

Sürtünmeli sarkaç mesnetli düşey silindirik sıvı depolarının deprem yükleri altındaki davranışı

Gökhan YAZICI*, Feridun ÇILI

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Sıvı depoları; başlıca yakıt, endüstriyel kimyasallar, kullanma ve yangın söndürme suyu depolamakta kullanılan önemli mühendislik yapılarıdır. Sıvı depolarını depremin zarar verici etkilerinden korumayı hedefleyen yeni tekniklerden biri de sismik yalıtımdır. Sismik yalıtım sistemleri yardımıyla sıvı depolarının sönüm kapasitelerinin artırılması ve periyot uzaması etkisiyle depo içerisinde dagesel bileşenden kaynaklanan hidrodinamik etkilerin azaltılması amaçlanmaktadır. Ancak, sistem bileşenlerinin doğrusal olmayan davranışı, mekanik özelliklerinin çevre koşulları, yaşlanma, yüklenme koşulları vb. nedeniyle zaman içerisinde değişimi ve depo içerisindeki çalkalanma hareketi, depo ve sismik yalıtım sisteminin tasarımını zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada sürtünmeli sarkaç sistemine mesnetlenen düşey silindirik sıvı depolarının yalıtım sistemi parametrelerinin seçimi ve boyutlandırma da kullanılacak kuvvetlerinin hesaplanması için bir yöntem önerilmiştir. Bu kapsamda, deponun hizmet süresince sismik yalıtım sistemi elemanlarının mekanik özelliklerinde oluşabilecek değişim ve bunun depo tasarımına yansıtacak özellikleri parametrik olarak değerlendirilmektedir. Sürtünmeli sarkaç mesnetleri Bouc-Wen modeli ile modellenmiştir. Düşey silindirik sıvı depolarında hidrodinamik etkilerin hesaplanmasında Veletsos tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin mekanik özelliklerinin, zaman içerisinde çevresel etkiler nedeniyle değişiminin, depo tasarım parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla MATLAB üzerinde çalışan bir yazılım geliştirilmiştir. Söz konusu yazılım tarafından üretilen grafikler kullanılarak tasarımda izlenen yöntem, bir örnek üzerinde açıklanmıştır. Sürtünmeli sarkaç sisteminin depo tasarım kuvvetlerini önemli ölçüde azalttığı, çalkalanma yüksekliğinde ise bir miktar artışa neden olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sismik yalıtım, sürtünmeli sarkaç sistemi, sıvı depoları.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Gökhan YAZICI. gyazici@gmail.com; Tel: (212) 498 42 67.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Sismik yalıtımlı düşey silindirik sıvı depolarının deprem yükleri altındaki davranışının incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 05.09.2008 tarihinde dergiye ulaşıp, 18.09.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Seismic response of isolated upright cylindrical liquid storage tanks with the Friction Pendulum System

Extended abstract

Liquid storage tanks are considered as critical elements of infrastructure systems. These structures are mainly used to store fuel, industrial chemicals and water. Failure of fuel or industrial storage tanks following earthquakes may result in substantial environmental and financial damages (Jaiswal et al., 2004), (Koller and Malhotra, 2004). Studies on the seismic response of tanks show that the bottom portion of the contained liquid moves in unison with the tank while the portion near the free surface oscillates with a long period sloshing motion. Dynamic models built on this principle make the assumption that the continuous liquid media can be represented with two components: a short period impulsive component and a long period convective component responsible for the sloshing motion. Impulsive component is predominantly responsible for the hydrodynamic pressures acting on the tank wall and foundation in ground supported liquid storage tanks. Field studies conducted by various researchers to investigate the seismic damage mechanisms of liquid tanks reveal that these structures generally perform poorly during earthquakes due to a lack of a substantial ductility mechanism that can dissipate large amounts of energy and that new methods should be developed to increase their performance. Seismic isolation is an example of these new methods that aim to protect the liquid storage tanks against earthquakes by increasing their energy dissipation capacity and by lengthening their vibration periods to decrease the hydrodynamic pressures generated by the short period impulsive component.

Recently, the application of seismic isolation and energy dissipation systems has been extended to critical fuel, chemical and fire-fighting water storage tanks. Although there are only a few seismically isolated liquid storage tanks, the number is steadily increasing. However, information on the observed performance of isolated tanks subjected to strong earthquakes is very limited and currently there are no provisions for these structures in the current tank design codes. Sloshing phenomena and the nonlinear behavior of seismic isolation components which have mechanical characteristics that are subject to

change due to aging, environmental and loading conditions etc. complicate the design of both the tank and the seismic isolation system. Therefore, there is a growing need to develop new methods and tools to design and evaluate seismically isolated tanks. This paper begins by outlining the mechanical analogue system to be used for calculating the overturning moment and the base shear in tank wall as well as the free surface displacements for an upright cylindrical tank with rigid walls subjected to a horizontal base excitation. Force-displacement characteristics of the friction pendulum bearings were modeled with the Bouc-Wen hysteresis model.

The effect of variation of friction on the response of the upright cylindrical liquid storage tanks has been investigated through a parametric study, which was conducted using a script that utilizes the Matlab state-space solvers. Aforementioned Matlab script also has the capability to generate normalized plots of the results of the parametric analysis in order to facilitate the design of the seismic isolation system and the estimation of the forces and moments to be used in tank design. Parametric approach to selection of seismic isolation system parameters and the calculation of tank design forces was explained through a case study. The liquid tank used in the case study has a radius of 42 m and is filled with LNG up to 36 m. Friction pendulum bearings used in this study had curvatures of 1m, 1.55 m and 2.23 m. The range of coefficient of friction at the slider interface used in the analysis varied between 0.03 and 0.08. Although, the use of a single convective mode is usually sufficient for most design applications, five convective modes were used in this study to capture the interaction between the long period sloshing component and the isolation system. Damping provided by the liquid storage tanks is usually very limited. Even though a single acceleration record (Scaled Erzincan 1992 EW (0.6g)) was used in this example, this approach can easily be adapted to handle multiple earthquake acceleration records. Tank design forces were decreased in the order of 50% with a slight increase in the freeboard height. In general, seismic isolation of liquid storage tanks with friction pendulum bearings was found to be an effective method for decreasing hydrodynamic effects in liquid storage tanks.

Keywords: Seismic isolation, Friction Pendulum System, liquid storage tanks.

Giriş

Sıvı depoları; başlıca yakıt, endüstriyel kimyasallar, kullanma ve yangın söndürme suyu depolamakta kullanılan önemli mühendislik yapılarıdır. Hasar görmeleri durumunda doğrudan ya da dolaylı olarak maddi ve çevresel hasarlara yol açabilmektedirler.

Yangın söndürme sistemlerinde kullanılan su depolarının önemli bir bölümünün hasar görmesinden dolayı 1906 San Francisco depreminde yangınlar kontrolden çıkmıştır ve depremden sonra bölgeye uzun süre su sağlanamamıştır. (Liu vd., 1996). Yakıt ve kimyasal madde depolarında depremde oluşan hasarlar, can ve mal kaybına ek olarak büyük boyutlarda çevre felaketlerine sebep olabilmektedir. Söz konusu depolarda çıkan yangınların söndürülmesi oldukça güç olmaktadır. Depoların birbirine yakın olduğu durumlarda yangının komşu depolara sıçraması sorunu daha da büyütebilmektedir. Depolarda oluşan hasar nedeniyle sızan kimyasallar ve yangınlarda ortaya çıkan duman, bölgede oldukça ciddi çevre sorunlarının oluşmasına neden olabilmektedir. Yakıt ve kimyasal depolarında meydana gelen hasarlar 1999 Kocaeli depreminde, önemli ekonomik kayıplara ve çevresel hasarlara neden olmuştur. Tüpraş rafinerisinde bulunan nafta yakıt depolarının içerisindeki sıvının çalkalanması sonucu yüzen-çatı ve depo duvarı arasındaki birleşimler hasar görmüştür. Hasar gören birleşimler nedeniyle, bazı depolarda yüzen-çatılar dibe çökmüş ve sıvı depo dışına taşmıştır. Yine hasar gören birleşimler nedeniyle, depo duvarı ile hareket eden yüzen-çatı temas etmiş ve bunun sonucu depoların birinde oluşan kıvılcıklar yangın çıkmasına neden olmuştur. Yangın, çevredeki nafta depolarına da yayılmış ve önemli ekonomik kayba neden olmuştur (Yazıcı ve Çılı, 2005).

Sıvı depolarında depremlerde oluşan hasar tiplerini ve bu hasarlara neden olan etmenleri belirlemek amacıyla çeşitli araştırmacılar tarafından saha çalışmaları yapılmıştır. Söz konusu saha araştırmalarında sıvı depolarının oldukça kötü performans sergiledikleri ve deprem dayanımlarının artırılması için yeni yöntemlerin geliştirilmesinin gerektiği vurgulanmıştır (Malhotra,

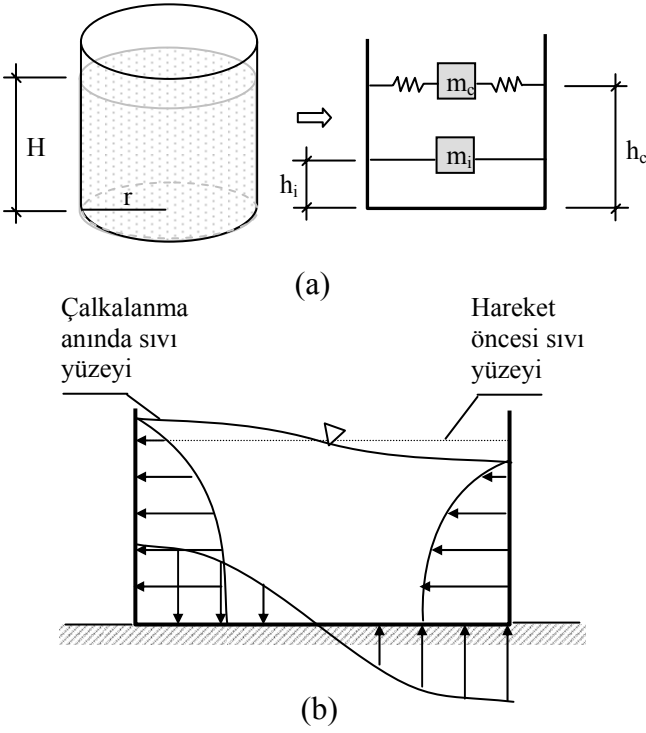
2000). Buna ek olarak, sıvı depolarında aşağıda belirtilen hasarların gözlemlendiği rapor edilmiştir.

- Depo tabanında oluşan “fil ayağı” tipi burkulma
- Emme etkisiyle deponun üst bölümünde oluşan burkulma.
- Çatıyı taşıyan kolonların hidrodinamik etkilerle hasar görmesi
- Yüzen çatılı sıvı depolarında şiddetli çalkalanma sonucu çatı-depo duvarı birleşiminin hasar görmesi
- Depo tabanının yerden kalkması nedeniyle taban-duvar birleşiminin ayrılması
- Depo temelının göçmesi
- Depoya bağlı boru tesisatının kırılması
- Depoyu taşıyan kolonların hasar görmesi
- Deponun içerisindeki sıvının çalkalanma nedeniyle dışarı taşması
- Deponun kayması

Stratejik yakıt ve su depolarının önemli bir kısmının yüksek sismik risk altında bulunan bölgelerde bulunması, bu yapıların dinamik modellenmesi konusunda çok sayıda araştırma yapılmasına ve bu araştırmaların sonuçlarından yararlanan tasarım yönetmeliklerin oluşturulmasını zorunlu kılmıştır. Sıvı depolarının tasarımında kullanılan yönetmeliklerin önemli bir bölümü Housner’in 1950’lerde deprem hareketine maruz kalan rijit silindir sıvı depolarının davranışı üzerine yaptığı çalışmalara dayanmaktadır (Housner, 1957) (Housner, 1963). Housner tarafından öne sürülen modelde sürekli sıvı kütlesi, darbesel kütle ve devinimli kütle olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Bu modelde darbesel kütle, deponun alt kısmında bulunan ve depoyla beraber rijit olarak hareket eden sıvı kütle; devinimli kütle ise deponun üstünde bulunan ve çalkalanmaya neden olan sıvı kütle göstermektedir (Şekil 1). Wozniak ve Mitchell, Housner’in modelini silindir çelik petrol depolarına uyarlamıştır (Wozniak ve Mitchell, 1978). Bu uyarlama, silindir çelik petrol depolarının tasarımında kullanılan API (American Petroleum Institute) şartnamelerine taban oluşturmuştur. Veletsos tarafından 1984 yılında rijit ve esnek duvarlı sıvı depolarının deprem etkisindeki davranışı üzerine hazırlanan rapor ise

Yeni Zelandada ve Eurocode yönetmeliklerinde hidrodinamik kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılmaktadır (Veletsos, 1984).

değişimi ve depo içerisindeki çalkalanma hareketi, depo ve sismik yalıtım sisteminin tasarımını zorlaştırmaktadır.



Şekil 1. (a) Housner tarafından deprem hareketine maruz kalan rijit duvarlı silindirik sıvı haznelere için geliştirilmiş model (Housner, 1957) (Housner, 1963). (b) Depo duvarında ve tabanında oluşan hidrodinamik basınç (Myers, 1997)

Sıvı depolarını depremin zarar verici etkilerinden korumayı hedefleyen yeni tekniklerden biri de sismik yalıtımdır. Sismik yalıtım sistemleri yardımıyla sıvı depolarının sönüm kapasitelerinin artırılması ve depo içerisinde oluşan hidrodinamik etkilerin azaltılması amaçlanmaktadır. Sismik yalıtım sistemlerinin sağladığı diğer bir avantaj da hasarın kolaylıkla değiştirilebilecek elemanlarda yoğunlaşmasıdır.

Sismik yalıtım sistemleri yardımıyla sıvı depolarının sönüm kapasitelerinin artırılması ve periyot uzaması etkisiyle depo içerisinde darbesel bileşenden kaynaklanan hidrodinamik etkilerin azaltılması amaçlanmaktadır. Ancak, sistem bileşenlerinin doğrusal olmayan davranışı, mekanik özelliklerinin çevre koşulları, yaşlanma, yüklemeye koşulları vb. nedeniyle zaman içerisinde

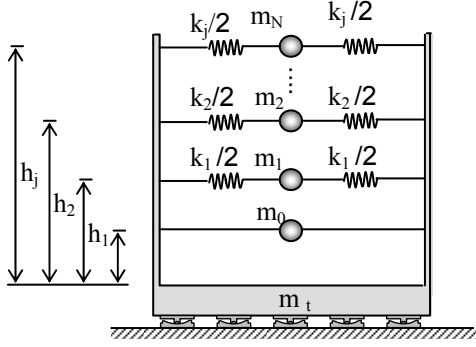
Bu çalışmada sürtülmeli sarkaç sistemine mesnetlenen sıvı depolarının yalıtım sistemi parametrelerinin seçimi ve boyutlandırma kullanılacak kuvvetlerinin hesaplanması için bir yöntem önerilmiştir. Bu kapsamda, deponun hizmet süresince sismik yalıtım sistemi elemanlarının mekanik özelliklerinde oluşabilecek değişim ve bunun depo tasarımına yansıtılacak özellikleri parametrik olarak değerlendirilmektedir. Sürtülmeli sarkaç mesnetlerinin kuvvet-yer değiştirme davranışı Bouc-Wen modeli ile modellenmiştir. Düşey silindirik sıvı depolarında hidrodinamik etkilerin hesaplanmasında Veletsos tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Sismik yalıtım sistemi bileşenlerinin mekanik özelliklerinin, zaman içerisinde çevresel etkiler nedeniyle değişiminin, depo tasarım parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla MATLAB üzerinde çalışan bir yazılım geliştirilmiştir. Söz konusu yazılım tarafından üretilen grafikler kullanılarak tasarımda izlenen yöntem, bir örnek üzerinde açıklanmıştır.

Sismik yalıtımlı depoların hareket denklemleri

Bu bölümde, Veletsos (1984) tarafından zemine doğrudan mesnetlenen düşey, rijit duvarlı, silindirik sıvı depoları için geliştirilen mekanik benzer sistem kullanılarak sürtülmeli sarkaç sistemine mesnetlenen sıvı depolarının hareket denklemleri elde edilecektir. Sürtülmeli sarkaç sistemine mesnetlenen sıvı deposunun mekanik benzer modeli Şekil 2’de verilmiştir.

Sismik yalıtımlı depo sisteminin mutlak yer değiştirmeler kullanılarak oluşturulan hareket denklemleri (1), (2), (3), (4), (5) ve (6) ifadeleriyle verilmiştir. Bu denklemlerde, 5 devinimli modun etkisi ele alınmıştır. Daha yüksek devinimli modların etkisinin oldukça küçük olduğu kabul edilmiştir. Pratik mühendislik uygulamalarında genelde 1 ya da 3 devinimli modun etkisi göz önüne alınmaktadır. Literatür çalışmasında devinimli modlara ait kritik sönüm oranının % 0.5 olarak alındığı görülmüştür (Malhotra,

1997a, Malhotra, 1997b, Malhotra, 1998, Malhotra vd., 2000, Malhotra, 2000, Shirmali ve Jangid, 2002a, Shirmali ve Jangid, 2002b, Shirmali ve Jangid, 2003). Ancak bu bölümde çıkarılan ifadelerde sıvının viskos olmadığı ve depo duvarının rijit olduğu kabülleri yapıldığı için devinimli bileşenin sönümü ihmal edilmiştir.



Şekil 2. Sismik yalıtımlı ve rijit duvarlı sıvı deposunun dinamik modeli

$$m_1 \ddot{u}_1 + k_1 (u_1 - u_b) = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + k_2 (u_2 - u_b) = 0 \quad (2)$$

$$m_3 \ddot{u}_3 + k_3 (u_3 - u_b) = 0 \quad (3)$$

$$m_4 \ddot{u}_4 + k_4 (u_4 - u_b) = 0 \quad (4)$$

$$m_5 \ddot{u}_5 + k_5 (u_5 - u_b) = 0 \quad (5)$$

$$m_b \ddot{u}_b + \sum_{j=1}^5 m_j \ddot{u}_j + F_b = 0 \quad (6)$$

Yukarıda verilen hareket denklemlerinde, m_j , k_j ve u_j sırasıyla j devinimli moduna ait kütle, yanal rijitlik ve mutlak yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Buna ek olarak, m_b mesnetlerin üzerindeki toplam rijit kütle (7) ve F_b ise sismik yalıtım sisteminde oluşan yanal kuvveti göstermektedir.

$$m_b = m_0 + m_t \quad (7)$$

Bu ifadede, m_0 darbesel kütle, m_t ise mesnetlerin üzerindeki tabliyenin ve boş deponun toplam kütle göstermektedir. Darbesel kütle, (8) ifadesiyle hesaplanmaktadır.

$$m_0 = m_L \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} \frac{1}{(2n-1)^3} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{R}{H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{R}{H} \right]} \quad (8)$$

Bu ifadede, m_L toplam sıvı kütle, H sıvı yüksekliğini, R depo yarıçapını temsil etmektedir. I_1 ve I_1' ise sırasıyla birinci derece ve birinci mertebeden Modifiye Bessel fonksiyonunu ve onun birinci türevini temsil etmektedir (Veletsos, 1984).

Sistemin devinimli modlarına karşılık gelen kütleleri gösteren m_j , (9) denklemi ile hesaplanmaktadır. Bu ifadede λ_j , $J_1'(\lambda) = 0$ ifadesinin j . köküdür. J_1' , birinci derece ve birinci mertebeden Bessel fonksiyonunun birinci türevidir (Veletsos, 1984).

$$m_j = \left[\frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{R}{\lambda_j H} \tanh \left(\lambda_j \frac{H}{R} \right) \right] m_t \quad (9)$$

Devinimli bileşenlerin rijitlikleri ve titreşim frekansları (10) ve (11) ifadeleri kullanılarak hesaplanmaktadır. (11) ifadesinde g , yer çekimi ivmesini göstermektedir.

$$k_j = m_j \omega_j^2 \quad (10)$$

$$\omega_j^2 = \frac{\lambda_j g}{R} \tanh \left(\lambda_j \frac{H}{R} \right) \quad (11)$$

Darbesel kütle yüksekliği h_0 , (12) ve (13) ifadeleriyle hesaplanmaktadır. (12) ve (13) ifadelerindeki seri toplamlarında 20 terimin kullanılmasının yeterli doğrulukta sonuçlar verdiği görülmüştür.

$$h_0 = H \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left[1 - \frac{2(-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \right] \alpha_n}{\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n} \quad (12)$$

$$\alpha_n = \frac{16}{\pi^3} \frac{H}{R} \frac{1}{(2n-1)^3} \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{R}{H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{R}{H} \right]} \quad (13)$$

Devinimli kütlelerin depo tabanından yükseklikleri h_j , (14) ifadesiyle hesaplanmaktadır (Veletsos, 1984).

$$h_j = \left[1 - \frac{R}{\lambda_j H} \tanh\left(\frac{\lambda_j H}{2 R}\right) \right] H \quad (14)$$

Hareket denklemlerinin görelî yer değiştirmeler cinsinden yeniden yazılması, sonuçların değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Görelî yer değiştirmeler cinsinden hareket denklemleri (15), (16), (17), (18), (19) ve (20) ifadeleriyle verilmiştir.

$$m_1(\ddot{v}_1 + \ddot{u}_g) + k_1(v_1) = 0 \quad (15)$$

$$m_2(\ddot{v}_2 + \ddot{u}_g) + k_2(v_2) = 0 \quad (16)$$

$$m_3(\ddot{v}_3 + \ddot{u}_g) + k_3(v_3) = 0 \quad (17)$$

$$m_4(\ddot{v}_4 + \ddot{u}_g) + k_4(v_4) = 0 \quad (18)$$

$$m_5(\ddot{v}_5 + \ddot{u}_g) + k_5(v_5) = 0 \quad (19)$$

$$m_b \ddot{v}_b + \sum_{j=1}^5 m_j \ddot{v}_j + F_b = -M \ddot{u}_g \quad (20)$$

Görelî hareket denklemlerinde v_j , j devinimli kütlelerinin sismik yalıtım sistemine göre görelî yer değiştirmesini (21), v_b sismik yalıtım sisteminin yere göre görelî yer değiştirmesini (22) ve M ise sismik yalıtım sistemi üzerindeki toplam kütleyle göstermektedir.

$$v_j = u_j - u_b \quad (21)$$

$$v_b = u_b - u_g \quad (22)$$

Depo duvarına herhangi bir t anında oluşan hidrodinamik taban kesme kuvveti, darbesel bileşen ile devinimli bileşenlerin toplamı olarak (23) ifadesinde verilmiştir (Veletsos, 1984).

$$Q(t) = m_0 \ddot{v}_b(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j A_j(t) \quad (23)$$

Yukarıdaki ifadede $A_j(t)$ (24), j devinimli kütlelerinin ivmesinin zaman içerisindeki değişimini vermektedir (Veletsos, 1984). (24) denkleminde elde edilen $A_j(t)$ ivmesi, sözde ivmedir. Devinimli modların sönümlerinin ihmal edilebilecek mertebede olması nedeniyle bu denklem kullanılmıştır.

$$A_j(t) = \omega_j \int_0^t \ddot{v}_b(\tau) \sin[\omega_j(t - \tau)] d\tau \quad (24)$$

Taban kesme kuvveti, depo duvarında ve temelinde oluşan eğilme momentlerinin en elverişsiz değerlerinin hesaplanmasında, modal periyotların yakınlığı ilkesine göre modların birleştirilmesi karelerin toplamının karekökü (SRSS) veya tam karesel birleştirme yöntemleriyle yapılabilir. Bu çalışmada kullanılan depo geometrileri için karelerin toplamının karekökü yönteminin modların birleştirilmesi için uygun olduğu görülmüştür. Ancak ayırık doğal frekansların oluşmadığı depo geometrileri için tam karesel birleştirme yönteminin kullanılması daha uygun olacaktır.

Taban kesme kuvvetinin en elverişsiz değeri (25) denklemi ile hesaplanabilir. Bu denklemde $\ddot{v}_{b,\max}$ depo tabanı ivmesinin en büyük değerini ve $A_{j\max}$ ise $A_j(t)$ 'nin en büyük değerini göstermektedir (Veletsos, 1984).

$$Q_{\max} = m_0 \ddot{v}_{b,\max} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} [m_j A_{j\max}]^2} \quad (25)$$

Depo duvarında herhangi bir t anında oluşan hidrodinamik eğilme momenti, darbesel bileşen ve devinimli bileşenlerin toplamı olarak (26) ifadesinde verilmiştir (Veletsos, 1984).

$$M(t) = m_0 h_0 \ddot{x}_s(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j h_j A_j(t) \quad (26)$$

Depo temelinde herhangi bir t anında oluşan eğilme momenti, darbesel ve devinimli bileşenlerinin toplamı olarak (27) ifadesinde verilmiştir.

$$M'(t) = m_0 h_0' \ddot{u}_g(t) + \sum_{j=1}^{\infty} m_j h_j' A_j(t) \quad (27)$$

Söz konusu ifadeye yer alan yükseklikler, (28) ve (29) ifadeleri yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$h_0' = h_0 + \frac{m_l H}{m_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{\pi^3} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} \frac{I_2 \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2H} \right]}{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi R}{2H} \right]} \quad (28)$$

$$h_j' = h_j + \frac{R}{\lambda_j \sinh \left(\lambda_j \frac{H}{R} \right)} \quad (29)$$

Depo duvarında ve temelinde oluşan hidro-dinamik eğilme momentinin en elverişsiz değerleri sırasıyla (30) ve (31) ifadeleri ile hesaplanmaktadır (Veletsos, 1984).

$$M_{\max} = m_0 h_0 \ddot{u}_{g,\max} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} (m_j h_j A_{j\max})^2} \quad (30)$$

$$M'_{\max} = m_0 h_0' \ddot{u}_{g,\max} + \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} (m_j h_j' A_{j\max})^2} \quad (31)$$

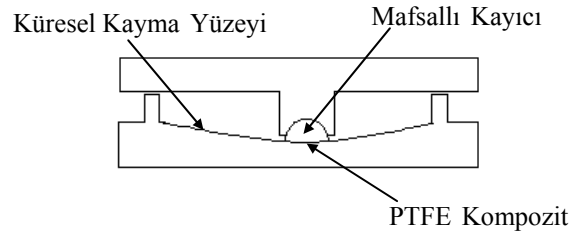
Depo içerisinde bulunan sıvının çalkalanma nedeniyle dışarı taşmasını engellemek amacıyla serbest sıvı yüzeyi ile depo duvarının en yüksek noktası arasında bir emniyet payı bırakılmaktadır. Bu emniyet payı (32) ifadesiyle hesaplanmaktadır (Veletsos, 1984).

$$d_{\max} = R \sqrt{\sum_{j=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\lambda_j^2 - 1} \frac{A_{j\max}}{g} \right)^2} \quad (32)$$

Sürtünlmeli sarkaç sistemi

Sürtünlmeli sarkaç mesnetleri, küresel çelik bir yüzey üzerinde hareket eden mafsalı bir kayıcıdan oluşmaktadır (Şekil 3). Mafsalı kayıcı, küresel yüzey üzerinde hareket ettikçe taşınan kütle yükselmekte ve yerçekiminin etkisiyle geri gelmektedir. Mafsalı kayıcının altında bulunan PTFE (politetrafloroetilen) tabaka ile paslanmaz

çelik içbükey yüzey arasında oluşan sürtünme sayesinde yapıya iletilen enerjinin bir kısmı sönmelenmektedir.

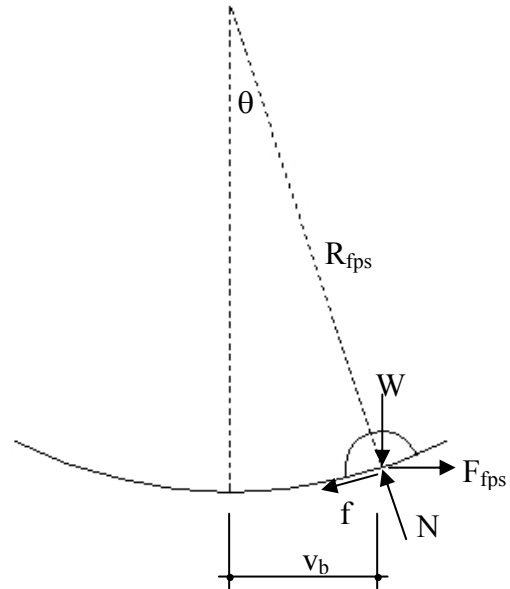


Şekil 3. Sürtünlmeli sarkaç mesnetinin kesiti

Sürtünlmeli sarkaç mesnetlerinde oluşan kuvvet (33) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$F_{fps} = \frac{W}{R_{fps}} v_b + \mu WZ \quad (33)$$

Yukarıdaki ifadede, R_{fps} sürtünlmeli sarkaç mesnetlerinin eğrilik yarıçapını, v_b mesnetin yatayda yer değiştirmesini, W mesnete etkiyen düşey kuvveti ve μ ise PTFE (politetrafloroetilen) kompozit ile çelik kayma yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısını göstermektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Sürtünlmeli sarkaç sisteminin geometrisi (Mosqueda vd., 2004)

Kuvvet ifadesinin ilk terimi geri döndürücü kuvveti, ikinci terim ise sürtünme kuvvetini göstermektedir. Sürtünme kuvveti, geri döndürücü

kuvvetten fazla ise mafsallı kayıcı eski konumuna geri dönemeyecektir. Dolayısıyla, $v_b/R_{fps} \leq \mu$ olması durumunda yalıtım sisteminin geri döndürücü bir mekanizma ile takviye edilmesi gerekmektedir (Naeim ve Kelly, 1999).

Z boyutsuz çevrimsel değişkeninin değeri (34)'de verilen Bouc-Wen modeli ile hesaplanmaktadır (Bouc, 1967), (Park, vd., 1986).

$$Y\dot{Z} + \gamma|\dot{u}|Z|Z|^{\eta-1} + \beta\dot{u}|Z|^{\eta} - A\dot{u} = 0 \quad (34)$$

Bouc-Wen ifadesinde β, γ, A ve η boyutsuz katsayılarıdır ve kuvvet-yer değiştirme çevrimlerinin şeklini tanımlamakta kullanılmaktadır. $\eta=2$, $A = 1$ ve $\beta+\gamma=1$ ($\gamma=0.9$, $\beta=0.1$) olması durumunda, deneysel sonuçlara yakın kuvvet-yer değiştirme çevrimlerinin elde edildiği görülmüştür. Sürtünmeli sarkaç mesnetleri için Y, kayıcı yüzeyle temas eden PTFE kaplama malzemesinin akma yer değiştirmesini göstermektedir. Söz konusu yer değiştirme, PTFE kaplama malzemesinin kalınlığına göre 0.13-0.25 mm arasında değişmektedir (Constantinou vd., 1990). Bu çalışmada akma yer değiştirmesinin değeri 0.15 mm olarak alınmıştır. Sürtünmeli sarkaç sistemi hakkında ayrıntılı bilgi (Zayas vd, 1987), (Zayas vd., 1990), (Mosqueda vd., 2004), (Mokha vd., 1991), (Mokha vd., 1990) ve (Almazan vd., 1998) kaynaklarından elde edilebilir.

Örnek uygulama

Sismik yalıtım sistemi parametrelerinin seçimi ve depo tasarımında kullanılacak kuvvet ve eğilme momentlerinin elde edilmesinde parametrik yaklaşımın kullanımı bu bölümde örnek bir uygulama ile gösterilmiştir. Bu çalışmada, İzmir-İzmir Egegaz tesislerinde bulunan sismik yalıtımlı LNG depolarının geometrik özellikleri kullanılmıştır. Bu doğrultuda depolanan sıvı yüksekliği 36 m ve depo yarıçapı 42 m olarak alınmıştır. Söz konusu LNG deposunun 0.6 g en büyük ivmeye dayanıklı olarak tasarlanması istenmektedir. Bu doğrultuda, sahaya özel olarak türetilen ivme kaydı olarak Erzincan 1992 Doğu-Batı bileşeninin 0.6 g'ye ölçeklenmiş hali kullanılmıştır. İnşaat alanının sismolojik özelliklerine göre türetilen birden fazla ivme

kaydının kullanılması durumunda, aşağıda izlenen süreç her kayıt için tekrar edilerek sismik yalıtım sistemi parametreleri ve depo tasarımında kullanılacak kuvvet ve eğilme momentleri hesaplanabilir. Bu çalışmada, sismik yalıtım sistemi olarak sürtünmeli sarkaç sistemi seçilmiştir.

İlk aşamada sürtünmeli sarkaç mesnet yarıçapı ve sürtünme katsayısının depoda oluşan kuvvet ve eğilme momentleri üzerindeki etkilerinin izlenebilmesi için parametrik bir çalışma yapılmış ve bu çalışmanın sonuçları sabit tabanlı durum için elde edilen değerlere göre normalize edildiği grafikler aracılığıyla Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Sabit tabanlı durum için depo tasarım parametrelerinin değerleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

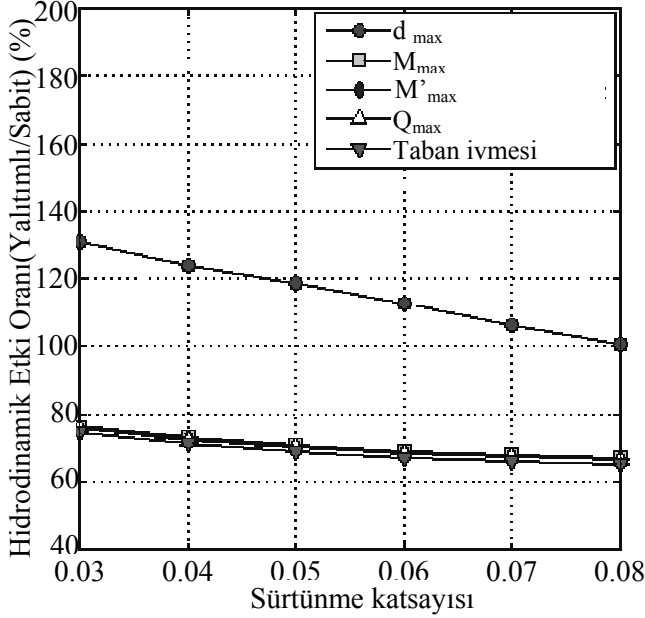
Tablo 1. Sabit tabanlı depo için elde edilen depo tasarım parametreleri

M_{\max} (MNm)	M'_{\max} (MNm)	Q_{\max} (MN)	d_{\max} (m)
6656	13661	460	0.75

Mesnet eğrilik yarıçapı olarak sırasıyla 1 m, 1.55 m ve 2.23 m kullanılmıştır. Bu değerler, teorik olarak sürtünmesiz kayma yüzeyi durumu için sürtünmeli sarkaç sistemi üzerinde bulunan rijit bir yapının titreşim periyodunun sırasıyla 2s, 2.5s ve 3s olmasını sağlamaktadır. Ancak kayma yüzeyinin sürtünmeli olması ve üst yapının rijit olmaması durumları göz önüne alındığında sismik yalıtımlı depoların titreşim periyotları önemli ölçüde değişebilmektedir.

Sürtünmeli sarkaç sisteminde sürtünme sayesinde yapının rüzgar ve trafikten kaynaklanan titreşimler etkisinde hareket etmesi engellenmektedir. Kuvvetli deprem hareketi sırasında ise sürtünme, yapıya iletilen enerjinin ısıya dönüştürülerek sönmelenmesini sağlamaktadır. Ancak sürtünme katsayısının değeri, artan ortam sıcaklığına bağlı olarak hareket sırasında azalabilmektedir. Buna karşın çevre koşullarından dolayı kayma yüzeyinde oluşabilecek kirlenme ve korozyon da sürtünme katsayısının değerini arttırabilmektedir. Sürtünme katsayısının değişimi

minin mesnet yer değiştirmesi ve depo tasarım parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla sürtünme katsayısının değerleri 0.03 ile 0.08 arasında alınmıştır.



Şekil 5. Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($R_{fps} = 1m$)

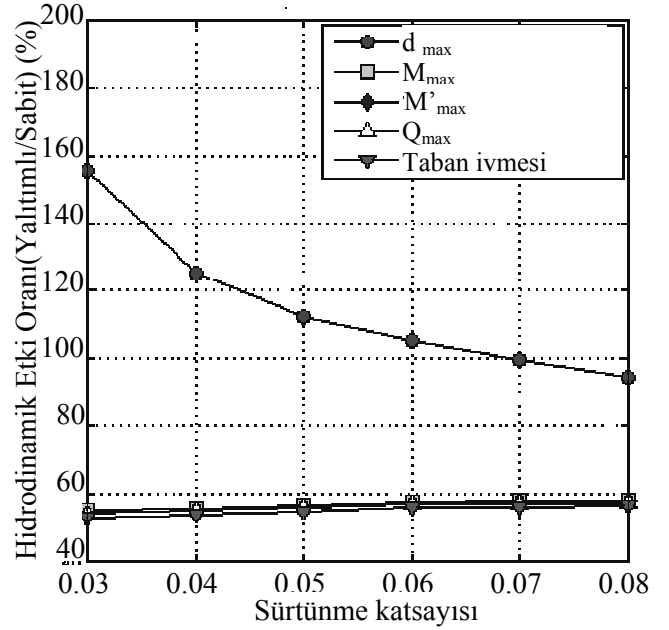
Analiz sonuçları incelendiğinde 2.24 m eğrilik yarıçapına ve 0.04 sürtünme katsayısına sahip mesnetlerle depoda oluşan kuvvet ve eğilme momentlerinde sağlanabilecek azalma en yüksek olmaktadır (Şekil 7). Çalkalanma yüksekliği ve mesnet yer değiştirmesi parametrelerinin de göz önüne alınması durumunda daha yüksek sürtünme katsayısına sahip mesnetlerin kullanılmasının daha avantajlı olacağı görülmektedir. Ancak sürtünme katsayısının 0.08'den büyük değerleri için yalıtım sisteminin geri döndürücü bir mekanizma ile takviye edilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, sürtünme katsayısı 0.06 olarak seçilmiş ve ± 0.02 bir değişim göz önüne alınmıştır.

En büyük çalkalanma yüksekliği ve mesnet yer değiştirmesi değerleri sürtünme katsayısının 0.04 değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu durumda, en büyük mesnet yer değiştirmesinin 20 cm olarak seçilebileceği Şekil 8'de görülmektedir.

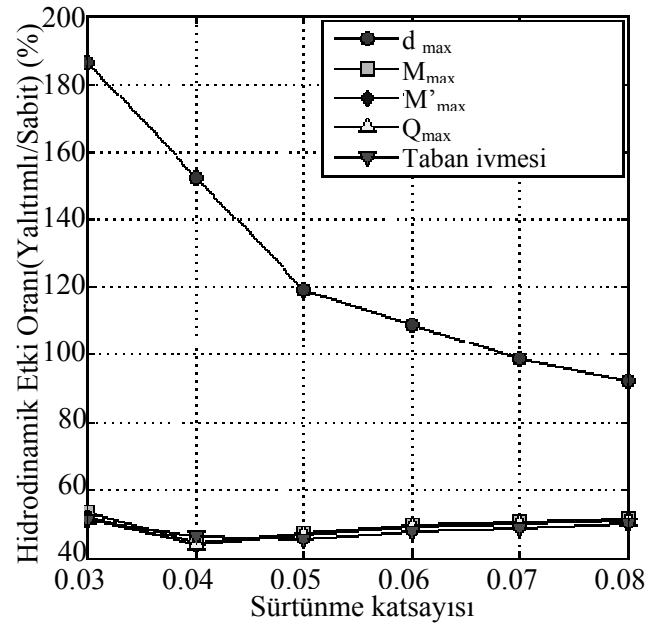
Sismik yalıtımlı depoda oluşacak en büyük çalkalanma yüksekliği, sabit durum için elde edilen

değerin 1.5 ile çarpılmasıyla (35) ifadesinde elde edilmiştir. Tasarımda en büyük çalkalanma yüksekliğinin 115 cm olarak alınması uygun olacaktır.

$$d_{max} = 0.75 \times 1.5 = 1.125 m \quad (35)$$

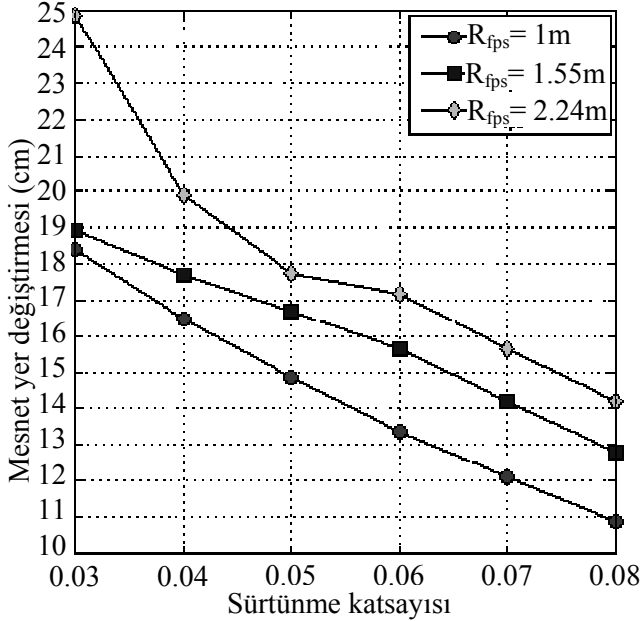


Şekil 6. Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($R_{fps} = 1.55 m$)



Şekil 7. Sürtünme katsayısının depo tasarım parametreleri üzerindeki etkisi ($R_{fps} = 2.24 m$)

Depoda oluşan kuvvet ve eğilme momentleri ise sürtünme katsayısının 0.08 değeri kullanılarak hesaplanmıştır. Sürtünme katsayısının bu değeri için sismik yalıtımlı depoda oluşan kuvvet ve eğilme momentlerinin sabit tabanlı durum için elde edilen değerlerin %50 mertebesinde olduğu Şekil 7'de görülmektedir. Bu durumda, sismik yalıtımlı durum için depo tasarım parametrelerinin değerleri Tablo 2'de özetlenmiştir.



Şekil 8. Sürtünme katsayısının mesnet yer değiştirmeleri üzerindeki etkisi

Tablo 2. Sismik yalıtım ve zemine doğrudan mesnetlenme koşulları için elde edilen depo tasarım parametreleri

	Sabit Tabanlı	Sismik Yalıtımlı
M_{max} , MNm	6656	3328
M^2_{max} , MNm	13661	6830
Q_{max} , MN	460	230
d_{max} , m	0.75	1.15

Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sürtünmeli sarkaç mesnetlerinin sürtünme katsayısı, basınç, ortam sıcaklığı ve yükleme hızına bağlı olarak değişmektedir. Buna ek olarak, zamanla kayma yüzeyinde oluşabile-

cek kirlenme ya da korozyon gibi etmenler sürtünme katsayısının artmasına neden olabilmektedir. Analizlerde, sürtünme katsayısının artması durumunda küçük sürtünme değişimlerinin tasarım parametreleri üzerindeki etkisi azalmaktadır. Ancak düşük sürtünmeli mesnetlerin kullanıldığı depolarda, tasarım parametrelerinin sürtünme değişimlerine oldukça duyarlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, yapının hizmet süresi içerisinde sürtünme katsayısındaki olası değişimin, tasarım parametrelerinin üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulmalı ve en elverişsiz değerler kullanılmalıdır.

- Sismik yalıtım, depo duvarında oluşan hidrodinamik yükleri azaltmaya ek olarak, depo temelinde oluşan hidrodinamik yükleri de önemli ölçüde azaltmaktadır.
- Sismik yalıtım parametrelerinin seçiminde hidrodinamik yüklerdeki azalma oranına ek olarak mesnet yer değiştirmeleri ve çalkalanma yüksekliğindeki değişim de beraber değerlendirilmelidir. Bu çalışmada takip edilen yöntem ve geliştirilen yazılım tarafından üretilen normalize edilmiş grafikler, söz konusu değerlendirmeyi oldukça kolaylaştırmaktadır.

Kaynaklar

- Almazan, J.L., De La Llera, J.C., ve Inaudi, J.A., (1998). Modeling aspects of structures isolated with the friction pendulum system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**, 845–867.
- Bouc, R., (1967). Forced vibrations of mechanical systems with hysteresis, *Proceedings of the 4th Conference on Nonlinear Oscillation*, Prague, Czechoslovakia, p.315 (Abstract).
- Constantinou, M.C., Mokha, A., ve Reinhorn, A.M., (1990). Teflon bearings in base isolation II: Modelling. *Journal of Structural Engineering*, *ASCE*, **116**, 455–474.
- Housner, G.W., (1957). The dynamic pressures on accelerated fluid containers, *Bulletin of Seismological Society of America*, **47**, 1, 15-39.
- Housner, G.W., (1963). The dynamic behavior of water tanks, *Bulletin of Seismological Society of America*, **53**, 381-387.
- Jaiswal, O.R., Rai, D.C., ve Jain, S.K., (2004). Review of code provisions on seismic analysis of

- liquid storage tanks, Report No. IITK-GSDMA-EQ-04-V1.0, Indian Institute of Technology Kanpur, India.
- Koller, M.G., ve Malhotra, P.K., (2004) Seismic evaluation of unanchored tanks. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, August 1-6.
- Liu, H., Schubert, D.H., Yang, Z., ve Lang, R., (1996). Comparative study of linear-elastic and nonlinear-inelastic seismic responses of fluid-depo systems, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, August 1-6.
- Malhotra, P.K., (1997a). Method for seismic base isolation of liquid storage tanks, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **123**, 113-116.
- Malhotra, P.K., (1997b) New method for seismic isolation of liquid storage tanks, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **26**, 839-847.
- Malhotra, P.K., (1998). Seismic strengthening of liquid storage tanks with energy-dissipating anchors, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**, 405-414.
- Malhotra, P.K., Wenk, T., ve Wieland, M., (2000). Simple procedure for seismic analysis of liquid storage tanks, *Structural Engineering International, IABSE*, **10**, 197-201.
- Malhotra, P.K., (2000). Practical nonlinear seismic analysis of tanks, *Earthquake Spectra*, **16**, 473-492.
- Mokha, A., Constantinou, M.C., and Reinhorn, A.M., (1990). Teflon bearings in base isolation I: Testing. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **116**, 438-455.
- Mokha, A., Constantinou, M.C., Reinhorn, A.M., ve Zayas, V.A., (1991). Experimental study of friction pendulum isolation system, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **117**, 1201-1217.
- Mosqueda, G., Whittaker, A.S., ve Fenves, G.L., (2004). Characterization and modeling of friction pendulum bearings subjected to multiple components of excitation, experimental study of friction pendulum isolation system, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **130**, 433-442.
- Myers, P.E., (1997). Aboveground storage tanks, 690 pages, McGraw Hill, New York.
- Naeim, F., ve Kelly, J.M., (1999). Design of seismic isolated structures: From theory to practice, Wiley, 101-104, New York.
- Park, Y. J., Wen, Y.K., ve Ang, A.H.S., (1986). Random vibration of hysteretic systems under bidirectional ground motions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, 543-557.
- Shirmali, M.K., ve Jangid, R.S., (2002a). Earthquake response of liquid storage tanks with sliding systems, *Journal of Structural and Earthquake Engineering*, **4**, 51-61.
- Shirmali, M.K., ve Jangid, R.S., (2002b). A comparative study of performance of various isolation systems for liquid storage tanks, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **2**, 573-591.
- Shirmali, M.K., ve Jangid, R.S., (2003b) Dynamic analysis of liquid storage tanks with sliding systems, *Advances in Structural Engineering*, **6**:145-158.
- Wozniak, R.S., ve Mitchell, W.W., (1978) Basis of seismic design provisions for welded steel oil storage tanks, *Sessions on Advances in Storage Tank Design*, American Petroleum Institute, Washington, USA.
- Veletsos, A.S., (1984). Seismic response and design of liquid storage tanks, *Proceedings of Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, ASCE*, New York, 255-370 and 443-461.
- Yazıcı, G., ve Çılı, F., (2005). Silindirik depoların sismik yalıtım yöntemiyle depremden korunması, *Kocaeli 2005 Deprem Sempozyumu*, Mart 2005.
- Zayas, V.A., Low, D.S., and Mahin, S.A., (1987). The FPS earthquake resisting system, *Earthquake Engineering Research Center Technical Report, UCB/EERC-87/01*, University of California at Berkeley, Berkeley, California.
- Zayas, V.A., Low, D.S., and Mahin, S.A., (1990). A simple pendulum technique for achieving seismic isolation, *Earthquake Spectra*, **6**, 317-314.