

# AKIŞKAN KARGO TAŞIYAN ARACIN FREN DİNAMİĞİNİN İNCELENMESİ

**Murat REİS, Yaşar PALA**

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle / Bursa

Geliş Tarihi : 27.05.2005

## ÖZET

Bu çalışmada, harici yakıt tanklarındaki sıvı davranışının aracın fren dinamiği üzerine etkisi incelenmektedir. Çalkantı olarak adlandırılan akışkanın bulunduğu hacim içerisindeki serbest hareketi, özellikle yüksek ivmelerin ve büyük kütlelerin söz konusu olduğu uygulamalarda, araç üzerinde ciddi dinamik yükler oluşturmaktadır. Bu dinamik yükler aracın dinamik davranışını etkilemektedir. Aracın dinamik davranışındaki tepki ise akışkanın hareketini etkilemektedir. Bu çalışmada akışkan kargo taşıyan aracın fren performansı bu etkileşim dahilinde ve sabit sürtünme katsayılı yol kabulü altında farklı doluluk oranları için Msc.Dytran programı yardımı ile yapılan simülasyonlarla ve basit sarkaç yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Farklı doluluk oranlarında akışkan hareketinin araç dinamiğine etkisi karşılaştırılmıştır. Ayrıca sarkaç yönteminin kullanılabilirliği tartışılmıştır. Karşılaştırma sonucu % 50 doluluk oranının altında akışkan davranışının araç dinamiğine etkisinin yüksek doluluk oranına göre daha fazla olduğu, sarkaç yönteminin ise araç ivmesinin  $a \leq (1/2)g$  değerindeki ivme değerleri ve % 50'nin altındaki doluluk oranlarında kullanışlı olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler :** Harici yakıt tankı, Çalkantı, Katı-sıvı etkileşimi, Araç dinamiği, Sarkaç modeli

## AN INVESTIGATION OF THE BREAKING DYNAMICS OF A VEHICLE WHICH CARRIES LIQUID CARGO

### ABSTRACT

In this study, the effects of fluid motion in external fuel tanks on the dynamics of breaking system are investigated. The unconstrained motion of fluid also called sloshing causes high dynamic loads especially in highly accelerated motion of massive bodies. These dynamic loads affect the dynamic behavior of truck, and, inversely, the reaction of truck affects the fluid motion. The interaction between fluid and truck affects the whole system's dynamics. In this study, the breaking performance of truck carrying fluid cargo at various ratios of plenitude is investigated using simulation techniques via Msc.Dytran and the swinging pendulum method. The kinetic coefficient of friction is assumed to be constant during the motion. The effect of fluid motion on the system's dynamic has been compared for various plenitude ratios, and the efficiency of pendulum method is compared. The feasibility of pendulum method is also discussed. As a result of comparison of numerical simulations, it has been concluded that the effect of fluid motion on the truck's breakage performance in the case of % 50 plenitude ratio is higher than that of the ratios of plenitude greater than % 50. On the other hand, it has been observed that the pendulum method is useful for the plenitude ratios less than % 50 and for accelerations of  $a \leq (1/2)g$ .

**Key Words :** External fuel tank, Sloshing, Fluid-structure interaction, Vehicle dynamics, Pendulum model

## 1. GİRİŞ

Akışkan kargo taşıyan sistemlerde aracın ivmelenmesi neticesi akışkan tank içerisinde çalkalanacaktır. Bu çalkantı, akışkanın bulunduğu hacmin cidarlarında çarpma yüklerinin oluşmasına yol açacaktır. Çalkantının şiddeti akışkan parçacıklarının hareket serbestliğine bağlıdır. Akışkan parçacıklarının hareket serbestliğini tank içerisindeki boş hacmin toplam hacme oranı ve tank geometrisi belirlenmektedir.

Çalkantı neticesi akışkanı çevreleyen kabuk eleman üzerine ve mekanik taşıyıcı sisteme çarpma yükleri etkimektedir. Yüksek ivmeli hareket yapan hava araçlarında ve büyük kütlelerde akışkan kargo taşıyan deniz araçlarında çalkantı sonucu oluşan çarpma yükleri aracın dinamik davranışının yanında mekanik sistemde deformasyona ve hasara da yol açabilmektedir. Ancak kara taşıtlarındaki akaryakıt taşıma sistemleri için aynı şeyi söylememiz yanlış olur. Burada çok yüksek ivmeler ve çok büyük kütleler söz konusu olmadığından, çalkantının etkisi daha çok araç dinamiği üzerine olacaktır. Bu nedenle, bu çalışmada 'Harici yakıt tanklarındaki sıvı hareketinin aracın fren dinamiğine etkisi' incelenmiştir.

Bilindiği gibi akışkanların hareketini Eulerian yaklaşım, katı hareketini ise Lagrangian yaklaşım ile incelenmektedir. Akışkan kargo taşıyan bir aracın dinamiğini incelerken, sarkaç modelinde akışkan basit bir sarkaca indirildiğinden tüm sistem Lagrange dinamiği ile incelenecektir. Sarkaç metodu kullanılarak elde edilen araç-sarkaç kuple hareket denklemi Matlab yardımı ile araç için geçerli sınır şartları altında sayısal olarak çözümlenerek aracın dinamik davranışı tespit edilmiştir. Üç boyutlu Dytran simülasyonlarında ise akışkan ve mekanik yapı ayrı ayrı ele alınmakta, iki sistem arasındaki etkileşim, bağlantı (temas) yüzeyi aracılığı ile sağlanmaktadır. Bu simülasyonlarda aracın farklı doluluk oranlarında sabit sürtünme katsayısına sahip yolda tekerlekleri kilitlenerek frenlenmesi hali incelenmiştir. Sonuç bölümünde bu iki yöntemde elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Rumold (2001) çalışmasında sıvı çarpma yüklerine maruz araçların dinamiğinin modellenmesi ve simülasyonu için bir model geliştirmiştir. Aracın bileşenleri birçok cisimli bir model olarak modellenmiştir. Çalkantı dinamiği serbest yüzey şartları altında durağan olmayan sıkıştırılmaz akışkan için Navier-Stokes denklemlerinin çözümünden belirlenmektedir. Bütün sistemin dinamiğini elde etmek için dinamik sistem alt sistemlere ayrılarak modüler simülasyon kavramı

uygulanmaktadır. Rijit sistem ve sıvı alt sistemleri simülasyon çalışma zamanı boyunca giriş ve çıkış transfer değişkenleri ile kuple edilen ayrık yazılım kodları olarak modellenmektedir. Araç hareketini tespit etmek için sıvı hareket denklemleri hareketli referans takımlarda yazılmakta sıvı alt sisteminin giriş ve çıkışları çıkartılmaktadır. Sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemlerini çözmek için etkin metotlar kullanılmaktadır. Sonlu hacim diskritasyonunda çıkarılan denklem sistemi çoklu ağ metoduyla çözümlenmekte ve serbest yüzeyler kalan sıvı hacmi yaklaşımı ile belirlenmektedir. Çarpma sıvının ve aracın hareketinin etkileşimi için önerilen metod kısmen sıvı dolu araçların frenleme performansını belirlemek için kullanılmaktadır. Sıvı kargo taşıyan araçlarda, katı kargo taşıyan araçlara nazaran dinamik sıvı yüklerinin tekerlek kilitlenmesinden olan yön kontrol kaybına olan etkisi daha fazladır.

Aliabadi et al., (2003) çalışmalarında çalkantı analizinde çok kullanışlı bir araç olan fakat doğruluk ve uygulanabilirliği pek irdelenmemiş olan sarkaç yöntemi ile daha karmaşık olan sonlu eleman yöntemini akaryakıt taşıyıcı tanker için yaptığı simülasyonla karşılaştırmıştır. Sarkaç modelinde tanker içerisindeki akışkan kütlesi sürtünmesiz bir sarkacın ucundaki noktasal bir kütleyle indirgenir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çözümde serbest yüzeyi belirlemek amacıyla Navier-Stokes denklemleri kullanılmaktadır. Çalışma sonucu her iki yöntemde elde edilen verilerin tanker az dolu ve yarı dolu olduğu durumlarda çok farklı olmadığı, fakat yüksek doluluk oranlarında simülasyon sonuçlarının sarkaç modeline göre farklılık arz ettiğini ve tanker üzerine ciddi merkezkaç kuvvetlerin etkideği tespit edilmiştir. Bu çalışmada tankın dairesel kesitli olduğu ve bağlı bulunduğu aracın dairesel bir virajda yol aldığı kabul edilmektedir.

Cho and Lee (2003) çalışmalarında hareketli sıvı depolama tanklarının (bariyerli) dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Tankın dinamik davranışı ve içerisindeki sıvının hareketi birbiri ile güçlü bir şekilde bağlantılıdır. Bu durum sıvı depolama tanklarının yapısal kararlılıklarının tank içerisindeki akışkan hareketinin kontrol altında tutulması ile sağlanabileceğini göstermektedir. Tank içerisindeki akışkan hareketini kontrol etmenin yolu ise uygun geometride dizayn edilmiş ve doğru konumlandırılmış bariyerler kullanmaktır. Hareketli tankın dinamik davranışını belirlemek için yaptıkları sayısal araştırmalar Cho and Lee'yi serbest yüzey, hareketli sınır, büyük deformasyon ve arayüz bağlantı problemlerinde de geniş bir kullanıma sahip keyfi Lagrangian-Eulerian (K-ALE) sonlu elemanlar metodunu kullanmaya yöneltmiştir. Akışkan-katı etkileşimli problem için teorik ve sayısal formülasyon verildikten sonra dikey üniform

ivmelendirilmiş silindirik akışkan depolama tankı için sayısal sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçların bariyer sayısı, bariyerlerin konumu ve yüzük şekline sahip bariyerlerin iç çaplarına bağlılığı vurgulanmıştır. Bu çalışmaların dışında, Çelebi ve Akyıldız (2002) hareketli tanktaki lineer olmayan çalkantıyı ve Nichkawde (2003) çalkantının stabiliteye etkisini incelemiştir.

Biz çalışmamızda akışkan kargo taşıyan aracın sürtünme katsayısı  $\mu$  olan yol üzerinde frenlenmesi halinde aracın hareketi MSC.Dytran programında farklı doluluk oranları için gerçekleştirilen simülasyonlarla ve basit sarkaç metodu kullanılarak tespit edilmiştir. Dytran algoritması çalkantı dinamiği serbest yüzey şartları altında sıkıştırılamaz ve lineer akışkan için Navier-Stokes denklemlerinin çözümünden belirlenmektedir.

## 2. ANALİZ

### 2. 1. Eulerian ve Lagrangian Tanımları

Mekanik problemleri analiz etmede iki farklı görüş vardır. Akışkanlar mekaniğine uygun birinci görüş, akış alanı ile ilgilenir ve Eulerian koordinatları kullanır. Eulerian koordinatlarda, akış alanındaki parçacıkların hareketleri süresince uğradıkları basınç değişimleri  $P(t)$  yerine akışa ait  $P(x, y, z, t)$  basınç alanını hesaplarız.

Akış alanında hareket eden akışkan parçacıklarının izlenmesine dayanan ikinci yöntem, Lagrange tanımlama yöntemi olarak adlandırılır. Lagrange yaklaşımı katı cisim mekaniğine daha uygun olmakla beraber, izole akışkan damlacıklarının hareketi gibi keskin sınırlı akışkan hareketlerinin belirli sayısal analizleri Lagrange yaklaşımı ile çok uygun bir şekilde yapılır.

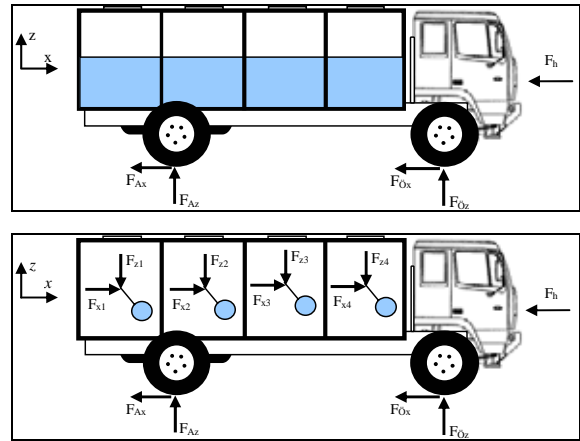
Akışkanların dinamik ölçümleri de Euler yaklaşımına uygundur. Örneğin laboratuarda bir basınç alanı içerisinde yerleştirilen bir basınç sondası,  $(x, y, z)$  noktasında sabitlenmiştir. Sondanın ölçtüğü basınç değerleri Euler yaklaşımındaki  $P(x, y, z, t)$  basınç alanıdır. Lagrange yöntemini simüle edebilmek için, sondanın akışkan parçacığının hızı ile akış alanı içerisinde hareket ettirilmesi gerekir; bu, akışölçerlerin akıntı ile beraber hareket ettiği oşinografik ölçümlerde zaman zaman yapılmaktadır.

### 2. 2. Taşıt Hareket Denklemleri

Akışkan kargo taşıyan aracın fren dinamiğini incelemeye geçmeden evvel iki akslı bir taşıta etki eden kuvvet ve momentlerin incelenmesi uygun

olacaktır. Bu kuvvet ve momentlerin dengelerinden yararlanılarak aracın hareket denklemleri çıkarılacaktır (Göktan ve ark., 1995). Akışkan kargo tankın hacim merkezine asılı sürtünmesiz basit bir sarkaca indirgenerek araç-sarkaç kuple hareket denklemleri elde edilecektir.

Şekil 1'de yatay yolda hareket halindeki iki akslı bir taşıta etki eden kuvvetler görülmektedir. Aracın süspansiyon sisteminden kaynaklanan baş vurma hareketi ihmal edilerek hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.



Şekil 1. Taşıt hareket kuvvetleri

Taşıtın hareket doğrultusundaki yer değiştirmesi  $x$  olmak üzere  $x$  eksenı boyunca hareket denklemlerini yazarak

$$\begin{aligned} + \rightarrow \sum F_x &= m_A \ddot{x} \\ \sum F_{sx} - F_{Ox} - F_{Ax} - F_h &= m_A \ddot{x} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} + \uparrow \sum F_z &= m_A \ddot{z} \\ \sum F_{sz} - F_{Kz} - F_{Lz} - m_A g &= m_A \ddot{z} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada;  $m_A$  aracın kütlesi,  $\sum F_{sx}$  ve  $\sum F_{sz}$  sırasıyla sarkaçların araca uyguladıkları kuvvetlerin yatay ve dikey toplamlarıdır.  $F_h$  ise;

$$F_h = 0,5\rho_c A \dot{x}^2 N \quad (3)$$

ile tanımlı atmosferik direnç kuvvetidir. Buradaki  $\dot{x}^2$ 'li terim yatay doğrultudaki hareket denklemini ikinci mertebeden homojen olmayan non-lineer bir diferansiyel denkleme dönüştürmektedir. Bu durum çözümü oldukça güçleştirmekle beraber, aracın hızı çok yüksek olmadığından, bu terimi ihmal etmemiz önemli bir hataya sebebiyet vermeyecektir. Bu durumda denklem (1)

$$\sum F_{sx} - F_{\ddot{O}x} - F_{Ax} = m_A \ddot{x} \quad (4)$$

şeklinde homojen olmayan ikinci mertebe diferansiyel denkleme dönüşür ki bu daha kolay incelenebilecek bir diferansiyel denklemdir. Yine burada  $F_{Ax}$  ve  $F_{\ddot{O}x}$  çevre kuvvetleri için sınır değer

$$(F_{Ax})_{\max} = \mu_d F_{Az} \quad (5)$$

$$(F_{\ddot{O}x})_{\max} = \mu_d F_{\ddot{O}z} \quad (6)$$

olarak ifade edilir.  $\sum F_{sx}$  ve  $\sum F_{sz}$  ise akışkanın hareketi ile değişmektedir. Bu kuvvetler akışkan basit sarkaca indirgenerek yaklaşık olarak tespit edilebilir. Sarkacın ve aracın kuple hareket denklemlerinin çözülmesi sonucu aracın fren dinamiği yaklaşık olarak tespit edilmiş olunur. Denklem (2) den denklemden zeminden araca gelen kuvvetlerin toplamı

$$\sum F_{sz} - F_{Kz} - F_{Lz} - m_A g = m_A \ddot{z} \quad (7)$$

$$(F_{Kz} + F_{Lz}) = m_A g + \sum F_{sz} \quad (8)$$

şeklinde bulunur. Bu kuvveti sürtünme katsayısı ile çarparak  $x$  doğrultusundaki sürtünme kuvvetini tespit ederiz.

$$(F_{\ddot{O}x} + F_{Ax}) = \mu(F_{Kz} + F_{Lz}) = \mu(m_A g + \sum F_{sz}) \quad (9)$$

Bu kuvvet 1 nolu denklemde yerine yazılarak aracın yatay ivmesi

$$\begin{aligned} \sum F_{sx} - F_{\ddot{O}x} - F_{Ax} &= m_A \ddot{x} \\ \sum F_{sx} - \mu(m_A g + \sum F_{sz}) &= m_A \ddot{x} \\ \ddot{x} &= \frac{\sum F_{sx} - \mu(m_A g + \sum F_{sz})}{m_A} \end{aligned} \quad (10)$$

şeklinde elde edilir.  $\sum F_{sx}$  ve  $\sum F_{sz}$  toplamlarını sırasıyla  $f_x$  ve  $f_z$  ile gösterelim. Bu ifadeler denklem (11) de yerine yazılarak  $\ddot{x}$  aşağıdaki şekilde elde edilecektir.

$$\ddot{x} = \frac{f_x - \mu_d(m_A \cdot g + f_z)}{m_A} \quad (11)$$

### 2. 3. Sarkaç Modeli

Tank içerisindeki akışkanın hareketini modelleyebilmek için her bir bölmedeki akışkanın

akışkanın ağırlık merkezindeki birer noktasal kütle ve bu noktasal kütle de bölmenin hacim merkezine asılı birer sarkaca indiriyoruz. Bu şekilde akışkanın aracın hareketi boyunca araca uygulayacağı yatay ve dikey kuvvetleri yaklaşık olarak bulmayı ve bu yolla aracın dinamiğini akışkanla etkileşimli bir şekilde çözmeyi hedefliyoruz. Eşitlik 11 de aracın yatay ivmesi

$$\ddot{x} = \frac{f_x - \mu(f_z + m_A g)}{m_A}$$

şeklinde elde edilmiştir. Burada  $f_x$  araca  $x$  doğrultusunda etkiyen akışkan kuvvetleri,  $f_z$  ise araca  $z$  doğrultusunda etkiyen akışkan kuvvetleri idi. Sarkaç modelinde bu kuvvetler aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f_x = nT \cdot \sin \theta \quad (12)$$

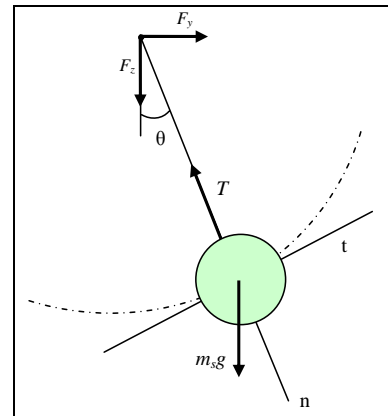
$$f_z = nT \cdot \cos \theta \quad (13)$$

Burada;  $n$  bölme sayısını ifade etmektedir. İki akslı araçlar için tasarlanan akışkan taşıma tankları genelde dört bölmelidir. Bu bakımdan bu çalışmada dört bölmeli bir tank modeli incelenmiştir. Bu durumda kuvvetler

$$f_x = 4T \cdot \sin \theta \quad (14)$$

$$f_z = 4T \cdot \cos \theta \quad (15)$$

şeklinde. Şimdi, teğetsel ve normal bileşenler cinsinden sarkacın hareket denklemlerini elde edelim (Şekil 2).



Şekil 2. Serbest cisim diyagramı

$$\beta + \sum F_t = m_s a_t \quad (16)$$

$$\frac{m_s}{l}(-\ddot{x} \cos \theta - g \sin \theta) = m_s(2\dot{\theta} + \ddot{\theta}) \quad (17)$$

$$\ddot{x} = -\frac{g \sin \theta + 2l\dot{\theta} + l\ddot{\theta}}{\cos \theta} \quad (18)$$

$$\mathbf{O}_+ \sum F_n = m_s a_n \quad (19)$$

$$T = m_s(-\ddot{x} \sin \theta + g \cos \theta - \ddot{l} + l\dot{\theta}^2) \quad (20)$$

sarkaç kol uzunluğundaki değişim ihmal edilirse araç ivmesi ( $\ddot{x}$ ) ile sarkaç açısı ( $\theta$ ) arasındaki bağıntı,

$$\ddot{x} = -\frac{g \sin \theta + l\ddot{\theta}}{\cos \theta} \quad (21)$$

olur. Her bir sarkacın araca uyguladığı kuvvet de

$$T = m_s(-\ddot{x} \sin \theta + g \cos \theta + l\dot{\theta}^2) \quad (22)$$

$$\ddot{x} = \frac{m_y(-\ddot{x} \sin^2 \theta + g \sin 2\theta + l\dot{\theta}^2 \sin \theta) - \mu(m_y(-\ddot{x} \sin \theta \cos \theta + g \cos^2 \theta + l\dot{\theta}^2 \cos \theta) + m_A g)}{m_A} \quad (25)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{-\sin \theta + \mu \cos \theta}{\left(\frac{-m_A}{m_y \cos \theta} - \tan \theta \sin \theta + \mu \sin \theta\right)} \dot{\theta}^2 + \frac{-g \left[ \tan \theta \sin^2 \theta + \sin 2\theta - \mu + \frac{m_A}{m_y}(\tan \theta - \mu) \right]}{1 \left( \frac{-m_A}{m_y \cos \theta} - \tan \theta \sin \theta + \mu \sin \theta \right)} = 0 \quad (26)$$

## 2. 4. Simülasyon

Bu çalışmada akaryakıt taşımacılığında kullanılan iki akslı bir aracın sürtünme katsayısı  $\mu_d = 0.4$  olan zeminde frenlenmesi durumunda aracın hareketi, taşıdığı akışkanın araca olan etkisi de göz önüne alınarak incelenmiştir. Katı kargo taşıyan bir aracın aynı sürtünme katsayısına haiz bir yolda frenlenmesi durumunda aracın yavaşlama ivmesi için sınır değer  $\mu_d g$  olacaktır. Akışkan kargo taşıyan araçlarda ise ivmenin sabit olması beklenemez, zira akışkan tankın doluluk oranına bağlı bir hareket serbestliğine haizdir. Bu hareket serbestliği akışkanın tankın bir parçası gibi hareket etmesini engeller ve akışkandan tanka değişken akışkan kuvvetleri etkir. Bu kuvvetler aracın dengesini bozabildiği gibi aracın kaymasına yani statik sürtünme katsayısı ile yavaşlayan aracın dinamik sürtünme katsayısı ile yavaşlamasına neden olabilir. Bu da fren mesafesini artıran bir risktir. Yapılan ilk simülasyon 0.5 g ivme

olacaktır. Eşitlik 14 ve 15 ten akışkan kuvvetleri

$$f_x = 4m_s(-\ddot{x} \sin^2 \theta + g \sin 2\theta + l\dot{\theta}^2 \sin \theta) \quad (23)$$

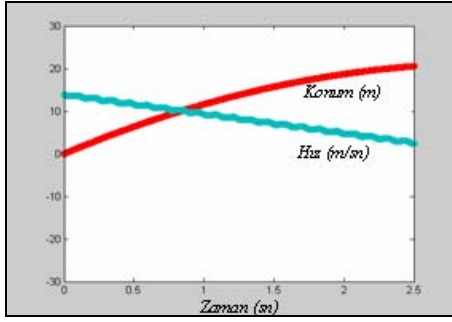
$$f_z = 4m_s(-\ddot{x} \sin \theta \cos \theta + g \cos^2 \theta + l\dot{\theta}^2 \cos \theta) \quad (24)$$

şeklinde elde edilir.  $m_y = 4m_s$  olduğu dikkate alınarak bu kuvvetler denklem (12) de yerine yazılıp araç hareket denklemi yeniden düzenlenerek denklem takımı bulunur. Bu diferansiyel ifadenin 0-2 sn aralığı ve 50 m/sn başlangıç hızı kabulü altında çözümü aracın kinematığını verecektir. Bu diferansiyel denklemin çözümü analitik olarak oldukça zordur ancak bu ifadenin 0-2 sn aralığındaki çözümü ile ilgilendiğimizden diferansiyel denklemi Matlab yardımı ile sayısal olarak çözebiliriz. Hareket doğrultusunda dairesel geometriye sahip bir tankta  $l$  sarkaç kol uzunluğu yaklaşık sabit olacaktır. Ancak, kare yada dikdörtgen kesitli bir tankta sarkaç kol uzunluğu gerçekte sabit olmayacağından. Bu durum hesaplamalarda küçük bir hataya sebebiyet verecektir.

ile frenlenen tank içerisindeki çalkantının maksimum olduğu kritik zaman aralığının yaklaşık 2 sn olduğunu göstermiştir. Bu nedenle simülasyonlar bu 2 sn'lik zaman dilimi için gerçekleştirilmiştir.

Hesaplamalarda kullanılan araç boyut ve kütleleri akaryakıt kargo taşıyan taşıt üreten firmalardan elde edilmiştir. Benzer şekilde yakıt tankı için de geometrik ölçüler tanker üretici firmanın web sitelerinde vermiş olduğu ölçüler olmakla beraber oval köşeler dikkate alınmamıştır. Tank ölçüleri ve taşıta bağlantı noktaları Şekil 3 ve Tablo 1'de gösterildiği şekildedir. Simülasyonlarda tankı temsil eden kabuk yüzey iki boyutlu dörtgen (quad4) elemanlara, akışkanı temsil eden Eulerian hacim ise kübik (hex8) elemanlara bölünmüştür. Tank malzemesi olarak çeliğin özellikleri, kullanılmakla beraber akışkanın çelik malzeme üzerinde oluşturacağı deformasyon çok ihmal edilebilir mertebelerde olduğundan, tank malzemesi rijid





Şekil 8. Araç % 99 dolu iken konum ve hızın zamanla değişimi

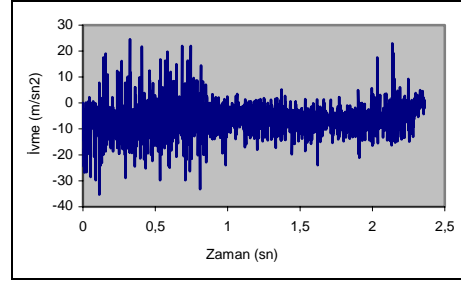
Tankerin doluluk oranı attıkça akışkanın kütle merkezi tankerin hacim merkezine yaklaşacaktır. Bu da sarkaç kolunun kısalması anlamına gelmektedir. Sarkaç kolunun kısalması sistemin frekansını artıracığından, hız-zaman grafiğindeki sinüzoidal değişim sıklaşacaktır. Limit durumda tanker % 100 doluluğa ulaşırken hız-zaman grafiğindeki bu sinüzoidal değişim o kadar sıklaşacaktır ki % 100 doluluk durumunda grafik tamamen doğrusallaşacak, yani sarkaç hacim merkezine rijid bağlı bir kütle gibi hareket edecektir. Gerçekte de kısmen akışkan dolu bir araçta akışkan, araca göre daha geç yavaşlayacağından, aracın ön kısmına çarparak aracı öne doğru iter. Bu itme ile başlangıçta hızla yavaşlayan aracın yavaşlama ivmesi düşer. Bu durumda akışkanın araca uyguladığı kuvvette düşeceğinden aracın yavaşlama ivmesi bir süre sonra tekrar artmaya başlar. Sonuç olarak, aracın hız-zaman grafiği Şekil 4'teki gibi sinüzoidal bir değişim arz eder. Tamamen dolu bir tanker ise sabit sürtünme katsayısına sahip bir yolda sabit ivme ile yavaşlar ve hız zaman grafiği doğrusal olur. Ancak sarkaç metodunda % 100 doluluk oranı için sarkaç kol uzunluğu sıfır olacağı ve bu durum sarkaç hareket denklemlerinde tanımsızlığa yol açacağından, % 100 doluluk oranı için sonuç vermeyecektir. Bunun yerine % 99 doluluk oranı için hız-zaman grafiği verilmiştir (Şekil 8).

### 3. 2. Simülasyon Sonuçları

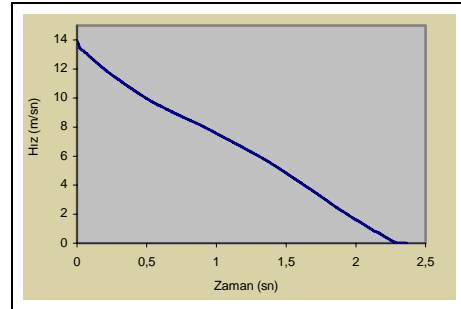
Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de Msc.Dytran programı yardımı ile sabit sürtünme katsayısına sahip ( $\mu = 0.6$ ) yol üzerinde frenlenen, % 25 dolu araç için gerçekleştirdiğimiz simülasyonların kinematik sonuçları verilmektedir. Msc.Dytran programı sonlu elemanlar yöntemini kullandığından, ivme zaman grafiğinde anlık dalgalanmalar oluşmaktadır.

Şekil 15'te % 75 dolu hal için ivme zaman grafiği verilmiştir. % 75 dolu hal için hız ve konum değişimleri ise şekil 16 ve şekil 17 de diğer doluluk

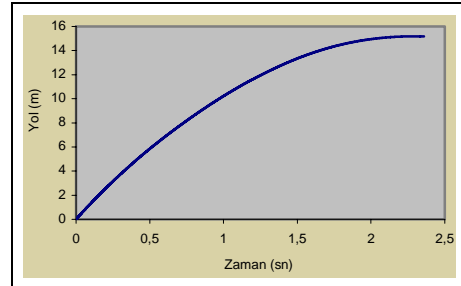
oranları ile birlikte karşılaştırılmalı olarak verilmektedir.



Şekil 9. Aracın ivme-zaman grafiği (% 25 dolu)

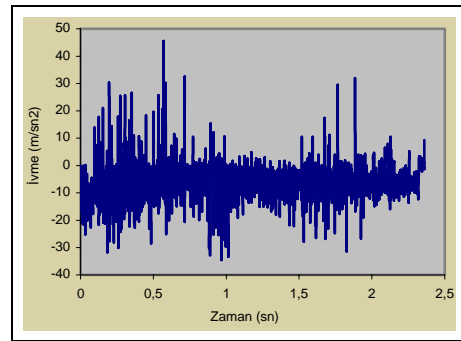


Şekil 10. Aracın hız-zaman grafiği (% 25 dolu)

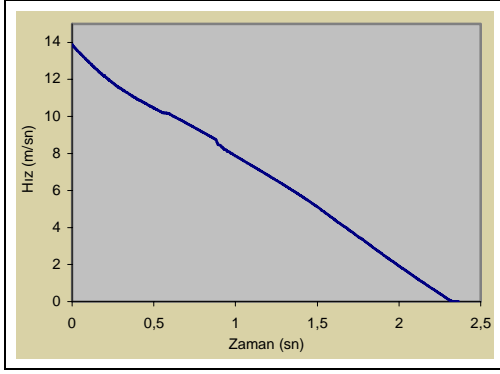


Şekil 11. Aracın konum-zaman grafiği (% 25 dolu)

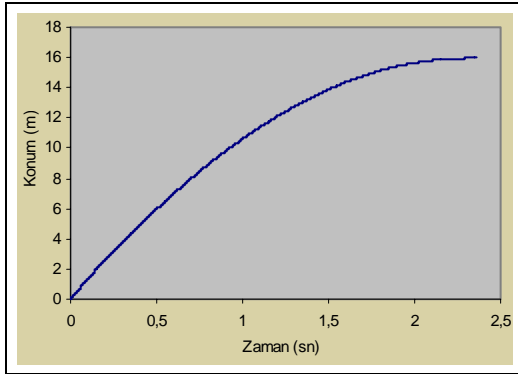
Benzer şekilde Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'de % 50 dolu araç için gerçekleştirdiğimiz simülasyonların kinematik sonuçları verilmektedir.



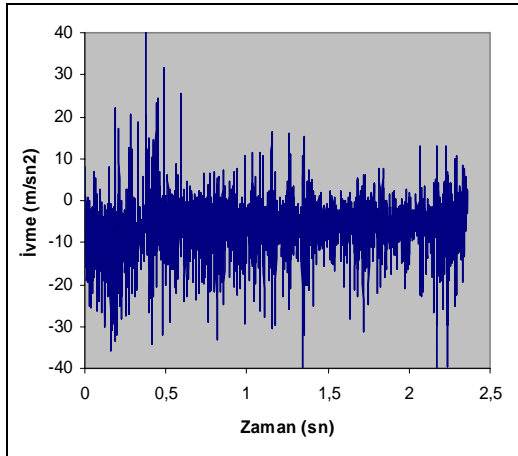
Şekil 12. Aracın ivme zaman grafiği (% 50 dolu)



Şekil 13. Aracın hız-zaman grafiği (% 50 dolu)

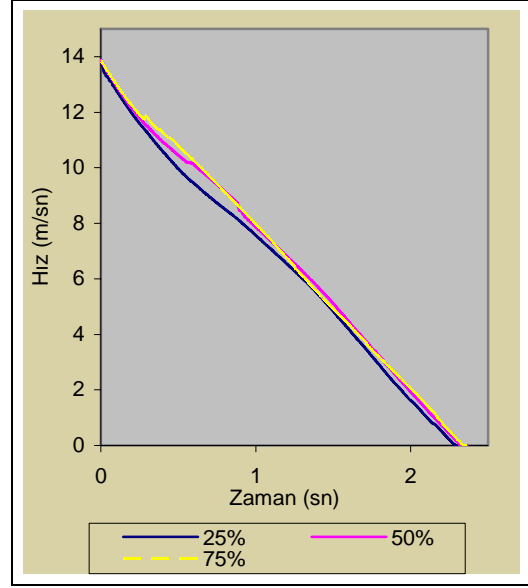


Şekil 14. Aracın konum-zaman grafiği (% 50 dolu)

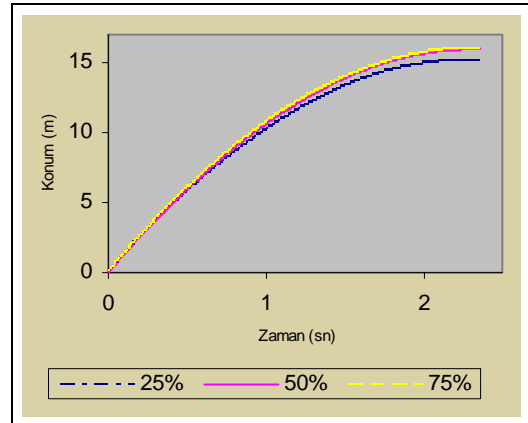


Şekil 15. Aracın ivme zaman grafiği (% 75 dolu)

İvme-zaman grafiklerindeki dalgalanmanın genliği sonlu elemanların sıklığı ile ters orantılıdır. Akışkanı temsil eden Eulerian hacim ne kadar sık ağlara bölünürse, grafiklerdeki bu genlikler daralacak ve o denli doğru sonuçlar elde edilecektir. Fakat sonlu elemanların sayısındaki artış özellikle zamana bağlı hesaplamaların söz konusu olduğu böyle bir problemde bilgisayarı çok zorlayacağı ve simülasyon süresini aşırı derecede artıracığından pratikte, ağ yapısını belli bir değer üzerinde bir sıklıkta oluşturmak mümkün değildir.



Şekil 16. % 25, % 50 ve % 75 dolu haller için aracın hız-zaman grafiği



Şekil 17. % 25, % 50 ve % 75 dolu haller için aracın konum-zaman grafiği

Farklı doluluk oranları için elde edilen hız-zaman ve konum-zaman grafikleri Şekil 16 ve Şekil 17'de verilmiştir. Burada tankerin doluluk oranı arttıkça fren mesafesinin ve durma zamanının arttığı görülmektedir. Bunu enerjinin korunumu ile açıklayabiliriz, zira sabit sürtünme katsayısı ile yavaşlayan aracın enerjisinin büyük bir kısmı sürtünmeye harcanır. Kalan küçük bir kısım enerji ise akışkanın çalkantısı sonucu akışkan tarafından tüketilir. Tanker ne kadar boş olursa, akışkan o denli hareketli olacağından, bu kayıp enerji o denli büyük olacaktır. Dolayısıyla aracın durma mesafesi ve durma zamanı azalacaktır. Ancak, unutmamak gerekir ki bu durum akışkan çarpma kuvvetleri aracı statik sürtünmeden dinamik sürtünmeye geçirdiğinde geçerli değildir. Biz bu örnekte sürtünme katsayısının değişmediğini kabul ediyoruz.



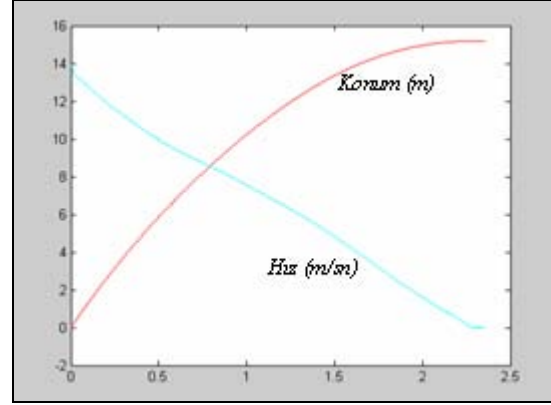
#### 4. TARTIŞMA

Tamamen akışkan dolu olmayan bir araç yavaşlamaya başladığında akışkan hareketine devam etmek isteyecek ve tankın ön kısmına doğru yığılacaktır. Bu süre zarfında başlangıçta akışkanın ataleti aracı etkilemeyeceğinden araç katı kargo taşıyan araca nazaran daha hızlı yavaşlayacak ve başlangıçta  $-μg$  olan ivme değeri negatif yönde artacaktır. Bu artış akışkan ile araç arasındaki hız farkını artıracak dolayısıyla akışkan parçacıkları araca daha yüksek hızlarla çarparak aracı hareket doğrultusunda harekete zorlayacaktır. Bu da aracın yavaşlama ivmesin düşmesine neden olacaktır. Bu etkileşimi her iki yöntemde sarkaç yöntemi de Msc.Dytran programı yardımı ile gerçekleştirdiğimiz simülasyonlarda doğrulamaktadır. Her iki yöntemde elde edilen hız zaman grafiklerindeki sinüzoidal dalgalanma bu davranışı ifade etmektedir.

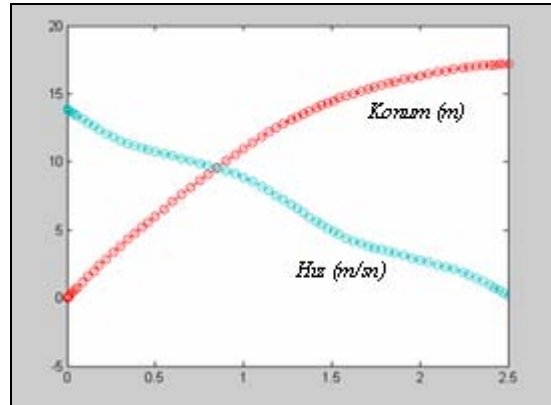
Simülasyonlar neticesinde akışkan kargo taşıyan taşıtlarda yol ile araç arasındaki sürtünme katsayısının sabit olması durumunda akışkan davranışının aracın dinamiğine etkisinin aracın kütesinin taşıdığı akışkan kargo kütesine oranına, toplam hacmin boş hacme oranına ve tank geometrisine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Buna göre akışkan taşıyan sistemin % 25 ila % 50 oranında dolu olduğu durumlarda akışkan davranışının araca etkisinin maksimum olduğu söylenebilir. Zira, yüksek doluluk oranlarında akışkan yeterince serbest hareket edemeyeceğinden, katı bir cismin davranışına yakın bir davranış sergileyecektir. Tamamen dolu bir araç ise tıpkı katı kargo taşıyan bir araç gibi sabit ivme ile yavaşlayacak ve hız-zaman grafiği doğrusal olacaktır.

İki yöntem sonucu elde edilen veriler aracın az dolu (% 50'nin altında dolu) olduğu ve tam doluya çok yakın dolu olduğu durumlarda yakın olmasına karşılık (Şekil 18 ve Şekil 19), aracın % 50 ila % 95 arası dolu olduğu halde sarkaç yöntemi ve simülasyon sonuçlarının farklılık arz ettiği görülmektedir. Bu farklılığın nedenlerinden bir kısmı sarkaç yönteminde tank geometrisinin göz ardı edilmesi ve sarkaç kolunun sabit kabul edilmesidir. Ayrıca çok yüksek ivme değerlerinde akışkanın hareketi çok daha karmaşık olacağından, bu farklılık kendini çok daha fazla hissettirecek ve sarkaç yönteminin kullanılabilirliği kalmayacaktır. Sarkaç yöntemi düşük ivmeli hareketlerde daha kullanışlı olmakla beraber, düşük ivmeli hareketlerde akışkan davranışının araç dinamiğine etkisi de azalacağından bu durumda da çok kullanışlı değildir. Ancak karayolları için sürtünme katsayıları 0.4 ila 0.8 değerleri arasında değiştiğinden, bir kara taşıtının

çok yüksek ivme değerleri ile yavaşlaması zaten mümkün görülmemektedir. Benzer şekilde deniz taşımacılığında da araç ivme değerleri çok yüksek değildir. Dolayısıyla sarkaç yöntemi bu uygulama alanları için kullanışlı olabilir. Burada yüksek ivme aracın hareket doğrultusundaki ivmesinin, yerçekimi ivmesine oranının yüksek olmasını ifade etmektedir. Bu oran da sürtünme katsayısının kendisidir.



Şekil 18. Simülasyon sonucu % 25 dolu aracın konum ve hızının zamanla değişimi



Şekil 19. Sarkaç metodu sonucu % 25 dolu aracın konum ve hızının zamanla değişimi

#### 5. KAYNAKLAR

Aliabadi, S., Johnson, A., Abedi J. 2003. Comparison Of Finite Element And Pendulum Models For Simulation Of Sloshing. Computers & Fluids. 32 : 535-545.

Cho, J. R., Lee, S. Y. 2003. Dynamic Analysis Of Baffled Fuel- Storage Tanks Using The ALE Finite Element Method. International Journal For Numerical Methods In Fluids. 41 : 185-208.

Çelebi, M., Akyıldız, H. 2002. Nonlinear Modeling of Liquid Sloshing in A Moving Rectangular Tank., *Ocean Engineering.*, 29 : 1527-1553.

Nichkawde, C. 2003. Stability Analysis of a Multibody System Model for Coupled Slosh-vehicle Dynamics., *Journal of Sound and Vibration.*, 12 : 2578-4514.

Göktan, A. G., Güney, A., Ereke, M. 1995. Taşıt Frenleri. İTÜ., Makina Fakültesi, Otomotiv Anabilim Dalı.

Rumold, W. 2001. Modeling and Simulation of Vehicles Carrying Liquid Cargo. *Multibody System Dynamics.* 5 : 351-374.

---

---