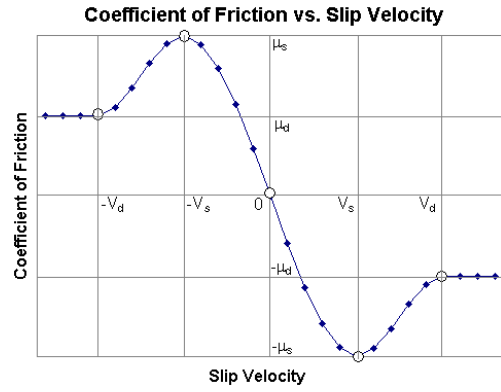
Şekil 6 POISSON Restitution Fonksiyon Seçimi

### 3.3. Coulomb Sürtünme Modeli

- Adams'ta bir kontak oluştururken, normal kuvvet hesaplaması zorunludur. Ama Coulomb Sürtünmesi isteğe bağlı olarak hesaplanabilir. Kullanıcı tercihiyle modele eklenebilir.
- Dört parametre ( $\mu_s$ ,  $\mu_d$ ,  $V_s$ ,  $V_d$ ) iletişim penceresinde kullanıcı tarafından belirlenir. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları genellikle 0 ile 1 arasındadır.
- Adams, kullanıcı tarafından belirlenen dört değerle her kayma hızı için sürtünme katsayılarını hesaplayabilir. Gerçek sürtünme kuvvetini belirlemek için bu katsayı normal kuvvetle çarpılmalıdır. Dolayısıyla normal kuvvet hesabında yapılan seçimler sürtünme kuvvetinin hesabı için de önemlidir.

Friction Force	Coulomb
Coulomb Friction	On
Static Coefficient	0.3
Dynamic Coefficient	0.1
Stiction Transition Vel.	100.0
Friction Transition Vel.	1000.0
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Apply"/> <input type="button" value="Close"/>	

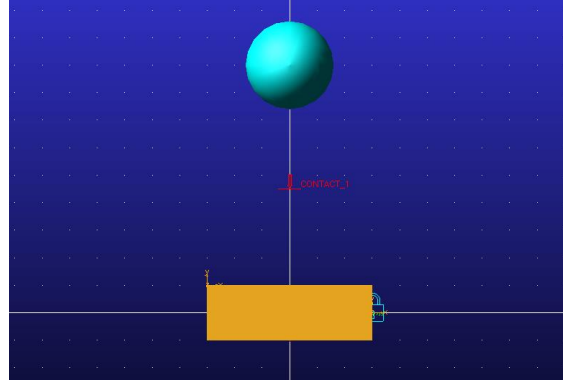
Şekil 7 Coulomb Sürtünme Modeli Seçimi



Şekil 8 Kayma Hızı-Sürtünme Katsayısı Grafiği

## 4. SERBEST DÜŞEN TOP MODELİ

Kontak parametrelerini inceleyebilmek için Adams'ta serbest düşen top modeli oluşturulmuştur. Adams'ın varsayılan (default) ayarlarında değişiklik yapılmadan kürenin malzemesi çelik olarak atanmış ve kütle-atalet değerleri belirlenmiştir. Daha sonra kürenin, düzlem üzerine düştükten sonraki davranışı gözlemlenmiştir. Hareket tamamen dikey olduğu için sürtünme hiçbir rol oynamaz ve kapatılır. IMPACT fonksiyon modelinin ve POISSON restitüsyon modelinin farklı değişkenlerinin temas davranışı üzerindeki etkilerini göstermek için, başlangıçta merkezi 0,45 metrede olan ve düzlemle 0,05 metrede çarpışan 0.1 metre yarıçapa sahip kürenin kütle merkezinin Y koordinatı analiz edilmiştir. İlk olarak IMPACT fonksiyon modeli ve ikinci olarak POISSON restitüsyon modeli incelenmiştir. Bu araştırmanın her iki model üzerindeki bulguları son bölümünde tartışılacaktır.



Şekil 9 Adams View'de Oluşturulan Serbest Düşen Top Modeli

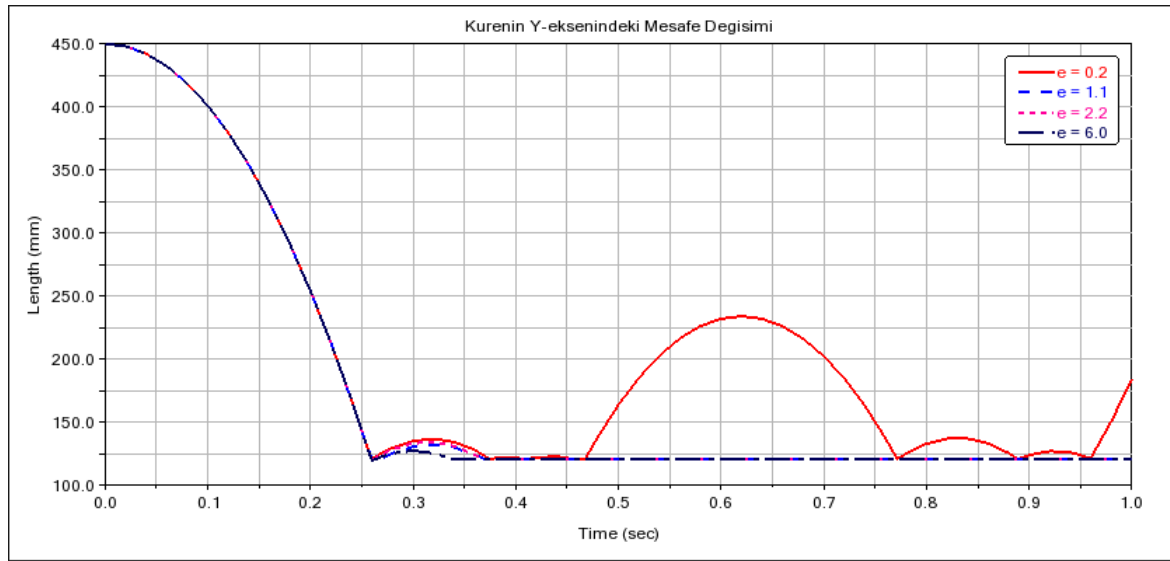
#### 4.1. IMPACT Fonksiyonu:

Stiffness	1.0E+05
Force Exponent	2.2
Damping	10.0
Penetration Depth	0.1

Adams'ta standart değerlerden yola çıkarak, kürenin davranışı farklı  $e$  değerleri için tartışılmıştır. Simülasyonlar 1 saniye için 1000 adımda çözülmüştür. Direngenlik birimi N/m, kuvvet üssü boyutsuz, sönüm birimi Ns/m ve penetrasyon derinliği metredir.

Beş farklı  $e$  değeri için Şekil 10'da sonuçlar gösterilmiştir. Buna göre:

- Düşük  $e$  değerleri, küre hareketsizken geri tepmelere ve titreşimlere yol açtığı,
- Yüksek  $e$  değerlerinde küre, artan penetrasyon derinlikleri ile zemindeki geri tepme ve titreşim sayısının azaldığı,
- Zıplamanın olmadığı bir optimum  $e$  değeri olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 10 Dört farklı kuvvet üssü değeri için kürenin Y eksenindeki yer değiştirmesi

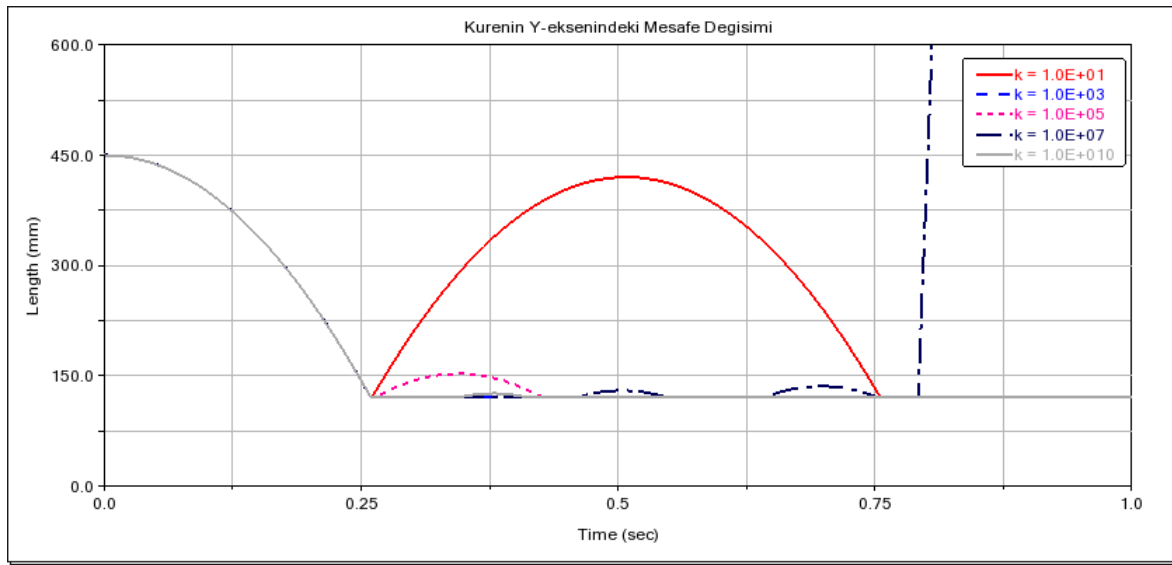


Force Exponent	1.1
Damping	10.0
Penetration Depth	0.1

Direngeçlik değişkeni olan  $k$ 'nin etkisini göstermek için, farklı  $k$  değerlerine sahip birkaç durum çizilir. Standart ayarlarda ve düşük kuvvet üstünde,  $k$ 'nin etkisi daha kolay görülebilir.

**Beş farklı  $k$  değeri için Şekil 11'de sonuçlar gösterilmiştir. Buna göre:**

- Düşük  $k$  değerleri daha büyük genlikli geri tepmelere yol açtığı,
- Büyük  $k$  değerlerinde, titreşim sayısının arttığı,
- Optimum  $k$  deęerinden sonra, geri tepmeler ve titreřimlerin yok olduğu gözlemlenmiştir.

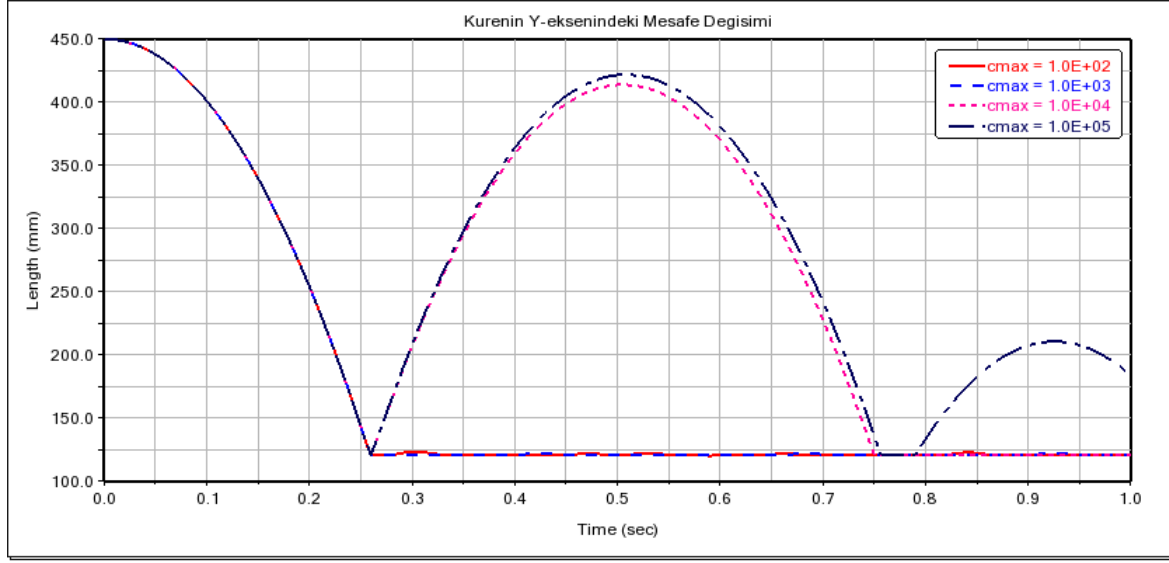


**Şekil 11** Beş farklı direngeçlik değeri için kurenin Y eksenindeki yer değiştirmesi

Stiffness	1.0E+05
Force Exponent	1.1
Penetration Depth	0.1

**Dört farklı  $c_{max}$  değeri için sonuçlar Şekil 12'de gösterilmiştir. Buna göre:**

- Düşük  $c_{max}$  değerleri, yüksek frekanslı küçük genlikli geri tepmelere yol açtığı,
- Büyük  $c_{max}$  değerleri, daha büyük genlikli geri tepmelere yol açtığı gözlemlenmiştir.



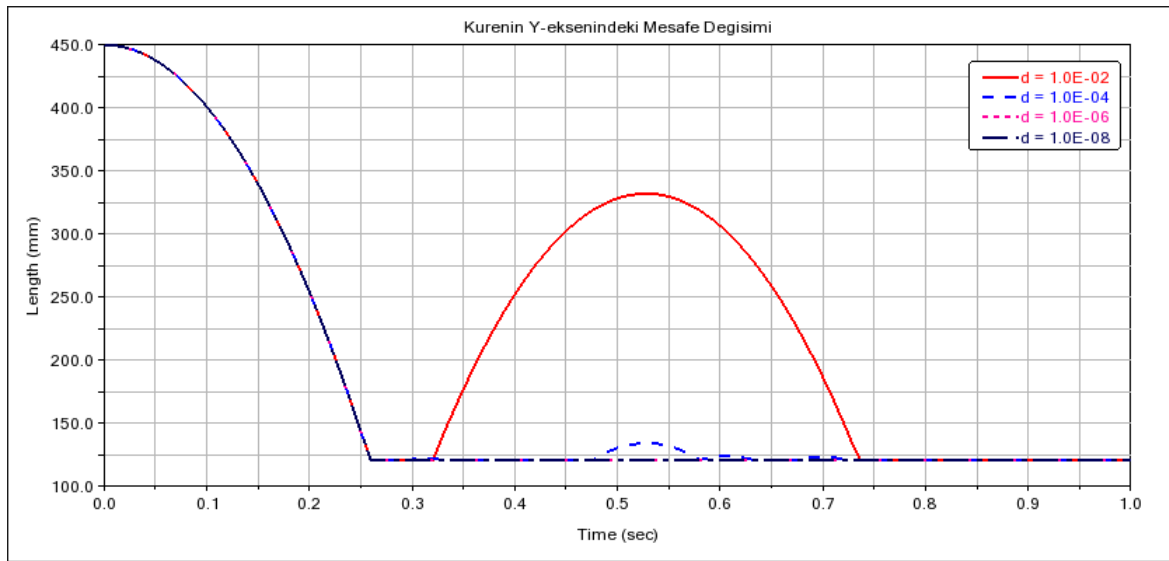
Şekil 12 Dört farklı maksimum sönüm değeri için kürenin Y eksenindeki yer değişimi

Stiffness	1.0E+05
Force Exponent	1.1
Damping	10.0

Bu derinlik maksimum penetrasyon derinliği değildir. Sönüm değerinin maksimum olduğu penetrasyon derinliğidir. Dolayısıyla kullanıcı tarafından belirlenen sönümleme değeri ile önemli bir ilişki içindedir.

**Dört farklı  $d$  değeri için Şekil 13'te sonuçlar gösterilmiştir. Buna göre:**

- Küçük  $d$  değerleri çok az farklılık gösterdiği,
- Artan  $d$  değerleri daha büyük geri tepmelere yol açtığı gözlemlenmiştir.



Şekil 13 Dört farklı penetrasyon derinliği için kürenin Y eksenindeki yer değişimi

## 4.2. POISSON Restitution Fonksiyonu:

Burada kullanıcı tarafından belirlenen iki değişken vardır. İlk olarak; Penalty değeri sabit tutulup, farklı COR değerleri için sonuçlar alınmıştır. Daha sonra COR değeri sabit tutulmuş ve farklı Penalty değerleri için sonuçlar alınmıştır. Penalty birimi Ns/m'dir. COR ise boyutsuzdur.

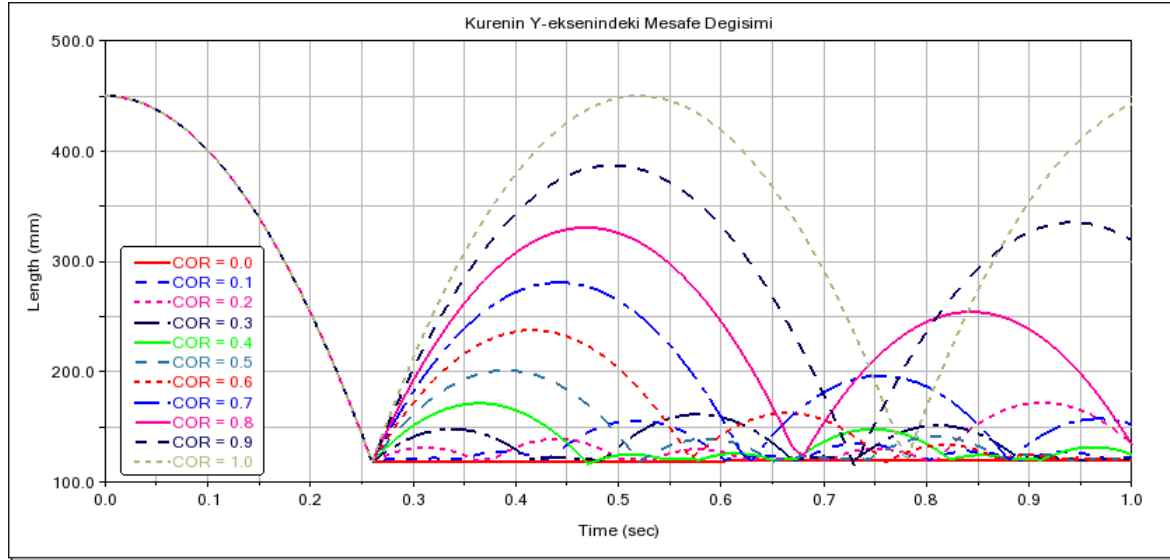
Penalty

1.0E+05

*COR* değeri 0 ile 1 aralığındadır. Burada %10'luk artışlardaki değerler alınıp, kürenin davranışı

incelenmiştir. **Sonuçlar Şekil 14'te gösterilmiştir. Buna göre:**

- **COR = 1.0**, enerji kaybının olmadığı anlamına gelir.
- **COR** değerinin küçültülmesi enerji kaybına yol açmıştır.
- **COR = 0.0** için enerji kaybı en büyük değerindedir.



**Şekil 14** On bir farklı restitution katsayısı için kürenin Y eksenindeki yer değiştirmesi

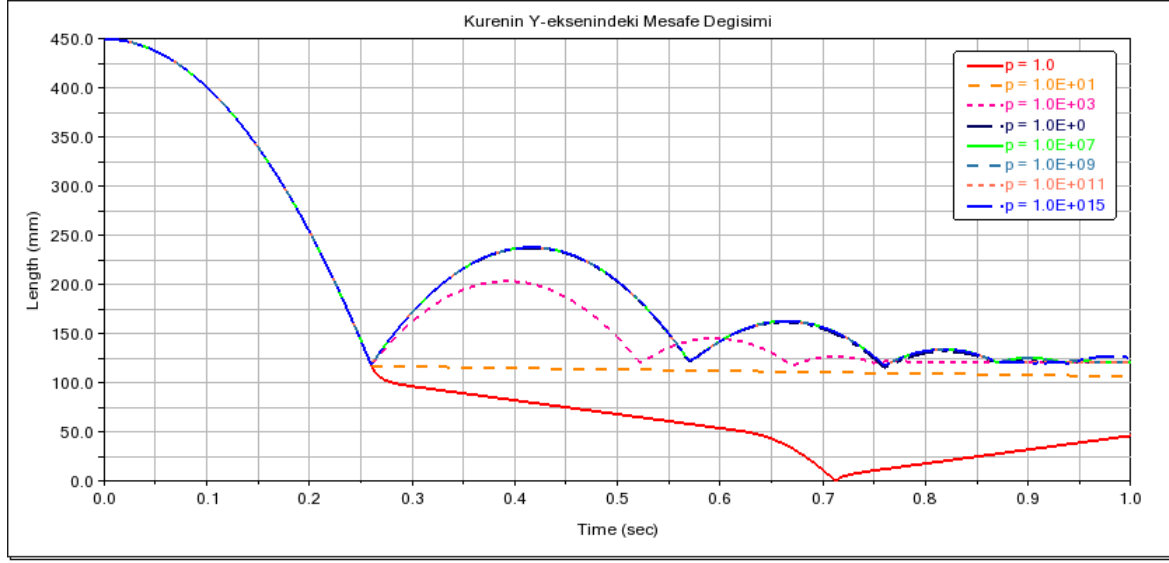
Restitution Coefficient

0.6

*Bu model için en optimum COR değeri 0.6 olarak belirlenmiştir. Kürenin davranışı farklı Penalty değerleri*

*için Şekil 15'te gösterilmiştir. Buna göre:*

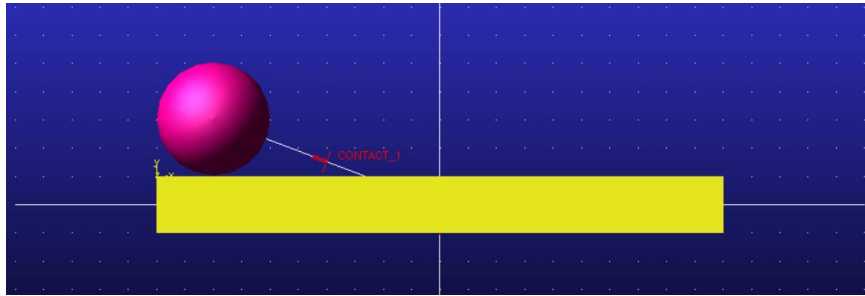
- **Penalty** değeri çok küçük olduğunda kürenin zemine battığı gözlemlenmiştir.
- **Penalty** değeri ne kadar büyükse, COR'a bağlı olarak kürenin davranışı o kadar iyi olur.
- **Penalty** değeri çok yüksek olduğunda kürede istenmeyen titreşimler oluşmuştur.



Şekil 15 Sekiz farklı penalty değeri için kürenin Y eksenindeki yer değiştirmesi

## 5. YUVARLANAN TOP MODELİ

Temas (contact) mekaniğinin en önemli fonksiyonlarından biri Coulomb Sürtünmesidir. Bu modelde Coulomb Sürtünme parametrelerinin temas davranışı üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için Adams View'da, düzlem üzerinde yuvarlanan bir küre modellenmiştir. Hareket tamamen yatayda olsa da, normal kuvvet ihmal edilemez. Sürtünme kuvveti normal kuvvete bağlıdır. Öncelikle normal kuvvetin, Coulomb Sürtünmesi ile uyumluluğu araştırılacaktır.



Şekil 16 Adams View'de Oluşturulan Yuvarlanan Top Modeli

Coulomb Sürtünme parametrelerinin, küre davranışlarındaki etkilerini göstermek için, kürenin kütle merkezinin X koordinatı ve ikinci türevi (X eksenı boyunca ivme) analiz edilmiştir. Teoriden, iki cisim arasında kayma olmadığında sürtünme kuvveti sıfır olduğu bilinmektedir. Bu nedenle küre hareket edemez. Kürenin ilk hareketi için başlangıç açıl hızı (Z-Ekseninde -500 radyan/s) verilmiştir.

## 5.1. Model İçin Uygun Değişkenlerin Belirlenmesi

Küre, tüm simülasyon boyunca zeminde hareket ettiği için sabit bir normal kuvvet beklenir. Normal kuvvetteki salınımlar sürtünme kuvvetini de etkileyecektir. Çünkü bu salınımlar sürtünme kuvvetinde de meydana gelecektir. Dolayısıyla ortaya çıkan normal kuvvetin az çok sabit olması beklenir.

Küre ve zemin malzemelerinin Young Modülleri, Poisson Oranları ve boyutları dikkate alınarak, bir IMPACT Fonksiyonu için bir direngenlik değeri hesaplanmıştır.

- **Malzeme Özellikleri:**

$$E_{küre} = 2.07E+11 \text{ N/m}^2 \Rightarrow \nu_{küre} = 0.29$$

$$E_{zemin} = 2.07E+11 \text{ N/m}^2 \Rightarrow \nu_{zemin} = 0.29$$

$$E^* = 1 / \left( \frac{1 - \nu_{küre}^2}{E_{küre}} + \frac{1 - \nu_{zemin}^2}{E_{zemin}} \right) \Rightarrow E^* = 1.13E+11 \text{ N/m}^2$$

- **Geometrik Özellikleri:**

$$R_{küre} = 0.1 \text{ m}$$

$$R_{zemin} = \infty$$

$$R = 1 / \left( \frac{1}{R_{küre}} + \frac{1}{R_{zemin}} \right) \Rightarrow R = 0.1 \text{ m}$$

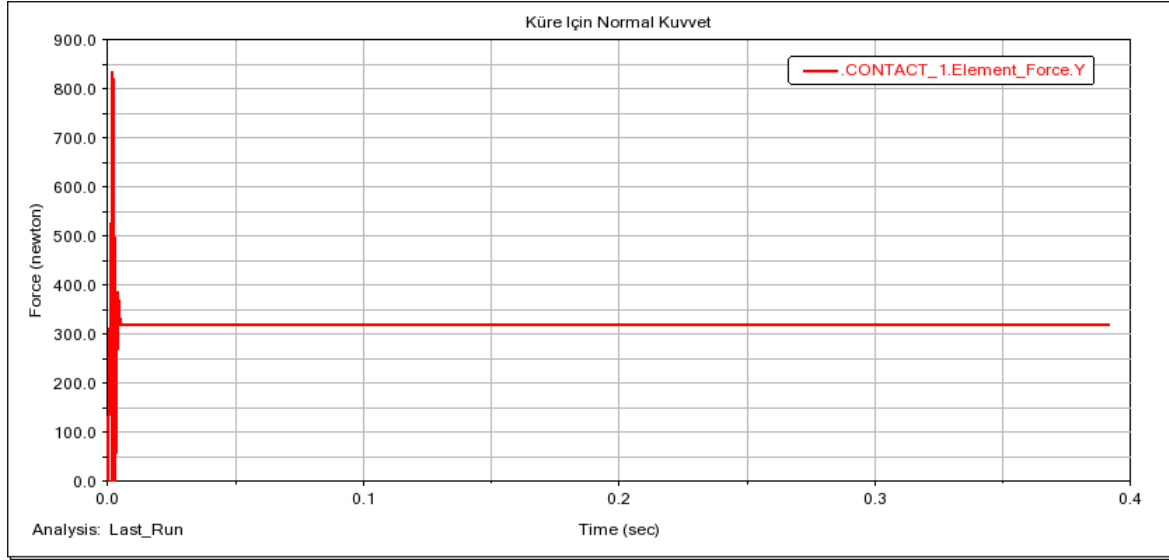
- **Direngenlik Hesabı:**

$$K = \left( \frac{16RE^*2}{9} \right)^{1/2} \Rightarrow k = 4.7645E+10 \text{ N/m}$$

- Küre malzemesi çeliktir. Bundan dolayı  $e = 2.2$  alınmıştır.
- $d_{max} = 1\%R = 0.001 \text{ m}$  ve  $c_{max} = 1.0E+06$  olarak alınmıştır.

```
Aggregate mass for objects:
.contact_coulomb.Kure
The aggregate mass in the global reference frame is:
Mass : 32.6767523875 kg
```

Şekil 17 Aggregate Mass Aracından Hesaplanan Kürenin Toplam Kütlesi



Şekil 18 Küreye Uygulanan Normal Kuvvet

## 5.2. Coulomb Sürtünme Modeli:

Aşağıdaki tüm simülasyonlar, hesaplanan IMPACT Fonksiyonu parametrelerine göre gerçekleştirilmiştir. Simülasyon 1 saniye için 1000 adımda çözülmüştür. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları boyutsuzdur ve geçiş hızları m/s birimine sahiptir. Bu modelde MMKS (mm, kg, N, s, deg) birimleri kullanıldığı için geçiş hızları birimi mm/s cinsindedir.

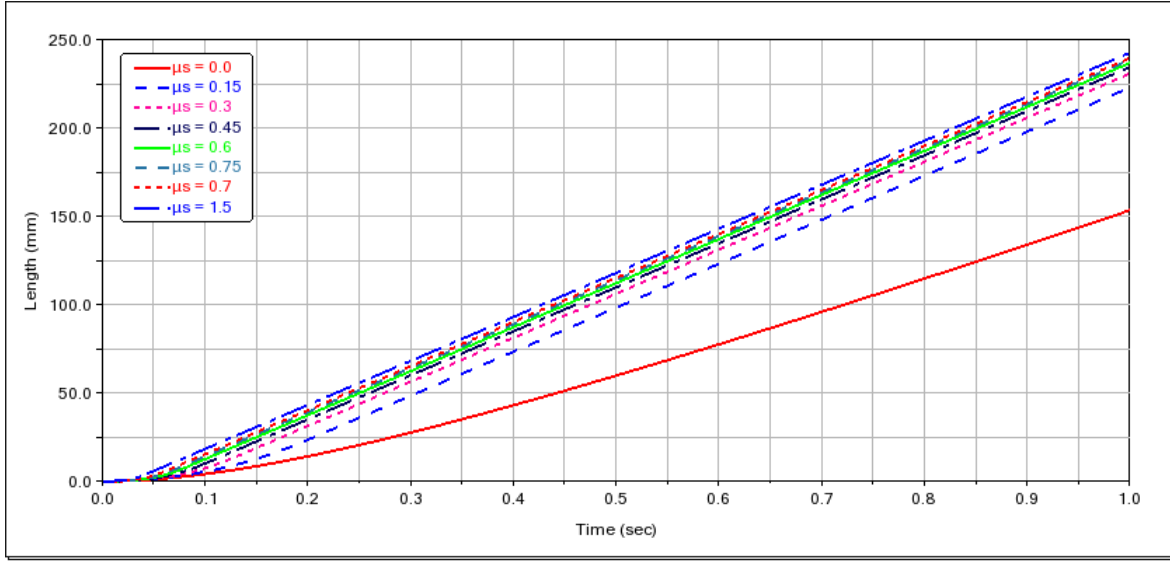
Normal Force	Impact
Stiffness	4.7646E+10
Force Exponent	2.2
Damping	1.0E+06
Penetration Depth	1.0E-03
<input type="checkbox"/> Augmented Lagrangian	
Friction Force	Coulomb
Coulomb Friction	On
Static Coefficient	0.3
Dynamic Coefficient	0.1
Stiction Transition Vel.	100.0
Friction Transition Vel.	1000.0

Kürenin X-eksenindeki yer değiştirmesi, sekiz farklı  $\mu_s$  (statik sürtünme katsayısı) değeri için tartışılmıştır.

**Şekil 19'da sonuçlar gösterilmiştir. Buna göre:**

- Grafiklerin parabolik başlangıcı  $\mu_s$ 'ün tüm değerleri için aynı kaldığı gözlemlenmiştir.
- Parabolik alandan lineer alana geçiş  $\mu_s$  'ün değerine göre değişmiştir.

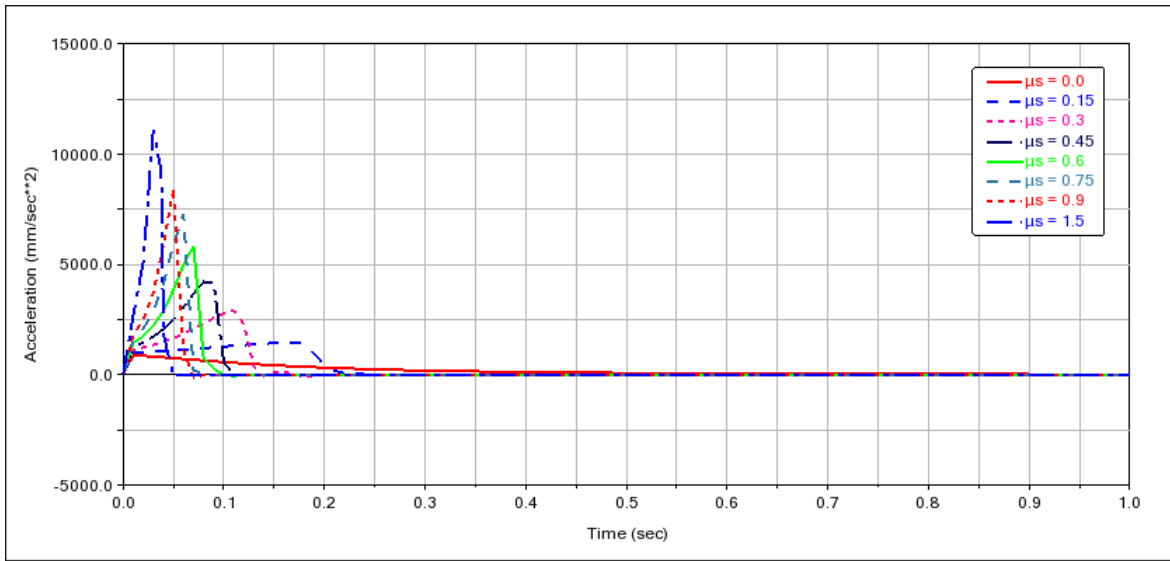
- Tüm durumlarda (gerçekçi olmayan bir değer olan  $\mu_s = 0$  hariç), doğrusal alandaki grafikler paraleldir, yani  $\mu_s$  'ün tüm değerleri X yönünde aynı hızı yol açmıştır.



*Şekil 19 Sekiz farklı statik sürtünme katsayısı değeri için kürenin X eksenindeki yer değiştirmesi*

**Şekil 20'de sekiz farklı  $\mu_s$  değeri için X yönündeki ivme çizilmiştir. Buna göre:**

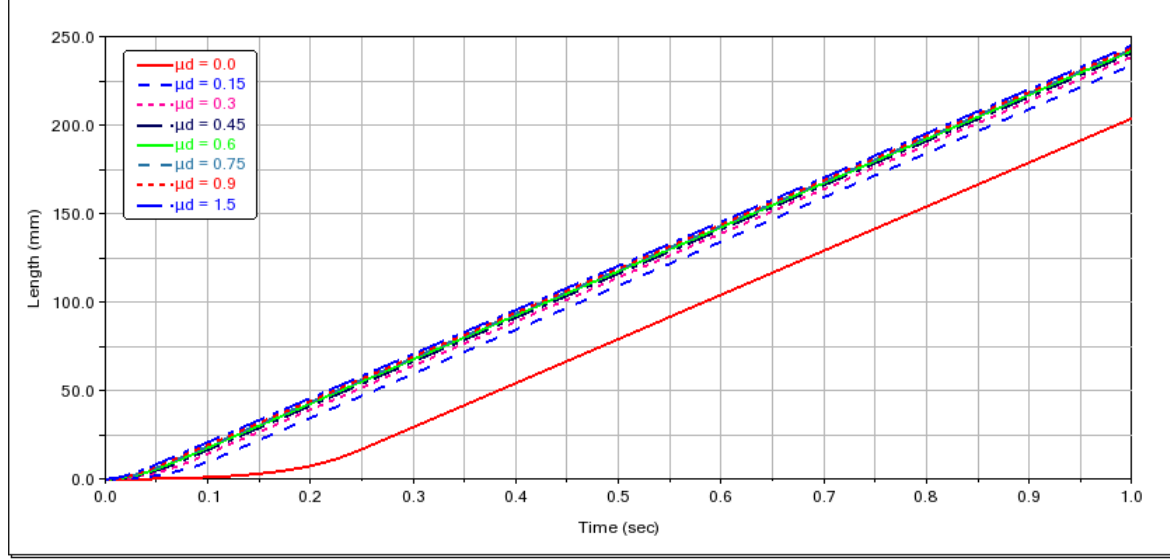
- Artan  $\mu_s$  değerleri için ivmenin çok kısa sürede yükseldiği görülmüştür.
- Temas noktasının bağıl hızı azaldığında ve sürtünme geçiş hızına ulaştığında, ivme  $\mu_s * 9,81$  olan maksimum değere yükselir. Bu artışın süresi daha yüksek  $\mu_s$  değerleri için daha kısadır.
- Maksimum ivmeye ulaşıldıktan sonra hızlanma çok kısa bir sürede sıfıra düşmüştür.



*Şekil 20 Sekiz farklı statik sürtünme katsayısı değeri için kürenin X eksenindeki ivmesi*

***Kürenin X eksenindeki yer değiştirmesi, sekiz farklı  $\mu_d$  (dinamik sürtünme katsayısı) değeri için tartışılmıştır. Şekil 21’de sonuçlar gösterilmiştir. Buna göre:***

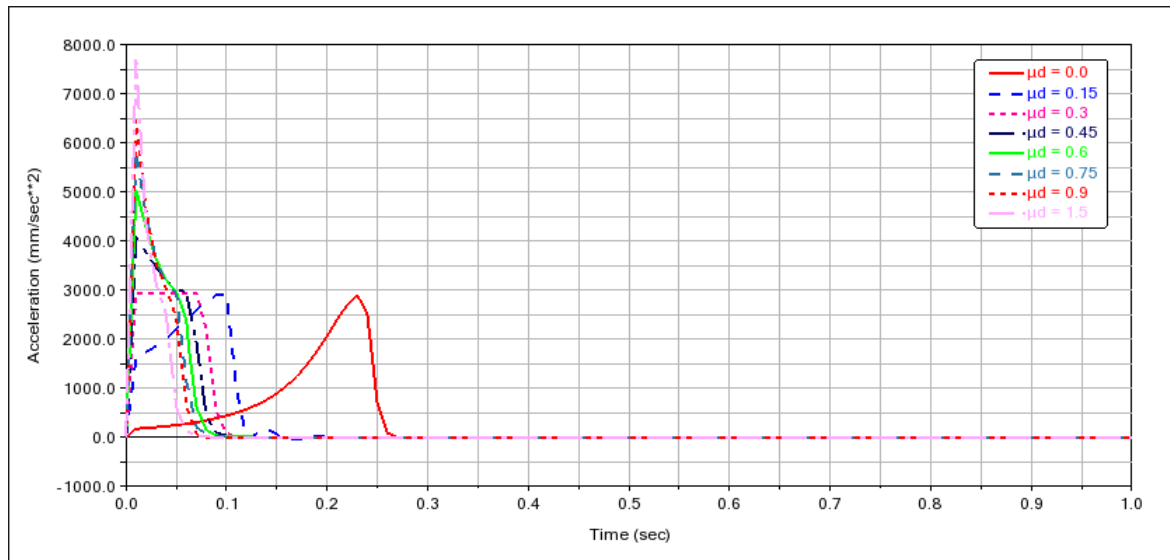
- Her farklı  $\mu_d$  değeri için harekete geçiş süresi farklıdır.
- $\mu_d$  değeri arttıkça, kürenin zeminle temasa geçme hızı artmıştır.



***Şekil 21*** Sekiz farklı dinamik sürtünme katsayısı değeri için kürenin X eksenindeki yer değiştirmesi

***Şekil 22’de sekiz farklı  $\mu_d$  değeri için X yönündeki ivme çizilmiştir. Buna göre:***

- Artan  $\mu_d$  değerleri için ivme çok kısa sürede yükselmiştir.
- Temas noktasının bağlı hızı azaldığında ve sürtünme geçiş hızına ulaştığında, ivme  $\mu_d * 9.81$  olan maksimum değere ulaşır. Bu artışın süresi daha yüksek  $\mu_d$  değerleri için daha kısadır.
- Maksimum ivmeye ulaşıldıktan sonra hızlanma çok kısa bir sürede sıfıra düşmüştür.

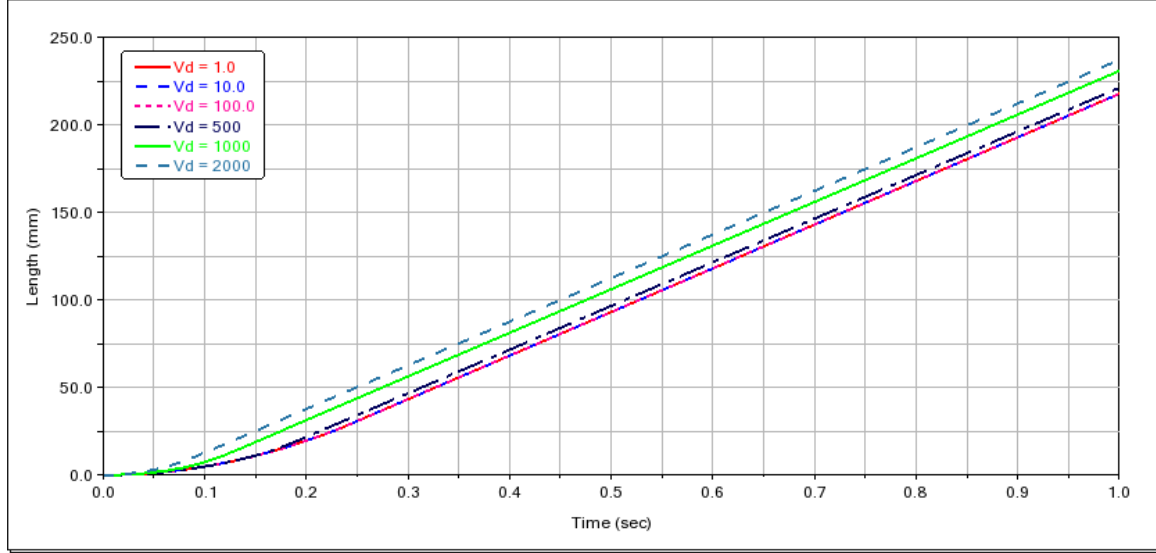


***Şekil 22*** Sekiz farklı dinamik sürtünme katsayısı değeri için kürenin X eksenindeki ivmesi



**Şekil 23'te altı farklı  $V_d$  değeri için X yönündeki yer değiştirme çizilmiştir. Buna göre:**

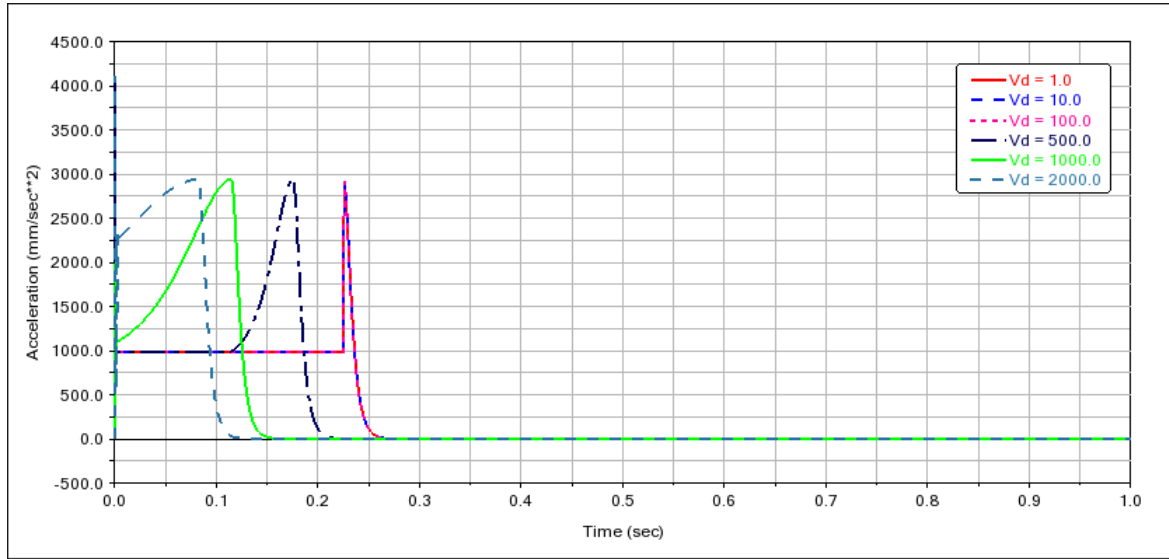
- Düşük  $V_d$  değerleri için parabolik başlangıçların aynı kaldığı,
- Her durumda, doğrusal alandaki çizimlerin paralel olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 23** Sekiz farklı sürtünme geçiş hızı değeri için kürenin X eksenindeki yer değiştirmesi

**Şekil 24'te altı farklı  $V_d$  değeri için X yönündeki ivme çizilmiştir. Buna göre:**

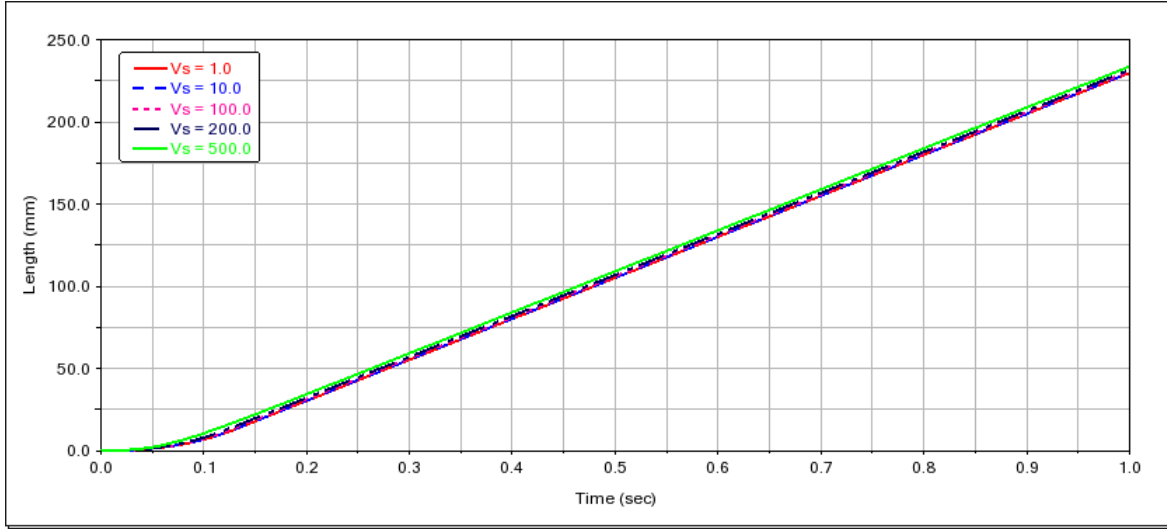
- Maksimum ivme, tüm  $V_d$  değerleri için aynıdır ( $\mu_d * 9.81$ ). Bu değere doğru artış süresi daha yüksek  $V_d$  değerleri için daha uzundur.
- Tüm  $V_d$  değerleri için maksimum ivmeden sıfıra düşüş süresi aynıdır.



**Şekil 24** Sekiz farklı sürtünme geçiş hızı değeri için kürenin X eksenindeki ivmesi

**Şekil 25'te altı farklı  $V_s$  değeri için X yönündeki yer değiştirme çizilmiştir. Buna göre:**

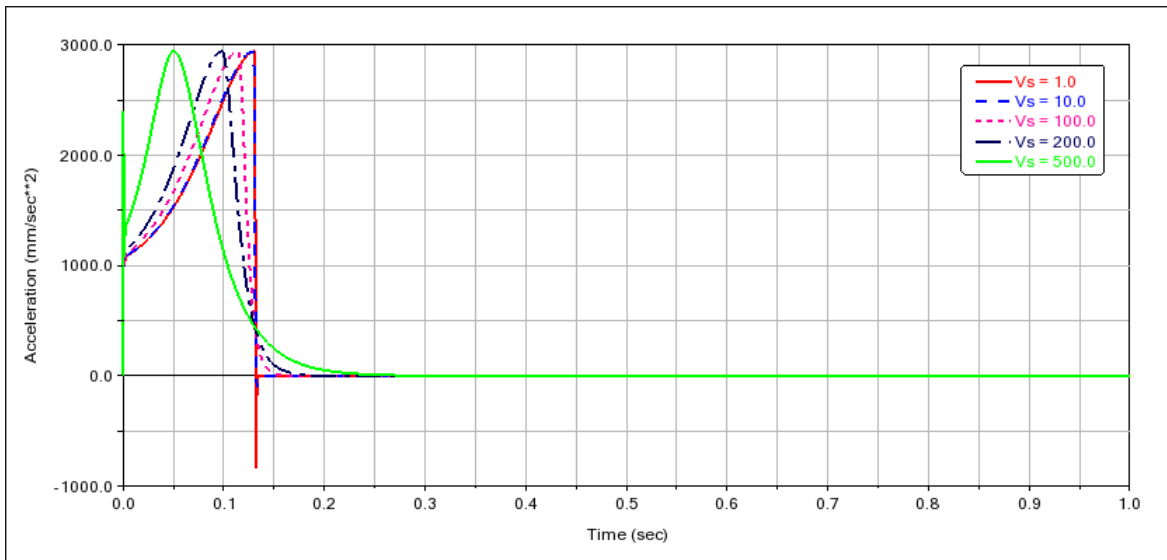
- Her  $V_s$  değerleri için parabolik başlangıçların aynı kaldığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 25** Beş farklı hareket geçiş hızı değeri için kürenin X eksenindeki yer değiştirmesi

**Şekil 26'da altı farklı  $V_s$  değeri için X yönündeki ivme çizilmiştir. Buna göre:**

- Tüm değerler maksimum  $\mu_s * 9,81$ 'e yol açar. Bu hızlanmanın süresi, daha yüksek  $V_s$  değerleri için daha kısadır.
- Çok düşük  $V_s$  değeri için başta ivmenin sabit kaldığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 26** Beş farklı hareket geçiş hızı değeri için kürenin X eksenindeki ivmesi

## 6. ÖNERİLEN DEĞERLER

Bölüm 4 ve Bölüm 5'te IMPACT Fonksiyon modeli, POISSON Restitution modeli ve Coulomb Sürtünme modelinin değişkenleri iki Adams modeli oluşturularak analiz edilmiştir. Artık bu modellerin nasıl çalıştığını ve değişkenlerin temas davranışı üzerinde ne gibi etkileri olduğunu biliyoruz. Bu bölümde ise değişkenler için önerilen değerler tartışılmıştır.

### 6.1. IMPACT Fonksiyon Modeli

#### 6.1.1. Direngenlik ( $k$ ):

Direngenlik, temas eden nesnelerin malzeme özelliklerine ve geometrisine bağlıdır. Bu nedenle  $k$  değerinin belli bir değeri yoktur. Bölüm 5.1'de gösterildiği gibi belli başlı ampirik formüllerle hesaplanabilir. Ama hesaplanan bu  $k$  değeri kesin olarak istenen sonuçları vermeyebilir. Gerçek şartlara uygun bir  $k$  değeri belirlemek için Adams'ta farklı  $k$  değerleriyle birden fazla simülasyon yapılması önerilir.

#### 6.1.2. Kuvvet Üssü ( $e$ ):

Kuvvet üssü, IMPACT fonksiyonu yay kuvvetinin doğrusal olmamasının bir ölçüsüdür. IMPACT fonksiyonunda  $e$ 'nin 0 ve 1 arasındaki değerleri süreksizliklere yol açacaktır. Giesbers<sup>[ii]</sup> yaptığı çalışmada  $e > 1$  olması gerektiğini savunmuştur. Kauçuk gibi yumuşak malzemelerin kuvvet üssünün  $e \cong 1.1$ , alüminyum gibi yumuşak metallerin kuvvet üssünün  $e \cong 1.5$  ve çelik gibi sert metallerin kuvvet üssünün  $e \cong 2.2$  değerlerinde olmasının uygun olacağını söylemiştir. Bölüm 4.1'de değerlendirilen daha yüksek değerlerin kullanılması önerilmez.

#### 6.1.3. Maksimum Sönümlenme ( $c_{max}$ ):

Daha önce yapılan çalışmalar neticesinde maksimum sönüm için, direngenlik değerinin %1'i olması uygun bulunmuştur<sup>[vii]</sup>. Yapılan diğer çalışmalarda ise  $c_{max}$ 'ın daha küçük olması gerektiği savunulmuştur. Adams'ta ise standart değerler;  $k = 1.0E+5$  ve  $c_{max} = 10.0$  dır. Bu da  $k$  değerinin %0.01'idir. En optimal  $c_{max}$  değerini belirlemek için Adams'ta farklı  $c_{max}$  değerleriyle birden fazla simülasyon yapılması önerilir.

#### 6.1.4. Penetrasyon Derinliği ( $d$ ):

Penetrasyon derinliği, temas eden iki cismin birbirlerine değen kısımlarındaki deformasyon miktarıdır. Bu penetrasyon derinliği maksimum penetrasyon derinliği değil, sönümlenme katsayısının sıfırdan  $c_{max}$  'a nasıl yükseldiğinin ölçüsüdür. Değer, beklenen maksimum penetrasyon derinliğinden daha küçük olmalıdır. Giesbers<sup>[ii]</sup> çalışmasında değerin 0,01 mm veya 0.001 mm seçilebileceğinden bahsetmiştir.

### 6.2. POISSON Restitution Modeli

#### 6.2.1. Restituton Katsayısı (COR):

Bu parametre, tam esnek (COR = 1.0) ve tam esnek olmayan (COR = 0.0) çarpışma arasındaki sürekliliği tanımlar. Çarpışma sırasındaki enerji kaybı her zaman olacağından, gerçek hayatta mükemmel bir çarpışma asla olmayacaktır. Ek A'da COR değerlerinin bir listesi bulunabilir. Tablo Adams/Solver belgelerinden alınmıştır ve 34 farklı malzeme kombinasyonunu listeler.

#### 6.2.2. Penalty ( $p$ ):

Penalty, direngelik parametresine benzemektedir. Penalty çok düşük olduğunda, normal kuvvet yeterli değildir. Penalty çok yüksek olduğunda, sayısal entegrasyon sorunları yaşanabilir. Normal kuvvet grafiğinde oluşan rastgele geri tepmeler bize entegrasyon sorunlarının olduğunu gösterir. Penalty parametresi için en optimal değer, entegrasyon sorunlarına neden olmayan en yüksek değerdir.

### 6.3. Coulomb Sürtünme Modeli

#### 6.3.1. Sürtünme katsayısı ( $\mu_s$ ve $\mu_d$ ):

Bu katsayı bir malzeme özelliğidir, temas halindeki nesnelerin malzemesine bağlıdır. Hareket geçiş hızı ile sürtünme geçiş hızı arasındaki temas hızları için, sürtünme katsayısı  $\mu_s$  'dan dinamik sürtünme katsayısı olan  $\mu_d$  'na düşer.  $\mu_d$  'nın  $\mu_s$  'dan daha büyük olması alışılmadık bir durumdur ve Ek A'da görülebilir. Bu ekte,  $\mu_s$  ve  $\mu_d$ , 34 farklı malzeme kombinasyonu için listelenmiştir.

#### 6.3.2. Geçiş Hızı ( $V_s$ ve $V_d$ ):

Temas hızı  $V_d$ 'ye eşit veya daha büyük olduğunda, sürtünme katsayısı  $\mu_d$ 'de sabit kalır. Yukarıda belirtildiği gibi, sürtünme geçiş hızı,

hareket geçiş hızından daha büyük olmalıdır.  $V_d$  için Adams'ta standart değer 1000 mm/s'dir.  $V_s$ 'nin  $V_d$ 'dan küçük kaldığı sürece bu değerin arttırılabileceğini biliyoruz. Geçiş hızları için asıl seçimin kullanıcıya ait olduğu söylenebilir.

## 7. SONUÇLAR

Bu raporda Adams'taki kontak modellerinin Hertzian Kontak Teorisi ve diğer teorilerden nasıl türetildiği, Adams'ta nasıl uygulandıkları, parametrelerinin kontak davranışına ne gibi etkileri olduğu ve bu parametreler için önerilen değerlerin neler olduğu araştırılmıştır.

İlk temas yöntemi IMPACT fonksiyon modelidir. IMPACT işlevi, Hertz temas teorisinden türetilen bir yay kuvvetinden ve bir Adams ilavesi olan bir sönümlenme kuvvetinden oluşan normal kuvvet yaratır. Bu yöntem, kullanıcı tarafından belirlenen dört parametre içerir. IMPACT işlevi, bir çarpışma sırasında normal kuvveti hesaplamak için bir yöntem olarak iyi çalışır, ancak doğru değerlerin belirlenmesi, parametrelerin geometri bağımlılığı nedeniyle fazladan araştırma süresi gerektirebilir.

İkinci temas yöntemi, POISSON restitution modelidir. Bu yöntem, **COR** ve bir **Penalty** parametresine bağlı olarak normal bir kuvvet hesaplar. Çarpışan iki malzemenin her kombinasyonu için, çarpışma sırasındaki enerji kaybını tanımlayan belirli bir **COR** değeri vardır. **COR=1.0** enerji kaybı olmadığı anlamına gelir, **COR=0.0** tüm enerjinin kaybolduğu anlamına gelir. POISSON Restitution modeli, bir çarpışma sırasında enerji kaybı bilindiğinde normal kuvveti hesaplamak için harika bir yöntemdir. Penalty çok yüksek olduğunda, sayısal entegrasyon sorunları yaşanabilir. Bu nedenle, COR değeri ne olursa olsun, Penalty parametresi entegrasyon sorunlarına yol açmadan mümkün olduğu kadar büyük olmalıdır<sup>[ii]</sup>.

Son olarak kontak mekaniğinin en önemli fonksiyonlarından biri Coulomb sürtünme modelidir. Bu, isteğe bağlı sürtünme kuvveti için bir yöntemdir. Gerçek hayattaki sürtünme, temas hızı sıfır olduğunda sürtünme kuvveti olan yapışmayı da içerir. Adams bu olguyu modellemez. Bu yöntem, kullanıcı tarafından belirlenen dört parametre içerir. Bunlardan ikisi, sürtünme katsayıları malzeme özellikleridir ve tablolarda bulunabilir. Diğer iki parametrenin belirlenmesi kullanıcıya daha açıktır. Sürtünme katsayısının bilinen iki değeri olan  $\mu_s$  ve  $\mu_d$  malzeme özellikleridir ve Ek A'da veya diğer kaynaklarda bulunabilir. Geçiş hızları,  $V_s$  sıfıra yakın ve  $V_d$ 'dan daha küçük olacak şekilde, kullanıcıya göre seçim yapmakta serbesttir.

## EK-A

*Tablo 1* <sup>[iii]</sup> İki farklı malzeme kombinasyonlarına göre sürtünme katsayıları ve COR değerleri

<i>Material 1</i>	<i>Material 2</i>	$\mu_s$	$\mu_d$	<i>COR</i>
Dry steel	Dry steel	0.70	0.57	0.80
Greasy steel	Dry steel	0.23	0.16	0.90
Greasy steel	Greasy steel	0.23	0.16	0.90
Dry aluminium	Dry steel	0.70	0.50	0.85
Dry aluminium	Greasy steel	0.23	0.16	0.85
Dry aluminium	Dry aluminium	0.70	0.50	0.85
Greasy aluminium	Dry steel	0.30	0.20	0.85
Greasy aluminium	Greasy steel	0.23	0.16	0.85
Greasy aluminium	Dry aluminium	0.30	0.20	0.85
Greasy aluminium	Greasy aluminium	0.30	0.20	0.85
Acrylic	Dry steel	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Greasy steel	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Dry aluminium	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Greasy aluminium	0.20	0.15	0.70
Acrylic	Acrylic	0.20	0.15	0.70
Nylon	Dry aluminium	0.10	0.06	0.70
Nylon	Greasy aluminium	0.10	0.06	0.70
Nylon	Acrylic	0.10	0.06	0.65
Nylon	Nylon	0.10	0.06	0.70
Dry rubber	Dry steel	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Greasy steel	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Dry aluminium	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Greasy aluminium	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Acrylic	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Nylon	0.80	0.76	0.95
Dry rubber	Dry rubber	0.80	0.76	0.95
Greasy rubber	Dry steel	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Greasy steel	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Dry aluminium	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Greasy aluminium	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Acrylic	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Nylon	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Dry rubber	0.63	0.56	0.95
Greasy rubber	Greasy rubber	0.63	0.56	0.95

## 8. REFERANSLAR

- i. Adams 2021.4 Help Documentation
- ii. Jochem Giesbers, Contact Mechanics in MSC Adams, University of Twente, 2012.
- iii. Maziar Rostamian, Contact Modeling in Adams, 2019.
- iv. Maziar Rostamian, Contact Modeling in Adams, 2020.
- v. Valentin L. Popov, Markus Hess, Emanuel Willbert, Handbook of Contact Mechanics, Springer, 2019.
- vi. [https://en.wikipedia.org/wiki/Contact\\_mechanics](https://en.wikipedia.org/wiki/Contact_mechanics)
- vii. Chris Verheul, 'Contact Modeling' presentation, sheet 13.