

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİKDÖRTGEN KESİTLİ YÜKSELTİLMİŞ SU TANKINDAKİ SU
ÇALKANTISININ YAPININ DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Erhan İNCE**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİKDÖRTGEN KESİTLİ YÜKSELTİLMİŞ SU TANKINDAKİ SU
ÇALKANTISININ YAPININ DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Erhan İNCE**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fethi KADIOĞLU

Eş Danışman: Doç. Dr. Hakan AKYILDIZ

ŞUBAT 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **501031111** numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Erhan İNCE** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“DİKDÖRTGEN KESİTLİ YÜKSELTİLMİŞ SU TANKINDAKİ SU ÇALKANTISININ YAPININ DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Fethi KADIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Hakan AKYILDIZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Necati Erdem Ünal**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. İsmail Hakkı Helvacıoğlu
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Barış Barlas
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **14 Eylül 2011**

Savunma Tarihi : **24 Şubat 2012**

ÖNSÖZ

Bu çalışmada deprem etkisi altındaki dikdörtgen kesitli bir yükseltilmiş su tankındaki sıvı çalkantısının yapı davranışı üzerindeki etkisi VOF tekniği ile geliştirilen bir yazılım desteği ile incelenmiştir.

Bu çalışma sırasında değerli katkılarını zamanını esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Fethi Kadioğlu, Doç. Dr. Hakan Akyıldız ve tüm çalışmalarına destek olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Yalçın Aköz'e teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2012

Erhan İnce
İnşaat Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. TANIMLAR	3
2.1 Çalkantı	3
2.2 Yükseltilmiş Su Tankları ve Yapı Güvenliği	3
2.3 Doğal Çalkantı Frekansları ve Rezonans etkileri	4
3. METOT VE FORMÜLASYON	5
3.1 Metot	5
3.2 Çalkantı Probleminin Formülasyonu.....	6
3.3 Kütlenin Korunumu:.....	6
3.4 Momentumun Korunumu:	7
3.5 Katı Cisim Sınır Koşulları	7
3.6 Serbest Yüzey Sınır Koşulları	7
3.7 Hareketli Koordinat Sistemi	8
3.8 Nümerik Metotlar	9
3.9 SOLA Basit Çözüm Algoritması.....	10
3.9.1 Hareket denklemi	10
3.9.2 Sonlu farklar metodu ile hareket denklemleri	10
3.9.3 Hesaplama işlemleri	14
3.9.4 Serbest yüzey problemi	15
4.YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	17
4.1 Çalkantı	17
4.2 Deprem Etkisi Altındaki Yükseltilmiş Sıvı Tanklarında Sıvı Ve Yapı Etkileşimi.....	18

5. ÇALKANTI İÇİN NÜMERİK METODLAR:	19
5.1 Çalkantı İçin Hesaplama İşlemleri	19
5.2 Çalkantı Hesabında Nümerik Kararlılık Ve Nümerik Doğruluk:	20
5.3 Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı	21
5.4 Deprem Yüğü Hesabı	22
5.5 Deprem Yüğülerinin Tanımlanması	26
5.5.1 Spektral ivme katsayısı	26
5.5.2 Elastik deprem yüğü:	27
5.5.3 Bina önem katsayısı	28
5.5.4 Deprem yapılar üzerindeki etkileri	28
5.5.5 Deprem etkisinin altındaki yapı için çözümleme yöntemleri	29
5.5.6 Yükseltilmiş su tankları ve problem	31
5.5.7 Sıvı tanklarının deprem etkisi altındaki dinamik davranışları	33
6- PROBLEMİN TANIMI	35
6.1 Yükseltilmiş Tank Modeli	35
6.2 İzlenen Metotlar Ve Hesaplama	36
6.3 Problemin Çözümü	38
7. PROBLEMLER	39
7.1 Problem 1:	39
7.2 Durum 1:	42
7.3 Durum 2:	44
7.4 Durum 3:	45
7.4 Durum 4:	47
8. SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	53

KISALTMALAR

- P** : Akışkan basıncı
Patm : Atmosfer basıncı
 θ : Dönüş açısı
g : Yerçekimi ivmesi
 n_x, m_x : Birim vektör normalinin ve teğetinin x bileşenleri
 n_y, m_y : Birim vektör normalinin ve teğetinin y bileşenleri
d : Hareket eden koordinat sisteminin orijini ile dönüş eksenini arasındaki mesafe
 ρ : Akışkanın yoğunluğu
 ν : : Kinematik viskozite
 F_{el} : Elastik Deprem Yüğü
R : Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
I : Bina Önem Katsayısı
Ta, Tb: Spektrum karakteristik periyotları
Ao : Etkin yer ivmesi katsayısı
S(T) : Spektrum katsayısı
T : Bina doğal titreşim periyodu
A(T) : Spektral ivme katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.5.1 : Etkin yer ivmesi Katsayısı.....	26
Çizelge 5.5.2 : Yerel zemin sınıfına göre periyotlar.....	27
Çizelge 5.5.5: Bina önem katsayıları.....	30
Çizelge 5.5.6: Deprem yükü azaltma katsayısı.....	31

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Hareket eden koordinat sistemi.	9
Şekil 3.9.1 : Serbest yüzey sınır koşulu.	16
Şekil 5.1 : VOF metodu ile elde edilen sonuçları ile diğer sonuçların kıyaslanması. (Akyıldız, H., Çelebi, M.S, 2001)	20
Şekil 5.4.1 : P(t) yükü etkisindeki sistem.	22
Şekil 5.4.2 : Yapının konsol çubuk olarak gösterimi.	23
Şekil 5.4.3 : Deprem etkisindeki yapının konsol çubuk olarak gösterimi.	23
Şekil 5.5.6 : Zarar görmüş su tankları.....	32
Şekil 5.5.7 : Su tankı ve serbest yüzey.	33
Şekil 5.5.8 : Su tankı modeli.....	33
Şekil 6.1 : Su depolama tankı ve boyutlandırma.	35
Şekil 6.2.1 : El Centro depreminden sonra oluşan hasarları gösteren bir fotoğraf.	36
Şekil 6.2.2 : El Centro depreminde kaydedilen yer ivmesi – zaman grafiği.	37
Şekil 6.2.3 : El Centro depreminde kaydedilen spektrumlar.	37
Şekil 7.1 : Yükseltilmiş su tankı ve iki serbestlik dereceli modeli.	39
Şekil 7.2 : İki serbestlik dereceli model.	41
Şekil 7.2.1 : T=1.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri	42
Şekil 7.2.2 : T=2.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri	43
Şekil 7.2.3 : Durum 1 için yatay kuvvetin zamanla değişim grafiği.	43
Şekil 7.3.1 : T=1.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri	44
Şekil 7.3.2 : T=2.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri	45
Şekil 7.3.3 : Durum 2 için yatay kuvvetin zamanla değişim grafiği.	45
Şekil 7.4.1 : T=1.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri	46
Şekil 7.4.2 : T=2.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri	46
Şekil 7.4.3 : Durum 3 için yatay kuvvetin zamanla değişim grafiği.	47
Şekil 7.4.4 : T=1.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri	47
Şekil 7.4.5 : Durum 4 için yatay kuvvetin zamanla değişim grafiği.	48

DİKDÖRTGEN KESİTLİ YÜKSELTİLMİŞ SU TANKINDAKİ SU ÇALKANTISININ YAPININ DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

ÖZET

Çalkantı, akışkanlar mekaniğinde bir sıvının bir nesne içindeki hareketi olarak tanımlanır. Bir gemide, bir uzay aracında, sıvı taşıyan bir araç içinde veya bir su tankında, sıvı ile tam doldurulmamış durumlarda nesnenin hareketinin periyodu, akışkanın doğal periyoduna yaklaştığında oluşan çalkantı, yapının güvenliğini etkileyebilecek ek yükler oluşturabilmektedir.

Uzay araçlarında özellikle NASA için 1960'lı yıllarda başarısız roket fırlatmaları ile sonuçlanan durumlarda problemin kaynağında, rokette yapısal sorunlara yol açan etkilere ek olarak Çalkantı etkileri de tespit edilmiştir. Çalkantının roket olsun, su tankları olsun herhangi bir yapı üzerindeki etkilerini ve oluşturduğu ek yükleri önceden öngörebilmek için çeşitli çalışmalar yapılmış ve çalkantı problemlerinin simülasyonlarını yapabilmek, başarısızlıklarla sonuçlanan çalışmaların analizlerini yapabilmek için çeşitli çözüm yöntemleri ve modeller geliştirilmiştir.

Geliştirilen tekniklerden birisi olan ve sıkıştırılamaz bir akışkanın problemleri için kullanılan ve sıkıştırılamaz bir akışkan için Navier Stokes denklemlerini bir sonlu farklar metodu kullanarak çözmeye yarayan bir nümerik çözümleme tekniği olan SOLA-VOF (Volume of Fluid) tekniği ile serbest akışkan yüzeyi takip edilir. Akışkan ve tank arasındaki non-lineerlik etkisini de göz önüne almak ve hareket eden duvarlardaki karmaşık sınır koşullarını sadeleştirmek için hareketli bir koordinat sistemi kullanılır. Bu koordinat sisteminin orijini uzayda sabit bir aks etrafında dönmektedir. Bu şekilde dönen bir tank hareketi genel olarak modellenemediğinden çalışmamızda problem olarak aldığımız, deprem etkisi altındaki su depolama tankındaki çalkantının yapı üzerindeki etkilerini araştırırken, çalkantıdan kaynaklanan ek yükleri hesaplamada bu nümerik teknik kullanılmıştır.

Kısmen dolu yükseltilmiş su depolama tanklarında deprem yükü altındaki yapı hareketi sırasında sıvıda oluşabilecek olan çalkantının araştırılması için Akışkanın Hacmi metodu kullanılarak yapı üzerindeki etkileri değişen tank geometrisi ve yapı periyodu için takip edilmiştir. Akışkanın homojen, izotrop, viskoz, Newton kanunlarına uyan ve sadece sınırlı sıkışırılığa sahip olduğu kabul edilmiştir. Sonlu farklar yaklaşım metodu ile Navier-Stokes denklemlerini çözen yazılım sayesinde bulunan sonuçlar ile ortaya çıkan sistem üzerindeki ek kuvvetler deprem etkisi için hesaplanan tasarım deprem yükü ile karşılaştırılmış ve geometri ve yapı periyodu ile nasıl değişti araştırılmıştır ve çalkantının etkilerine dikkat çekilmiştir. Yükseltilmiş su depolama tanklarının tasarımında sıvı çalkantısının da etkilerinin göz önüne alınması gerektiği gösterilmiş ve sonuçlar ışığında yapının tasarımında tavsiyelerde bulunulmuştur.

EFFECTS OF WATER SLOSHING ON STRUCTURAL BEHAVIOUR OF AN ELEVATED RECTANGULAR WATER TANK

SUMMARY

Sloshing is defined in Fluid Mechanics as movement of a fluid in an object. Sloshing occurs only when the liquid has a free surface that allows interaction with the container system dynamics. Sloshing, the movement of liquid inside another object could be seen in the fluid container located in a vessel. It could also be seen in the fuel tank of a rocket or a space-craft. Sloshing could also be observed in the water tank (container) of a ground type or elevated type water tank.

Generally speaking, Liquid Sloshing may occur in many structures when there are extra loads on the structure that holds the liquid. Liquid sloshing may be observed when the period of the movement of the object is close enough to the natural period of the fluid inside. When sloshing occurs, additional loads are applied to the object, vehicle or the structure, which jeopardizes the safety and the integrity of the structure it is located in.

Sloshing became a matter of concern for the first time during NASA's rocket launch attempts such as Falcon-1 in 1960's which had failed numerous times. Scientists initially had no idea what had caused the instability and failure of the launch. Before the unfortunate incidents, sloshing and its effects on a rocket structure was not even taken into account. However, the research showed that the fuel in the tank of the rocket had severe and uncalculated effects on the stability of the structure of the rocket, causing failure of several rocket launches. This led to many studies directed by NASA but sloshing did not only affect space rockets. National Aeronautics and Space Administration(NASA) did not only studied liquid slosh in 1960's, it has continued these studies up until today. Most recently, in 2009, NASA performed experiments to understand propellant settling and sloshing.

Similarly, the very same sloshing effects caused damage to numerous elevated water tanks during the earthquakes in Chile and Japan during the 1960's. The extra load on structures due to earthquakes combined with sloshing effects. The damage to the structure meant shortage of water supplies after the disaster, making it harder for people to recover from it. Several studies and researches on sloshing has been done since to prevent the unwanted effects of sloshing loads on structures.

Following the preliminary studies in 1960's; the biggest complication in numeric studies was found to be regarding surface tracking. This was called the Free-Surface Problem. Several methods have been developed from early 60's but none of them really provided an exact solution until the discovery of the Volume of Fluid method. Marker and Cell method. This method; also known as MAC method was the base of Volume of Fluid method studies. Marker and Cell method was improved into VOF

initially by Noh and Woodward in 1976 but it was re-developed later by Hirt and Nichols in 1981. The same year, the VOF method was published internationally for the first time.

The free-surface problem was best modeled with this Volume of Fluid method which is simply a numeric method to track and locate the free surface of the fluid. Volume of Fluid (VOF) method and its derivatives have been successfully used to design and model all kinds of sloshing problems to this time. The advantage of Volume of Fluid method over the MAC method was that it allowed defining a cell with only one value. Cells which had no liquid was given an F function with a value of 0, whereas a cell completely filled with liquid was assigned an F function with a value of 1. On the other hand, cells with a value between 0 and 1 meant free surface.

In this study, Volume of Fluid method was used to track the free surface of the liquid in a partially filled elevated water storage tank which is under seismic loads that causes liquid sloshing. Elevated Water Tanks are perhaps the most common structures that we see in sloshing problems today apart from spacecrafts and rockets. In United States and other countries where water tanks and elevated water tanks are widely used, thousands of elevated water tanks were partially or completely destroyed during earthquakes in history.

As water is one of the most important and vital resources after earthquakes, water tanks are expected and needed to stay intact during the natural disaster. The elevated water tanks which remained intact can prove to be highly valuable to the survivors of the disaster. Elevated water tanks supplied enough water for survivors. Sloshing was one of the main causes of damage to water tanks and it was vital to adjust design regulations accordingly.

Earthquake and its affects on structure was already taken into account, when designing an elevated water tank. However, the affects of sloshing on the structure, mainly the tank, was not anticipated. Maintaining the stability of a structure should involve careful studies to be carried out before construction and sloshing affects should be taken into account.

In this study, sloshing affects on a water tank were studied. One of our goals was to see when sloshing affects can become hazardous. This depended on the water tanks geometry, its fill rate, the properties of the fluid, water tank's height, soil conditions and earthquake properties.

The fluid is assumed to be homogenous, isotropic, viscous, exhibits only limited compressibility and is Newtonian. Structural behaviour is observed, using the developed software that solves Navier-Stokes equations by the use of finite difference approximations. Pressures and forces originating from liquid sloshing are calculated and applied to the supporting system and compared with design seismic loads.

As earthquake is the main cause of sloshing and its unwanted affects on the structure, we chose a location where we have a historical record of past earthquakes. As there

is always the chance of an unexpected earthquake at any location, the elevated water tank structure was subject to the most powerful quake in the location in history.

In order to anticipate and simulate the worst case scenarios involving extreme sloshing loads caused by the earthquake; several cases have been simulated and solved using the VOF (Volume of Fluid) based software. Using our own software, developed with FORTRAN using the principles of SOLA-VOF method, free surface of the fluid has been tracked for each of the cases of the problem. Free surface has been tracked throughout the simulation. Horizontal forces on the structure as well as the wave height caused by sloshing has been calculated and studied.

As an example earthquake in this problem, we decided to pick one of the historically important earthquakes. It was also important to choose an earthquake with public data available to use in this study. Therefore we chose El Centro earthquake. El Centro earthquake happened in Imperial Valley; SouthernCalifornia's Imperial County in 1940. El Centro earthquake has been taken into account in each case of our problem. El Centro earthquake was recorded to have a magnitude of 7.1. We used El Centro earthquake's official vibration data. The data has been analyzed and used as main input to solve the problem and each of its related cases using our VOF (Volume of Fluid) method based software.

In each case, the effects of liquid sloshing caused by the external forces on the stability of the structure (water tank) have been investigated. While the physical properties of the structure and the effects of the earthquake have been kept the same in every case, the height of the fluid has been changed and free surface has been tracked.

For each case, free surface snapshots and wave height graphs have been printed. Maximum horizontal forces have also been calculated and these forces along with free surface snapshots and wave heights have been compared for each case. The study shows that sloshing effects are related to tank geometry and the frequency of the structure. When the frequency of tank motion is closer to the frequency of the liquid, the resonance increases the impact of sloshing.

In the light of this analysis it is being suggested that sloshing effects would better be taken into account in design and construction of elevated water storage tanks. This is a precaution to be taken at design stage to avoid possible damage to the structure during earthquakes and help prevent water supply shortages in case of a natural disaster.

1. GİRİŞ

Sıvı çalkantısı birçok mühendislik probleminde karşımıza çıkabilmektedir. Çalkantı, akışkanlar mekaniğinde bir sıvının bir nesne içerisinde hareketidir. Bu sıvının çalkantı ile sistemin dinamik davranışına etki edebilmesi için serbest yüzeyi olması gerekmektedir. Bir geminin kargo bölümündeki tanktaki sıvı çalkantısı, uzay araçlarının yakıt depolarındaki yakıtın çalkantısı, bir su depolama tankındaki suyun çalkantısı karşımıza en sık çıkan problemlere örneklerdir. Sıvı çalkantısının yaratacağı yüksek basınçlar yapıya veya sıvıyı taşıyan araca güvenliği etkileyecek zararlar verebilir.

Tam doldurulmamış tanklar deprem yükü, rüzgar yükü ve kar yükü altında akışkanın doğal periyodu ile tankın hareket periyodu birbirine yakın olursa çalkantı hareketi başlamaktadır. Akışkan çalkantısının başladığı periyotlarda sistem üzerinde büyük yapısal yükler oluşabilir.(Faltinsen, 1974) Bu tip tam doldurulmamış tanklardaki çalkantının büyüklüğü tankın hareketinin frekansına, akışkanın yüksekliğine, akışkanın özelliklerine ve tankın geometrisine bağlıdır.

Sıvının serbest yüzeyinin davranışında zorlamanın şekli ve zorlamanın frekansı rol oynar. (İbrahim ve diğerleri, 2001). Zorlamalar ani, sinusoidal, periyodik ve rastgele olabilirler. Tank hareketinin periyodu ile tankın doğal periyodu birbirine çok yaklaştığında rezonans meydana gelecektir. Serbest salınımlar altında, serbest sıvı yüzeyi hareketi, viskoz sınır tabakasından oluşan sönümlendirici kuvvetler tarafından bozulmaktadır. (Faltinsen ve Timokha, 2009)

Çalkantının oluşabileceği tankta veya akışkanın bulunduğu araçta, çalkantıdan oluşabilecek zararları önlemek için tankın ve aracın tasarımında, içinde bulunan akışkanın doğal frekanslarını oluşabilecek tüm rezonans durumlarından uzak tutmak önemlidir. 1999 depremindeki sismik hareketlerden etkilenen su depolama tanklarında oluşan zararlar gibi ABD'deki Falcon 1 roketinin ilk üç başarısız fırlatmalarındaki anormallikler de çalkantının sonuçlarıydı.1960'larda özellikle NASA, roketlerin tanklarındaki çalkantı etkileri üzerine çalışmalar yapmıştır.

Yükseltilmiş sıvı depolama tanklarından özellikle içinde su bulunan tanklar bir çok şehir ve yerleşim bölgeleri için büyük önem taşırlar. Büyük depremlerde bu yapıların yıkıcı hasarlar almaması çok önemlidir. Büyük depremler sonrasında oluşabilecek su yetersizliği gibi insan hayatı için risk taşıyan durumlarda içme suyu ve yangın söndürmede kullanılabilir suya ihtiyaç artacaktır. Bu nedenle yapılan bir çok çalışma, yerde bulunan ve yükseltilmiş su depolama tanklarının tasarımı, analizi ve deprem davranışları üzerine odaklanmıştır.

1960 Şili, 1978 Izu Oshima, 1987 Whittier depremlerinde görüldüğü üzere su depolama tankları depremlerde büyük zararlar görmüş, kullanılamaz hale gelmişlerdir. Sonrasında yapılan çalışmalarda ise daha çok yer seviyesinde bulunan tanklar üzerinde çalışmalar yapılmış ancak yükseltilmiş su tanklarında gerekli çalışmalar fazlaca yapılmamıştır.

Eurocode-8: Deprem Dayanıklılığı için Yapı Tasarımının son versiyonunda Silolar, Tanklar ve Boru hatları bölümünde yükseltilmiş su tanklarının deprem dayanımı için tasarımları hakkında bilgilendirmeler verilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, dikdörtgen kesitli bir depolama tankındaki sıvı çalkantısının yapı üzerinde oluşacak etkilerinin tespiti ve bu etkilerin yapısal davranışa ne kadar etki edeceğinin gözlenmesidir. Çalışmada, içinde su bulunan yükseltilmiş tankın hareketi ile oluşacak su çalkantısı modellenmiş ve modellemede VOF-SOLA tekniği ile geliştirilmiş yazılım kullanılmış ve hesaplamalar yapılmıştır. Alınan sonuçlar ile sıvı depolama tankına çalkantının etkilerinin ne kadar etkili olduğu ve yapı güvenliğini ne derecede tehdit ettiği araştırılmış ve örnek problem ve farklı durumları için sonuçlar ortaya konmuştur.

2. TANIMLAR

2.1 alkantı

alkantı, serbest sıvı yüzeyinin, içinde bulunduğu haznede yaptığı herhangi bir hareketi anlamında gelir. Kısmen doldurulmuş haznelerde, tanklarda hareket oluşturabilecek herhangi bir dış kuvvet buna yol açabilir. Hareketin türüne, tankın geometrisine göre serbest sıvı yüzeyi farklı hareketler içine girebilir. Simetrik, asimetrik, kuasi-periyodik, düzensiz atma, rotasyonel, düzlemsel veya düzlemsel olmayan hareketler bunlardan bazılarıdır. İçinde bulunduğu tank ve destek yapısı ile sıvı arasındaki etkileşimler, serbest sıvı yüzeyinde inanılmaz hareketlere neden olabilir.

Sıvı alkantısındaki temel problem oluşacak hidrodinamik basınçların, kuvvetlerin, momentlerin ve serbest sıvı yüzeyinin doğal frekanslarını tahmin edebilmektir.

2.2 Yükseltilmiş Su Tankları ve Yapı Güvenliği

Yükseltilmiş su tankları bir su dağıtım sistemi oluşturabilecek kadar basınç yaratabilmek için gerekli yükseklikte bir taşıyıcı üzerinde inşa edilmiş içme suyu depolarıdır. Her 30 metre yükseklikte 300 kPa kadar bir basınç oluşmaktadır. Bu da çoğu yerel dağıtım sistemlerini besleyebilecek kadar yüksek bir basınçtır. Günümüzdeki en büyük yükseltilmiş su tanklarından biri Oklahoma/ABD'deki Edmond su tankıdır. Bu tank tam 66.49m yüksekliğinde ve 500bin galon su kapasitesindedir.

İçme suyu gibi özellikle doğal afetler veya su sıkıntısı durumlarında insan için çok büyük önem taşıyan bir şeyin depolandığı su tanklarının yapı güvenliği de çok önemlidir. Herhangi bir deprem sırasında yer hareketi nedeniyle yüksek olabilen bu su tanklarındaki yapısal hasarlar önceden tahmin edilmeli ve tank içindeki sudan oluşabilecek olan çalkantı yükleri ve bunun yapı ile etkileşiminde ortaya çıkabilecek basınçlar, kuvvetler, momentler tespit edilmelidir.

Hasar raporlarından alınan bilgilere göre, çalkantıdan kaynaklanan en büyük hasarlar su seviyesinin %10 ve %30 arasında olduğu anlarda olduğunu göstermektedir. Ancak hasarların %95 oranında dolulukta da oluşabildiği görülmüştür.

2.3 Doğal Çalkantı Frekansları ve Rezonans etkileri

Çalkantı, tankın hareketi nedeniyle oluşmaktadır. Tankın hareketi, su hareketine neden olan enerjiyi sağlamaktadır. Çalkantının amplitüdü genel olarak su doluluğu, suyun özellikleri, tank hareketinin frekansı ve amplitüdü ile tank geometrisine bağlıdır. Tankın hareketinin frekansı suyun doğal frekanslarından birine yaklaştığında büyük amplitüde sahip çalkantılar oluşmaktadır.

Belirli bir tank geometrisi için, su derinliğine bağlı olan doğal frekanslar dikdörtgen tanklar için aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilirler

$$\omega_n^2 = g \frac{n\pi}{2a} \tanh \frac{n\pi}{2a} D$$

2a : tank genişliği , D: su derinliği , n: mod numarasıdır.

Sonsuz sayıda doğal frekans bulunmasına rağmen sadece n=1 temel frekansı bizim için önemli olanıdır. Rezonans tam olarak doğal frekans değerinde oluşmaz. Bu değere çok yakın bir değerde oluşur.

Dikdörtgen tanklardaki suyun doğal periyodunun hesabı için aşağıdaki formül kullanılabilir.

$$T_R = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\pi g}{l} \tanh \left(\frac{\pi h}{l} \right)}}$$

Çalkantı yüklerini tank geometrisinin etkilediğinden yukarıda bahsetmiştik. Belirli bir sıvı derinliği / tank genişliği oranı ve salınım frekansı için, çalkantı basıncı genel olarak sıvı ağırlığının ve eksitasyon amplitüdüne bağlıdır.

Çalkantının büyüklüğü ve birlikte gelen dinamik basınç yükleri tank geometrisine, su derinliğine, tank hareketlerinin amplitüd ve tipine bağlıdır. Su derinliği doğal frekansı belirlediği için aynı şekilde rezonansın ve doğal olarak güçlü çalkantıların oluşmasını belirler.

3. METOT VE FORMÜLASYON

3.1 Metot

Su tankı olarak dikdörtgen ve bölmesiz (ayırıcısız) bir tank seçilmiştir. Sıkıştırılamaz bir akışkanın bu tip problemleri için kullanılan nümerik tekniklerden birisi olan SOLA-VOF (Volume of Fluid) tekniği kullanılmıştır. SOLA tekniği, sıkıştırılamaz bir akışkan için Navier Stokes denklemlerini bir sonlu farklar metodu kullanarak çözmeye yarayan bir nümerik çözüm algoritmasıdır.

SOLA-VOF tekniği ile serbest akışkan yüzeyi takip edilir. Akışkan ve tank arasındaki non-lineerlik etkisini de göz önüne almak ve hareket eden duvarlardaki karmaşık sınır koşullarını sadeleştirmek için hareketli bir koordinat sistemi kullanılır. Bu koordinat sisteminin orijini uzayda sabit bir aks etrafında dönmektedir. Bu şekilde dönen bir tank hareketi genel olarak modellenenabilir.

Bu hareketli koordinat sisteminde, belirli kuvvetleri göz önüne almak gerekir. Bunların bazıları merkezkaç kuvveti, Coriolis kuvveti, Euler kuvvetidir. Hareketli koordinat sisteminde hareket eden, sıkıştırılamaz bir viskoz akışkan için gerekli bağıntılar u ve w parçalarının x ve z yönlerindeki hızlarını içeren süreklilik bağıntılarıdır. Aynı şekilde dinamik bağıntılar da gereklidir.

SOLA kodu ile bu denklemleri nümerik olarak çözebilmek için δx genişliğinde ve δy yüksekliğinde dikdörtgen hücrelerden oluşan bir sonlu farklar ağı kullanılır. Akışkan hızları ve basınçların yerleri şu şekildedir: u hızları bir hücrenin dikey olarak kenarının ortasında, w hızı ise yatay olarak kenarının ortasındadır. Navier Stokes denklemlerini yakın olarak hesaplayan fark denklemleri de bundan sonra türetilir.

3.2 Çalkantı Probleminin Formülasyonu

Sıvı çalkantısına neden olabilecek olan tank hareketlerinin bir çok modu, büyüklüğü ve frekansları olabilir. Tankın içinde bulunan sıvı bu hareketlere farklı tepkiler verir ve bu karmaşık tepkileri anlamak oldukça güçtür. Bu analizi yapmadan önce akışkan hareketi ile ilgili “kütlenin korunumu”, “momentumun korunumu” ve sistemin denklemlerini tamamlayacak olan diğer bağıntıları yazmak gerekir. Akışkan homojen, izotropik, viskoz olarak kabul edilir. Tankın ve akışkanın hareketleri de iki boyutludur. Bu çalışmada akışkan, rijit ve dikdörtgen kesitli bir tankın içinde bulunmaktadır.

3.3 Kütlenin Korunumu:

Kontrol hacmi için verilen süreklilik denklemi, kontrol yüzeyinden dışarı doğru akan sıvının debisi, kontrol hacminin içindeki sıvı azalma debisine eşittir.

Bunu matematiksel olarak şu şekilde yazabiliriz:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (2.1.1)$$

Burada ρ akışkan yoğunluğunu gösterir. Sıkıştırılmaz bir sıvıda “ ρ ” sabit olacaktır.

Bu çalışmada düzensiz hareket söz konusudur. Akışın değiştiği anlardaki karakteristik zaman çok küçük olabilir. Bu nedenle sıvının sıkıştırılabilirliği göz ardı edilmeyecektir. Bazı durumlarda akışkanın sıkıştırılabilir olması tercih edilebileceğinden, limitli sıkıştırılabilirlik kavramı tanımlanmıştır.

Sadece adyabatik akışkan değişimleri göz önüne alınmıştır. Bu durumda basıncın, yoğunluğun bir fonksiyonu olduğunu söyleyebiliriz.

$$\frac{dp}{d\rho} = c^2 \quad (2.1.2)$$

Burada c : sesin adyabatik hızıdır.

Yoğunluktaki değişimlerin de küçük olduğu farz edilecektir. Bu sayede sıkıştırılabilirlik etkileri daha kolay şekilde göz önüne alınabilecektir. Kütle denklemini genişletirsek:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.1.3)$$

olacaktır.

3.4 Momentumun Korunumu:

Viskoz akışkanlar için denklemler ilk olarak 1827’de Navier ve 1831’de Poisson tarafından bulundu. St Venant ve Stokes ise 1895’de bu denklemler üzerine çalışmaları sürdürmüşlerdi. Momentumun korunması için, akışkanın birim hacim başına lineer momentumundaki değişim hızının, akışkan üzerine etkiyen kuvvetler tarafından dengelenmesi gerekir.

Bunu vektörel notasyonda yazarsak;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \vec{V} \cdot \nabla (\rho \vec{V}) = -\nabla p + \vec{B} + \vartheta \nabla^2 (\rho \vec{V}) \quad (2.2.1)$$

Bu denklemde p basıncı gösterirken, B ise akışkan üzerindeki kuvvetleri temsil eder. Bu denklem Navier Stokes denklemlerinin az sıkıştırılabilir biçimidir. Navier Stokes denklemlerini çözmek zor olduğundan viskoz akışkan hareketlerinin teorik çözümü sınırlı kalmıştır ve yaklaşım yöntemleri veya nümerik ortalamalar kullanılmıştır.

3.5 Katı Cisim Sınır Koşulları

Viskoz akışkanlar için duvar veya eğer bölmeler varsa bölmelerde bağıl hızın normal ve teğet bileşenleri sıfırlanmalıdır.

$$V_n = 0, \quad V_t = 0$$

3.6 Serbest Yüzey Sınır Koşulları

Serbest yüzeyin lokasyonu önceden bilinemeyeceği için sınır koşullarını uygularken sorun çıkmaktadır. Momentumun korunabilmesi için serbest yüzey sınır koşulları doğru yere uygulanmalıdır. Aksi takdirde yanlış sonuçlar alınacaktır.

Serbest yüzey sınır koşullarını belirlemek için:

- Yüzeydeki gerilme teğeti sıfırlanmalıdır.
- Yüzeye dik olan gerilme bileşeni de dışardan uygulanan gerilmenin normal bileşenini dengelemelidir.

Yüzeyde bir gerilme yoksa, serbest yüzey atmosfer basıncı etkisi altındadır. Serbest yüzeye normal olan kuvvetlerin bileşkesi atmosfer basıncı ile dengelenmelidir.

$$P = P_{ATM} + 2\vartheta \left\{ n_x m_x \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + n_x m_y \left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} \right] + n_y m_y \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} \right\} = 0 \quad (2.3.1)$$

Bu denklemde

n_x, m_x = birim vektör normalinin ve teğetinin x bileşenleri,

n_y, m_y = birim vektör normalinin ve teğetinin y bileşenleri,

u = akışkan hızının yatay bileşeni

v = akışkan hızının dikey bileşeni

3.7 Hareketli Koordinat Sistemi

Tankın hareketi büyük olduğunda iki çeşit non lineerlik ortaya çıkacaktır. Bunlardan birincisi serbest yüzeyde büyük akışkan hareketi nedeniyle oluşur, diğeri ise tank ve akışkan kesişiminde olacaktır. Karmaşık sınır koşullarını engellemek ve non-lineerliği hesaba katmak için hareket eden bir koordinat sistemi kullanılır. Bu koordinat sisteminin orijini olarak tankın orta yüzeyinin içinde ve sarsıntısız serbest yüzeydedir. Şekil 2.1’de bu koordinat sistemi gösterilmiştir.

Hareket eden koordinat sistemlerinde kayma yükü, Euler yükü, Coriolis yükü ve merkezkaç kuvveti hesaba katılmak zorundadır.

$$F_x = -g \sin\theta - \ddot{\theta}y + \dot{\theta}^2 x - d(\ddot{\theta} \sin\gamma - \dot{\theta}^2 \cos\gamma) - \dot{U}_x - 2\dot{\theta}\dot{\vartheta} \quad (2.4.1a)$$

$$F_y = g \cos\theta + \ddot{\theta}x + \dot{\theta}^2 y + d(\ddot{\theta} \cos\gamma + \dot{\theta}^2 \sin\gamma) - \dot{U}_y + 2\dot{\theta}\dot{u} \quad (2.4.1b)$$

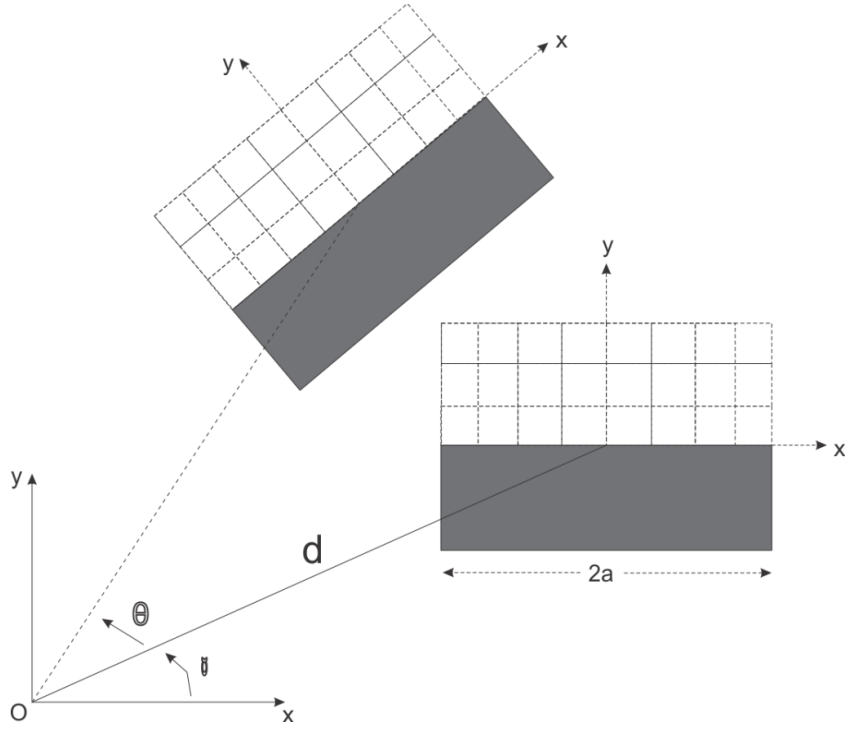
Burada

θ : dönüş açısı

g: yerçekimi ivmesi

d: hareket eden koordinat sisteminin orijini ile dönüşün eksenini arasındaki mesafe

Denklemin sağ tarafındaki terimler yerçekimi kuvveti, Coriolis kuvveti, Euler kuvveti ve merkezkaç kuvvetini içerirler. $\theta:90$ iken, tank z ekseninde sabit bir nokta etrafında dönüyordur.



Şekil 2.1 : Hareket eden koordinat sistemi.

3.8 Nümerik Metotlar

Çalkantı bir serbest yüzey fenomenidir. Rijit bir tank tamamen sıvı ile dolu olduğunda, hareket bir rijit cisim hareketine döner. Tank kısmen dolu olduğunda ise bir serbest yüzey mevcuttur ve tankın herhangi bir rijit hareketi akışkanda “çalkantı” oluşturacaktır. Bir sonlu farklar metodu ile bu akışkan çalkantısı simüle edilecektir.

Akışkanlar dinamiğinde yapılan ilk çalışmalarda dalga fonksiyonu-girdap yaklaşımı ön plandaydı. Ancak bu yaklaşımda serbest yüzeyde sınır koşullarını formüle etmek zordu. Bu nedenle bu tip serbest yüzey problemlerinde birincil değişken sistemi (u,v,w,p) kullanılmaya başlanmış ve başarılı olunmuştur.

Geliştirilen metotlar 1960’larda MAC metodu ile başlamış sonrasında VOF ve SOLA metotları geliştirilmiştir. (Bakınız Bölüm 4.1)

3.9 SOLA Basit Çözüm Algoritması

3.9.1 Hareket denklemi

Akışkan hareketi denklemleri, bahsettiğimiz gibi kütle ve momentumun korunumunu gerektirir. Sınırlı sıkıştırılabilirlik seçeneğini de göz önüne alarak, süreklilik denklemi aşağıdaki şekle gelir:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.9.1)$$

Burada tüm değişkenler tank-sabitli koordinat sisteminde tanımlanmışlardır.

Bu değiştirilmiş momentum denklemleri ile dönen bir tanktaki iki boyutlu akışın denklemleri elde edilir:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} = -g \sin \theta - 2\dot{\theta}v - \ddot{\theta}(y + d \sin \gamma) \quad (3.9.2a)$$

$$-\dot{U}_x + \theta^2(x + d \cos \gamma) + v(\nabla^2 u)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} = g \cos \theta + 2\dot{\theta}u + \ddot{\theta}(x + d \cos \gamma) \quad (3.9.2b)$$

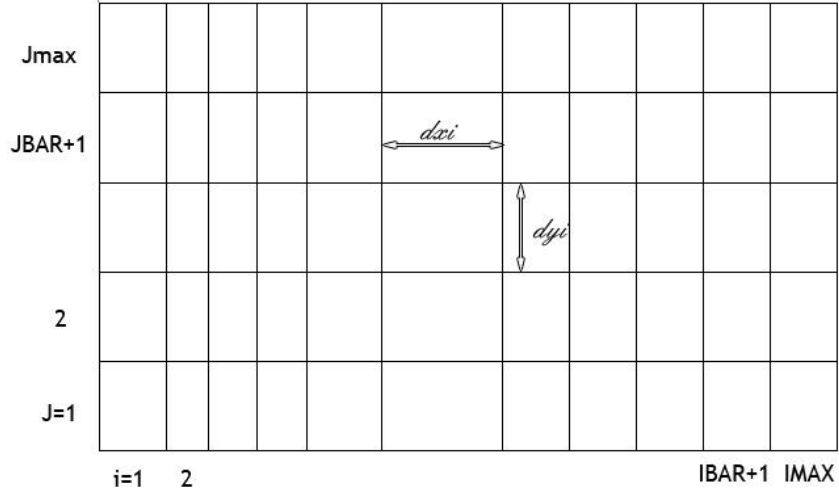
$$-\dot{U}_y + \theta^2(y + d \sin \gamma) + u(\nabla^2 v)$$

3.9.2 Sonlu farklar metodu ile hareket denklemleri

Euler ızgarasında dikdörtgen hücrelerden oluşan uniform olmayan bir ağ kullanılarak hesaplama yapılır. Ağ bölgesinde sıvı içeren bölümler x eksenini boyunca IBAR hücrelerinden oluşmaktadır. Bunları i indeksi ile gösterirken y eksenini boyunca olan JBAR hücrelerini de j indeksi ile gösteririz. Sıvı bölgesinin etrafını fiktif hücrelerle çeviririz.

Tek katman halindeki bu hücreler ile ağıdaki toplam hücre sayısı $IMAX = IBAR + 2$ ve $JMAX = JBAR + 2$ olacaktır. (Şekil 2.6.1)

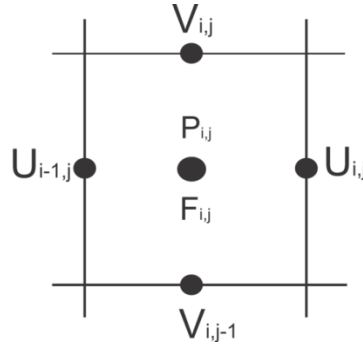
Bu fiktif hücreler sınır koşullarını belirlemek için kullanılır ki iç bölgede kullanılan fark denklemleri sınırlarda da kullanabilirler.



Şekil 3.9.1 : Genel Ağ düzeni.

Şekil 2.6.2’de akışkanın hız ve basınçları gösterilen hücre noktalarındadır. U ; Bir hücrenin dikey kenarlarının ortasındaki hızı gösterirken, V ; bir hücrenin yatay kenarlarının ortasındaki hızı gösterir.

Burada yapılan; ızgaranın kullanımı sayesinde hareket denklemlerinin kolaylıkla süreksizleştirilmesidir. Öte yandan, süreklilik denklemleri hücre merkezlidir ve her hücreyi yerel kontrol hacmi yapmaktadır. Şekil 3.9.2’de bir hücre gösterilmiştir. Bu hücredeki sonlu farklar değişkenleri hücrenin dört duvarında ve tam ortasında şekilde olduğu gibi gösterilmiştir. Burada X ve Y için momentum denklemleri yazılacaktır. Aşağıda bu momentum denklemlerini elde etmek için gerekli hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 3.9.2 : Bir hücredeki sonlu farklar değişkenlerinin düzeni.

X Momentum denklemini sağ hücre yüzünde, Y Momentum denklemini de ortalamak kolaylık sağlamaktadır. Çünkü basınç gradyanları ve diğer momentum terimleri hücre duvarlarında ortalananabilirler. Değişken ağ nedeniyle bazı fark yaklaşımlarını yapmak zor olacaktır.

Bu çalışmamızda, hücre lokasyonları için alt indis, zaman seviyesi için ise üst indisler kullanılmıştır.

$t = n\Delta t$ denkleminde Δt ortalama zaman arttırımıdır. Aşağıda tüm fark denklemleri verilmiştir. Bir (i,j) hücresi için süreklilik denklemini ifade eden fark yaklaşımı aşağıdaki gibidir:

$$\frac{1}{\Delta x_i} (U_{i,j}^{n+1} - U_{i-1,j}^{n+1}) + \frac{1}{\Delta y_j} (V_{i,j}^{n+1} - V_{i,j-1}^{n+1}) + \frac{1}{c^2 \Delta t} (P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n) = 0 \quad (3.9.3)$$

Navier-Stokes denklemlerini yaklaşık hesaplayan fark denklemleri de şöyledir:

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n + \Delta t \left\{ \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i+1,j}^{n+1}}{\Delta x_{i+\frac{1}{2}}} + B_x - FUX - FUY + VISX \right\} \quad (3.9.4)$$

$$V_{i,j}^{n+1} = V_{i,j}^n + \Delta t \left\{ \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j+1}^{n+1}}{\Delta y_{j+\frac{1}{2}}} + B_y - FVX - FVY + VISY \right\} \quad (3.9.5)$$

Burada;

$$\Delta x_{i+\frac{1}{2}} = (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})/2 \text{ ve} \quad (3.9.6)$$

$$\Delta y_{j+\frac{1}{2}} = (\Delta y_j + \Delta y_{j+1})/2 \quad (3.9.7)$$

Konvektif ve viskoz akıntılar ise şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned}
 \text{FUX} = & \frac{U_{i,j}^n \left\{ \frac{\partial X_{i+1}}{\partial X_i} (U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n) + \frac{\partial X_i}{\partial X_{i+1}} (U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n) \right\}}{\partial X_i + \partial X_{i+1} + \alpha \frac{|U_{i,j}^n|}{U_{i,j}^n} (\partial X_{i+1} - \partial X_i)} + \\
 & \frac{\alpha |U_{i,j}^n| \left\{ \frac{\partial X_{i+1}}{\partial X_i} (U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n) - \frac{\partial X_i}{\partial X_{i+1}} (U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n) \right\}}{\partial X_i + \partial X_{i+1} + \alpha \frac{|U_{i,j}^n|}{U_{i,j}^n} (\partial X_{i+1} - \partial X_i)} \quad (3.9.8)
 \end{aligned}$$

Basınç hariç tüm viskoz terimler n’den zamanında hesaplanmaktadır. α parametresi ağırlık çarpanıdır. Eğer bu çarpan “0” ise advectif terimler ortalanmış farklar haline gelirler ve bu büyük bir viskozite yokluğunda kararsızdır. Eğer α parametresi “1” ise bu durumda advectif terimler verici hücre (yukarı hücre) farkı alınarak hesaplanır. Buradaki yukarı fark ve ortalanmış farklar hatalarda bir tür dengeleme yaratırlar ve kararlı bir algoritma oluştururlar.

Genel olarak α , maksimum dikey veya yatay Courant sayısından %20-50 daha büyüktür. Bu çalışmada $\alpha = 0.4-0.5$ olarak alınmaktadır.

Denklemler 3.9.4 ve 3.9.5’den elde edilen hızlar süreklilik denklemini sağlamalıdır. Bu denklemi sağlamaları için, her akışkan ile dolu hesaplama hücresinde ayarlanmaktadır. Bu denklemdaki hızlar, n+1 seviyesi basınçlarına dayanan yeni zaman seviyesinde hesaplandığı için yeni basınçlar için bu denklem kesin bağıntıdır.

Ayarlama şu şekilde devam eder. Eğer bir hücrenin sol tarafı , S , negatif ise yani hücre içine bir net debiye karşı ise, içe akışı engellemek için hücre basıncı artırılır. Aynı şekilde eğer dışarı doğru bir debi varsa da bu sefer hücre basıncı azaltılır. Her hücre için bir basınç değişkeni olduğundan, her hücre için diverjans iteratif bir şekilde yapılmalıdır. Ancak bir hücre ayarlandığında diğer komşu hücreler de etkilenmektedirler. SOLA’daki bu iterasyon, soldan sağa doğru ağdaki satırları en aşağıdan başlayarak süpürmektir. Her hücre için S, son hız değerleri ve en güncel p değerleri kullanılarak hesaplanır. S’nin sıfıra yaklaşmasını sağlayacak olan “p” basınç değişimi

$$\partial p = - \frac{S}{\frac{\partial S}{\partial p}} \quad (3.9.9)$$

olarak gösterilir.

Hücre için yeniden hesaplanan hücre basıncı

$p_{i,j} + \partial p$ olacaktır.

Hücrelerin kenarlarındaki yeni hız tahminleri ise:

$$u_{i,j} + \partial t \frac{\partial p}{\partial x_{i+\frac{1}{2}}} \quad (3.9.10)$$

$$u_{i-1,j} - \partial t \frac{\partial p}{\partial x_{i-\frac{1}{2}}} \quad v_{i,j} + \partial t \frac{\partial p}{\partial y_{j+\frac{1}{2}}} \quad v_{i,j-1} - \partial t \frac{\partial p}{\partial y_{j-\frac{1}{2}}} \quad (3.9.11)$$

olacaktır.

Burada belirtilen hızlar, en güncel hız değerleridir.

İterasyonun yakınsaması, tüm dolu hücreler bir ξ sabit değerinden küçük S değerine sahip olduklarında tamamlanmış olmaktadır. Burada ξ istenen isabet seviyesi için seçilmektedir.

3.9.3 Hesaplama işlemleri

Diğer akışkanlar dinamiği hesaplama metotlarında olduğu gibi, SOLA-VOF metodunda da bir zaman deviri (çevrimi) veya görüş açısı tekniği kullanılır.

Bunun anlamı, hesaplamaların küçük ve sonlu bir δt zaman artırımını için akışkan konfigürasyonunun belirli bir zaman deviri için ilerletilmesi ile yapılmasıdır.

Bir devirin sonucu bir sonraki devirin başlangıç koşulları olarak alınır. Araştırmacının istediği kadar devir boyunca bu işlem tekrarlanır.

Her zaman basamağında SOLA algoritması iki önemli adıma sahiptir:

Momentum denklemlerinden elde edilen hız alanı için yaklaşımlar advectif, basınç, viskoz ve Coriolis terimleri için eski zaman seviyesi değerlerini kullanırken, diğer kuvvetler için orta zaman değerlerini kullanırlar. Basınç tam olarak hesaplandığından, yeni hız değerlerine katılımı iki parça olarak yapılır. X-Momentum örneği için gösterirsek:

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^* + \partial t \left\{ \frac{p_{i,j}^{n+1} - p_{i+1,j}^{n+1}}{\partial x_{i+\frac{1}{2}}} \right\} \quad (3.9.12)$$

Buradaki $U_{i,j}^*$ viskoz, advectif ve kuvvetlerin güncellenmiş momentum alanına katkılarıdır. Yeni basınç gradyanları da iki parça halinde verilebilir:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + \delta P_{i,j}$$

Bunu yukarıdaki denklemde yerine koyarsak süperpozisyon için nasıl kullanıldığını görebiliriz:

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^* + \partial t \left\{ \frac{P_{i,j}^n + \delta P_{i+1,j}}{\partial X_{i+\frac{1}{2}}} \right\} + \partial t \left\{ \frac{\delta P_{i,j} - \delta P_{i+1,j}}{\partial X_{i+\frac{1}{2}}} \right\} \quad (3.9.13)$$

Programda U^* ve eski basınç gradyanları U-TILDE adı verilen bir parametre içine aktarılır.

$$U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^* + \partial t \left\{ \frac{\delta P_{i,j} - \delta P_{i+1,j}}{\partial X_{i+\frac{1}{2}}} \right\} \quad (3.9.14)$$

Böylece yeni hızların iki bileşeni olduğu görülmüştür. Birincisi TILDE içinde katılırken, diğeri de ikinci bölümde hız alanına eklenmektedir. İkinci adımda, her hücre için δp hesaplanır ve eski basınca eklenir. Bu basınç her hücrede hız diverjansını sıfıra götürmekle bulunur. Bu adımda, süreklilik denklemi sağlanmış olur, yeni basınç alanı hesaplanır ve hız alanına ek basınç katkıları da eklenmiş olur. Bitişik hücreler çiftler olduğundan bir iterasyon gerekmektedir. Bu adım bittiğinde yeni hız ve basınç alanı bilinmiş olur. İşte bu iki adımın tekrarlanması ve alt adımların da yürütülmesi ile istenen aralık için bir çözüm elde edilir. Her adımda tabii ki sınırlardaki sınır koşulları sağlanmaktadır.

3.9.4 Serbest yüzey problemi

Önce belirttiğimiz gibi zamana bağlı bir fonksiyon olarak serbest yüzeyin yeri bilinmemektedir. Bu durumda serbest sınırların nümerik olarak tanımlanmasında üç adet sorun çıkmaktadır. Ayrı olarak gösterilmeleri, zamana bağlı ve sınır koşullarına bağlı olarak değişimleri. Bunları çözmek için çok iyi bir yöntem olan VOF (volume of fluid – akışkanın hacmi) metodu Hirt ve Nichols tarafından geliştirilmiştir. Hesaplama hücrelerinden oluşan bir matris içinde süreksiz bir yüzey oturtabilmek için gereken işlemler sırasında, sınırın şekli ve yerini nümerik olarak belirtebilmenin yolu bulunmalıdır.

VOF metodunda, dolu hücrelerde “1”, boş hücrelerde ise “0” değerine sahip bir “F” fonksiyonu tanımlanır. F fonksiyonunun bir hücredeki ortalaması hücrenin doluluk oranını vermektedir. Birim değer tam doluluğa işaret ederken, sıfır değeri ise hiç sıvı

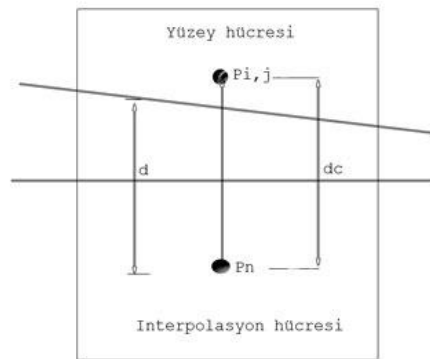
olmadığını gösterir. 0 ile 1 arasında değerlere sahip hücreler ise serbest yüzeye sahiptirler. MAC metoduna göre VOF metodunun en büyük avantajı da budur. Her hücre için sadece bir değere ihtiyaç duymaktadır. Tüm diğer değişkenler için de bu istikrarlı bir şekilde geçerlidir. Sınır normal olan yön, F'nin en hızlı değiştiği yöndedir. F bir basamak fonksiyon olduğundan, türevleri de özel bir şekilde alınmalıdır. Doğru şekilde hesap yapıldığında, türevler, sınır normalini belirlemek için kullanılabilirler.

Son olarak, hem normal yön hem de sınırdaki bir hücredeki F değeri bilinmektedir. Burada bir çizgi çekilerek ara yüzü yaklaşık olarak belirleyebiliriz. Bu sınır yeri bundan sonra sınır koşullarını belirtmek için kullanılabilir. Yüzeydeki zamanla değişim için algoritma sağlandıktan sonra da çevreleyen hesaplama ağı için yüzey sınır koşullarını düzenlemek gerekir. Yüzey hücre basıncı " $P_{i,j}$ ", yüzeyde istenen basınç P_s ve akışkan içindeki basınç P_n arasında yapılacak bir lineer interpolasyon ile elde edilen değer verilerek sınır koşulu sağlanır. İnterpolasyonda kullanılan bitişik hücrenin ortasını yüzey hücresinin ortasına bağlayan çizgi serbest yüzeyin normaline çok yakın olmalıdır. Bu sonucu veren S fonksiyonu:

$$S = (1 - \eta)P_n + \eta P_s - P_{i,j} \quad (3.9.17)$$

olarak verilir.

Burada $\eta = d_c/d$ yani hücre ortalarının arasındaki mesafenin interpolasyon hücresi ile yüzey arasındaki mesafenin birbirine oranıdır. (Şekil 3.9.1)



Şekil 3.9.1: Serbest yüzey sınır koşulu.

Tam iterasyon akışkanla dolu tüm hücrelerde basınç ve hızların ayarlanmasıdır. VOF metodu ile birleşme yüzeylerindeki tüm mantıksal problemler önlenir.

4.YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

4.1 Çalkantı

Basınç ve hızı asıl değişkenler olarak kullanan ilk metot Marker & Cell metodudur. Kısaca MAC olarak anılan bu metod, Los Alamos Bilimsel Laboratuvarı tarafından 1965'te geliştirilmiştir. [HarlowandWelch, 1965].

MAC Grid metodu uzayı genişliği "h" olan küp hücelere ayırır. Her hücre ortasında tanımlanmış bir "p" basıncı etkisi altındadır. Ayrıca $U = U_x, U_y, U_z$ hızına sahiptir. Bu hız bileşenleri hücrenin üç yüzünde tanımlanmıştır.

1970'lerde Hirt bu konuda çalışmaları sürdürmüş ve SOLA isminde MAC metodunun geliştirilmiş bir hali olan yeni bir metodu hazırlamıştır. Bu basitleştirilmiş metotta da serbest yüzeyler tek bir değişken olan h (yükseklik) ile belirlenmiştir. Bu metod eğer serbest yüzey hareketi lineer olması durumlarında çok işe yaramıştır ancak deneylerden çıkan sonuçlara göre en küçük hareketlenmelerde bile akışkan hareketi oldukça non-lineer bir yapıya sahiptir ve yüzey eğimleri sonsuza yaklaşmaktadır.

SOLA metodunu Hirt ve Nichols, Los Alamos Laboratuvarındaki çalışmaları ile 1980'lerde geliştirmeye devam etmişlerdir ve VOF (Volume of Fluid) olarak adlandırılan metodu bulmuşlardır. Bu metotta akışkan bölgeleri takip edilir ve yüzeyler takip edilmez. Bu metod akışkanın hacmi olarak tanımlanan bir F fonksiyonu üzerine dayanmaktadır ve bunun değeri akışkan olan her noktada birim ve akışkan olmayan noktalarda da sıfırdır. F'nin birim değerleri akışkan ile dolu bir hücreyi temsil ederken, sıfır olan değerleri de boş hücreleri tanımlamaktadır. Yüzey lokasyonları, eğimler ve eğrisellikler bu metod ile kolayca hesaplanmaktadır. Ancak F bir merdiven fonksiyonu olduğundan özel algoritmalar kullanmak gereklidir.

MAC Grid metodunun en büyük dezavantajı U hızının ızgara dışında tanımlanmamış olmasıdır. Bu durumdan kurtulabilmek için dinamik bir ızgara kullanılır. Izgara hücreleri gerektiğinde yaratılır ve kullanılmadıkları durumda da silinirler. Bu hücreler bir tabloda saklanırlar ve hücre koordinatları ile belirtilirler.

1996'da Worley, 2004'de Steele tarafından bu tablo formüle edilmiştir ve $hash = 541x + 79y + 31z$ formülü ile özetlenir.

4.2 Deprem Etkisi Altındaki Yükseltilmiş Sıvı Tanklarında Sıvı Ve Yapı

Etkileşimi

Su veya diğer sıvılar ile kimyasalları taşıyan deprem yükü etkisindeki tanklardaki sıvının yapı ile olan etkileşimi 1950'lerden bu yana çeşitli yöntemler ile araştırılmıştır.

1957'de Housner bir analitik metot ile tankın duvarındaki su basıncını hesaplamış ve sonrasında ise bu su basıncını bir kütle-yay modeli ile değiştirmiştir.

1979'da ise Fisher duvar fleksibilitesini göz önüne alarak, yüzey çalkantısını göz ardı edip hidrodinamik basınç denklemini çözmüştür.

1981'de Haroun duvarın fleksibilitesinin aslında su yüzeyinin çalkantısına bir etkisi olmadığını göstermiştir.

1985'de çalışmalarına devam eden Haroun ve Ellaithy[], çalkantı için daha gelişmiş bir kütle-yay metodu geliştirmiştir Haroun bu çalışmasında problemi, yapının fleksibilitesi ve kütlesini de göz önüne almamızı sağlayan ek bir kütle ve yayın eklenmesi ile modellemiştir.

Haroun ve Termaz 1992'de yaptıkları çalışmada zemin ve yapı arasındaki etkileşimleri göz önüne almışlardır ancak çalkantı etkilerini göz ardı etmişlerdir.

2001'de Akyıldız ve Çelebi, rijit dikdörtgen tanklardaki sıvının etkilerini nümerik yöntemlerle hesaplamışlardır.

2005'de Dogangun ve Livaoglu sıvı-yapı ve yapı-zemin etkilerini yükseltilmiş tanklar için karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır.

5. ÇALKANTI İÇİN NÜMERİK METODLAR:

Sıvı çalkantısının bir serbest yüzey hadisesi olduğundan bahsetmiştik. Rijit bir tank bir sıvı ile kısmen doldurulmuş ise burada serbest yüzey bulunmaktadır. Tankın herhangi bir rijit hareketi bu yüzeyde çalkantı oluşturacaktır. Sonlu farklar metodu ile bu çalkantının modellenmesi hedeflenmektedir.

5.1 Çalkantı İçin Hesaplama İşlemleri

SOLA-VOF tekniğini kullanarak zaman devreleri halinde hesaplama yapılır. Bir devrenin sonunda bulunan sonuçlar diğer devrenin başlangıç koşulları olur ve hesaplamayı yapan kişinin istediği sayıda devre çalıştırılarak hesaplama tamamlanır.

SOLA'da her basamakta kullanılan iki ana adım bulunur:

- 1) Basınç kesin olarak hesaplandığından, yeni hızlara olan etkiler iki parça olarak eklenir.

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + \partial P_{i,j} \quad (5.1.1)$$

U-TILDE adı verilen parametre ile U^* ve eski basınç gradyanları bir araya getirilir.

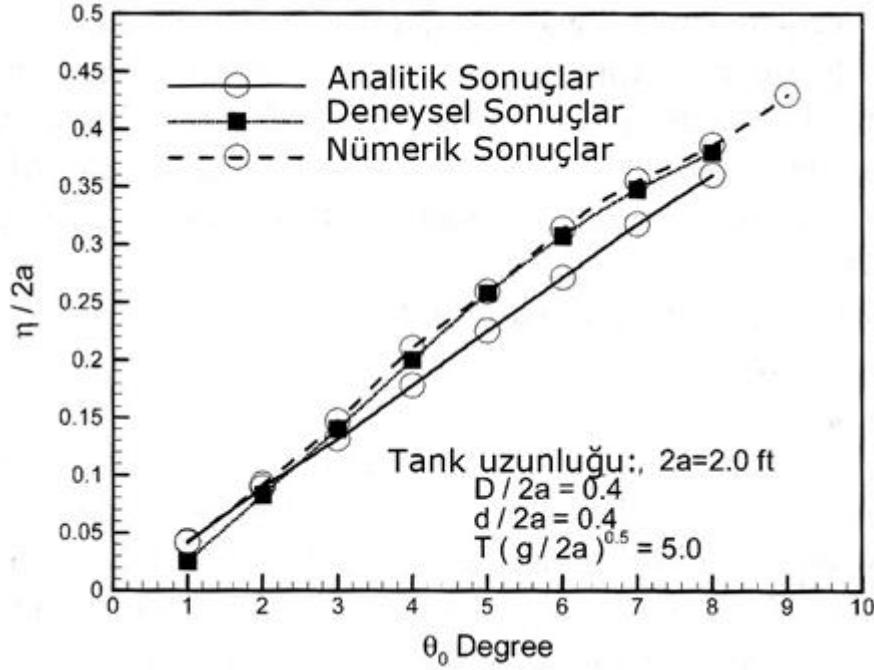
$$U_{i,j}^{n+1} = \tilde{U}_{i,j} + \frac{\delta t}{\delta x_{i+\frac{1}{2}}} (\delta p_{i,j} - \delta p_{i+1,j}) \quad (5.1.2)$$

- 2) İkinci adımda bulunan değerler birinci adımda TILDE hesabı ile bulunan sonuca eklenecektir.

Bu adımda basınç değişimleri her hücre için hesaplanır ve önceki basınca eklenir. Bu işlem her hücrede hız diverjansının sıfıra yaklaştırılması ile yapılmaktadır. Bu adımda süreklilik koşulu da sağlanmış olur. Yeni basınç alanı hesaplanır ve hız alanına ek basınç eklenir. Yan yana olan hücrelerde iterasyon yapılması gerekir. Bu adım tamamlandıktan sonra yeni basınç ve hız alanı bulunmuş olur.

Bu adımları tekrarlayarak istenen zaman aralığı için sonuçlar bulunacaktır. Her adımda sınır koşulları gerektiği gibi uygulanmalıdır.

Yazdığımız program VOF metoduna dayanarak bize gerekli sonuçları vermektedir.



Şekil 5.1: VOF metodu ile elde edilen sonuçları ile diğer sonuçların kıyaslanması.
(Akyıldız, H., Çelebi, M.S, 2001)

5.2 Çalkantı Hesabında Nümerik Kararlılık Ve Nümerik Doğruluk:

Kararsız sonuçları olabilecek olan fizik problemlerinde nümerik hesaplamalar sırasında kararsızlık durumu oluşabilir. Kararsız sonuçları olan problemde veya hesaplanan sonuçlarda zamandaki artışa göre büyük değişimler varsa sonuçların doğruluğuna fazla güvenilemez. Bu tip nümerik kararsızlıkları engelleyebilmek için bazı sınırlamalar getirilir.

Problemimizde bu sınırlamaları aşağıdaki öğelerde gözlemliyoruz:

- Ağdaki x ve y eksenlerindeki artışları
- Zaman artışı
- Ve yukarı fark parametresi

Doğruluk için ağdaki artışlar mümkün olduğunca küçük olmalıdır.

Toplam hücre sayısını belirlerken Hirt & Cook bağıntısı kullanılabilir;

$$N^2 > \frac{VL}{v} \quad (5.2.1)$$

Ağ belirlendikten sonra zaman artışı belirlenirken iki sınırlama yapılır. Birincisi, malzeme bir adımda bir hücreden daha fazlasından geçiş yapamaz. İkincisi ise; kinematik viskozitenin sıfır olmayan bir değerinde momentum bir adımda birden fazla hücrede dağılmamalıdır.

Son parametre olarak da " α " parametresi için aşağıdaki formüle göre seçim yapılır.

$$1 \geq \alpha \geq \text{MAX} \left\{ \left| \frac{U_{i,j} \delta t}{\delta x_{i+\frac{1}{2}}} \right|, \left| \frac{V_{i,j} \delta t}{\delta y_{j+\frac{1}{2}}} \right| \right\} \quad (5.2.2)$$

Programımızda 15 tane alt program bulunmaktadır ve 15 alt program hesaplamaları yapmaktadır.

Alt programlardan KUVVET alt programı ile tankın duvarlarındaki hidrodinamik kuvvetler ve momentler hesaplanır. Bu hesaplanan momentler yapının stabilitesine etki ederler. Bu çalışmada tasarımı yapılan su tankının yapısının tasarımında bu hesaplanan momentlerin yapı davranışına etkisi araştırılmıştır.

5.3 Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı

Depremlerde yapıya zaman bağlı olarak değişen yükler etkir. Aynı şekilde yapıda bu yüklere karşı gelen zamana bağlı değişen iç yükler oluşmaktadır. Yapı tasarımında depremin vereceği hasarların sınırlanması hedeflenir. Bu hasarları sınırlayabilmek için oluşabilecek depremleri öngörebilmek lazımdır. Bunu öngörmek olası olmadığından hazırlanan yönetmelikler ile bu sınırlamalar belirlenmiştir. Yönetmeliklerde yapılan kabuller ile sınırların hangi depremlerde ortaya çıkacağı da tanımlanmıştır.

2007’de yayınlanan **Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik** ile bu durum aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Bu Yönetmeliğe göre yeni yapılacak binaların depreme dayanıklı tasarımının ana ilkesi; hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlanmasıdır.

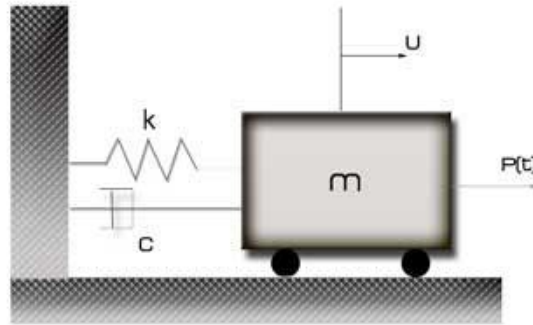
Buradaki sınır belirlenirken, tasarım deprem yükünü aşan bir depremin oluşma olasılığı 50 senede %10 olarak kabul edilmektedir.

Bu sınırlamalar ve kabuller ile depreme dayanıklı olacak bir yapının gerekli dayanım, rijitlik ve sünekliliğe sahip olması beklenir. Yönetmelikte belirlenen kurallar ile bu gerekliliklerin yerine getirilmesi amaçlanmıştır.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik ile “yükseltilmiş su depolama tankları” için spesifik kurallar da tanımlanmış ve bu tipteki yapılar için deprem yükü hesabında izlenmesi gereken kurallar ortaya koyulmuştur.

5.4 Deprem Yükü Hesabı

Deprem yüklerinin hesabında spektrum ve elastik deprem yükü kavramları tanımlanmalıdır. Binalara etkiyen deprem yüklerinin belirlenmesi için Spektral İvme Katsayısı ve Deprem Yükü Azaltma Katsayısı esas alınmaktadır.



Şekil 5.4.1 : $P(t)$ yükü etkisindeki sistem.

Yukarıdaki Şekil 4.4.1’de gösterildiği gibi bir $P(t)$ yükünün etkidiği yapı sisteminin 4.4.1 hareket denklemini yazılırsa:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = P(t) \quad (5.4.1)$$

m : yapının kütlesi

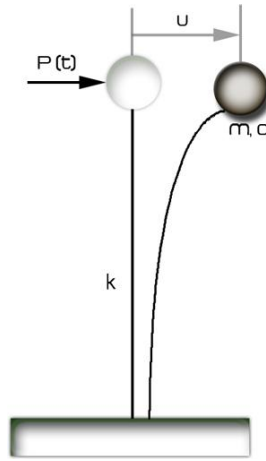
c : sönüm katsayısı

k : yapının rijitliği

$P(t)$ kuvvetine, bu kuvvete ters yönde üç kuvvet karşı gelmektedir. Bunlardan $m\ddot{u}(t)$

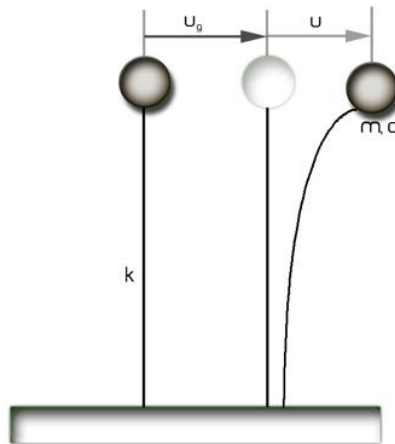
Eylemsizlik kuvveti olarak bilinir ve ivmeyle orantılıdır. $c\dot{u}(t)$ sönüm kuvvetidir. Bu sönüm kuvveti ise hız ile orantılıdır. Son olarak üçüncü kuvvet olan $ku(t)$ yapının yer değiştirmesi ile orantılıdır ve yapıdaki iç kuvvetleri ifade eder.

Sistemimizi tek serbestlik dereceli yapı sistemi olarak aşağıdaki şekilde olduğu gibi gösterebiliriz.



Şekil 5.4.2 : Yapının konsol çubuk olarak gösterimi.

Şekildeki sistemde kütlenin tepe noktasında toplandığını varsayalım. Konsol çubuk gibi hareket ettiği ifade edilen sistemde m kütlesi ile karşılaştırıldığında çubuğun kütlesi çok küçüktür ve ihmal edilebilir. Problemimizde dış yük olarak deprem yükü olduğuna göre, sistemin yer hareketi etkisinde nasıl davranacağına bakalım.



Şekil 5.4.3 : Deprem etkisindeki yapının konsol çubuk olarak gösterimi.

Hareket denklemimizi, yer hareketine göre düzenlersek;

$$m[\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)] + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (5.4.2)$$

şeklinde olacaktır. Burada yer hareketinden dolayı oluşan toplam yer değiştirme, sistemin yer değiştirmesi ile yerin yer değiştirmesinin toplamıdır. Eylemsizlik kuvvetinin de kütle ile toplam ivmenin çarpımına eşit olacağı aşıkardır.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (5.4.3)$$

Bu denklem yer hareketi etkisindeki tek serbestlik dereceli sistemin sönümlü zorlanmış titreşimine ait hareket denklemidir.

Bu denklemi her iki tarafı m'ye bölerek düzenlediğimiz taktirde:

$$\ddot{u}(t) + \frac{c}{m}\dot{u}(t) + \frac{k}{m}u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (5.4.4)$$

elde edilir.

Açısal frekans (ω), yapının doğal titreşim periyodu (T) ve yapının sönüm oranı (ξ) ifadeleri için aşağıdaki bağıntıları yazarak denklemde düzenleme yaparsak.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad c = 2m\omega\xi \quad \frac{k}{m} = \omega^2$$
$$\ddot{u}(t) + 2\omega\xi\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (5.4.5)$$

elde edilir.

Bir sayısal çözümleme yöntemi kullanılarak bu denklemi çözersek, zamana bağlı olarak değişen yer ivmesi etkisinde oluşacak yer değiştirme zamana bağlı olarak bulunabilir. Bunu kullanarak da iç kuvvetler, taban kesme kuvveti gibi hesaplamalar yapılabilir.

Belirli bir deprem için kaydedilen yer ivmesi – zaman grafiğinden o deprem için maksimum yer ivmesi tespit edilebilir. Tasarım için yer hareketi sırasında yapıya etkiyen yüklerin alabileceği en büyük değer önemlidir. Sabit bir sönüm oranı için periyodu farklı tek serbestlik dereceli sistem için çözümler yapılır. Yatay ekseninde Periyod ve Düşey ekseninde de en büyük yer değiştirmeler işaretlenirse çizilen bu grafiğe Yer Değiştirme Spektrumu adı verilir.

Yer değiştirme en büyük değerini alınca, yapıda oluşan iç kuvvetleri aşağıdaki bağıntı ile bulabiliriz.

$$F = k \cdot (u_{max}) = k \cdot (SD) \quad (5.4.6)$$

Bu denklemi yer deşiştirmenin en büyük değerini aldığı anda yapıya etki eden kuvvetin eylemsizlik kuvveti cinsinden ifade etmek üzere düzenlersek;

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot (SD) \quad (5.4.7)$$

Buradan sistemin ivme değerinin sistemin spektral yer değiştirmesi ve açısal frekansının çarpımı ile bulunabildiği görülmektedir.

Hareket denklemimizi düzenlersek;

$$\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t) = -2\omega\xi\dot{u}(t) - \omega^2 u(t) \quad (5.4.8)$$

elde edilir. Burada yer değiştirmenin en büyük değerine ulaştığı ana bakalım. Bu t anına tmax dersek, bu andaki hareket denklemini yazıp, bu anda hızın da sıfır olduğunu denklemde belirterek, SD yani spektral yer değiştirme ile bu denklemi ifade edelim;

$$\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t) = -\omega^2 SD \quad (5.4.9)$$

Bizim burada aradığımız sistem ivmesi, deprem nedeniyle oluşan yer hareketinde sistemin en büyük yer değiştirmesine karşılık gelen ivme değeridir. Bu ivmeye sözde ivme denir. Elde edilen bir yer değiştirme spektrumunda her bir periyot için sözde ivmeler hesaplanabilir. Bu hesaplanan değerlerle elde edilecek sözde ivme spektrumundan belirli bir periyot değeri için karşılık gelen sözde ivme değerine **Sözde Spektral İvme (SA)**denir.

$$SA = \omega^2 SD \quad (5.4.10)$$

Yukarıdaki denklem Sözde Spektral İvme ile Spektral Yer Değiştirme arasındaki bağıntıyı ifade eder.

Doğrusal elastik davranış durumuna bakarsak, yapıya etkiyen kuvvet ile yer değiştirmenin birbiriyle orantılı olduğunu görürüz. Spektrumları çizerek elde edeceğimiz deprem kuvveti de elastik deprem yükü olmaktadır. Bu elastik deprem yükünü yukarıdaki spektral ivme bağıntısını kullanarak yazarsak;

$$F_{el} = m \cdot SA \quad (5.4.11)$$

şeklinde olacaktır.

Deprem yüklerini belirlemek için yapının bulunduğu bölgedeki geçmişte olmuş depremlerin özellikleri dikkate alınarak, zemin koşulları da göz önünde tutulur ve tasarım spektrumu hazırlanır.

5.5 Deprem Yüklerinin Tanımlanması

5.5.1 Spektral ivme katsayısı

Spektral İvme Katsayısı; göz önüne alınan deprem doğrultusu için birinci doğal titreşim periyoduna karşı gelen deprem yüklerinin belirlenmesinde esas alınır ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$A(T) = A(T) = A_0 I S(T) \quad (5.5.1)$$

Burada;

$A(T)$: Spektral ivme katsayısı

A_0 : Etkin yer ivmesi katsayısı

$S(T)$: Spektrum katsayısı

DBYBHY’de tanımı verilen Elastik Spektral İvme (%5 sönüm oranı için tanımlanan Elastik İvme Spektrumunun ordinatı) Spektral İvme Katsayısı ile yerçekimi ivmesi g ’nin çarpımı ile hesaplanır.

$$S_{ae}(T) = A(T)g \quad (5.5.2)$$

Burada belirtilen Etkin Yer İvmesi Katsayısı ise yapının bulunduğu **Deprem Bölgesi**’ne göre aşağıdaki tabloda tanımlanmıştır.

Çizelge 5.5.1 : Etkin yer ivmesi katsayısı.

Deprem Bölgesi	A_0
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10

Elde edilen spektrum için spektrumun yatay eksenindeki periyotlar spektrum karakteristik periyotları diye adlandırılır. DBYBHY’de bu periyotlar yerel zemin sınıfına bağlı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.5.2 : Yerel zemin sınıfına göre periyotlar.

Yerel Zemin Sınıfı	Ta	Tb
Z1	0.10	0.30
Z2	0.15	0.40
Z3	0.15	0.60
Z4	0.20	0.90

Bu tablo yardımıyla her bir yerel zemin sınıfı ve deprem bölgesi için elastik deprem yükünü hesaplamakta kullanılacak sözde ivme spektrumu tanımlanmış olur.

Konumuz olan yükseltilmiş sıvı tankımız 2.deprem bölgesinde bulunmakta ve Zemin Sınıfı olarak da Z2 zemin sınıfına ait bir bölgedir.

Bu yapımızın tasarımında elastik deprem yükü yukarıdaki tablolar kullanılarak hesaplanabilir. Yapımızın ağırlığı, yapımızın periyodu, zemin sınıfı ve deprem bölgesini aşağıdaki bağıntıda yerlerine koyarak elastik deprem yükü hesaplanır.

Spektrum katsayısı, yapının doğal periyodu (T) ve zemin sınıflarına bağlı olan periyodlara göre DBYBHY’de verilen bağıntılar ile hesaplanabilir.

$$S(T) = 1 + 1.5 \frac{T}{T_a} \quad (0 \leq T \leq T_a)$$

$$S(T) = 2.5 \quad (T_a \leq T \leq T_b)$$

$$S(T) = 2.5 \left(\frac{T_b}{T}\right)^{0.8} \quad (T_b \leq T)$$

5.5.2 Elastik deprem yükü:

$$F_{el} = m \cdot S(T) \cdot A_0 \cdot g \quad (5.5.3)$$

Yalnız DBYBHY’de verildiği gibi bu deprem yükü , I ile gösterilen bina önem katsayısı ile çarpılacaktır. Yükseltilmiş Su Tankları için bu katsayı 1.5 olarak verilmiştir.

Yukarıdaki Elastik deprem yükü denklemini tekrar yazarsak

$$F_{el} = m \cdot S(T) \cdot A_0 \cdot g \cdot I \quad (5.5.4)$$

Tasarım Deprem yükü ise yapının deprem sırasında sünek davranış sergileyeceğini düşünerek, elastik deprem yükünün, deprem yükü azaltma katsayısına bölünerek bulunur.

5.5.3 Bina önem katsayısı

DBYBHY’de aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi binanın kullanım amacına veya türüne göre bina önem katsayısı verilmiştir. Çizelge 5.5.5 binalar için düzenlenmiş olsa da DBYBHY’de belirtildiği gibi bina olmayan yükseltilmiş sıvı tankları için de bu tabloda verilen Bina Önem Katsayılarını kullanılacaktır.

5.5.4 Deprem’in yapılar üzerindeki etkileri

Yapılarda düşey yükleri sabit yükler yani taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların ağırlıkları ile hareketli yükler (eşya yükleri, insan yükleri, kar yükü gibi) oluştururlar. Yatay yük olarak ise en önemli etken depremdir. Yapının güvenliği adına depremden kaynaklanan bu yatay yüklerin karşılanabilmesi gerekmektedir.

Hareketli yükler yapı üzerinde belirli bir süre için ek yükler oluştururlar. Deprem’in getirdiği yük ise daha kısa sürelidir. Depremler çok kısa süreli oldukları için yükler de kısa sürede etkirler ve dinamik özelliktedirler. Yapılar sürekli olarak düşey yüklere maruz olmalarına rağmen, yatay yüklemelere nadiren maruz kalırlar. Deprem anında da bu yatay yükler yapıda zorlamalara neden olur. (Celep, 2011)

Deprem’in yapılar üzerindeki etkilerini göz önüne alarak yazılan (DBYBHY gibi) yönetmeliklerde 50 yıllık bir süre için yapının bulunduğu bölgede aşılma olasılığı %10 olan bir deprem “Tasarım Depremi” olarak göz önüne alınır. (Celep, 2011) Taşıyıcı sistemin bu tasarım depreminde meydana gelecek elastik ötesi şekil değiştirmeler ve enerji tüketilmesi ile karşılanacağı kabul edilir.

Yönetmelikler ile amaçlanan, yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanmasıdır. Ana ilke olarak yeni yapılacak binaların hafif şiddetteki depremlerde binalardaki taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yine bu elemanların gördükleri hasarların sınırlı seviyede kalması ve şiddetli depremlerde ise yapıda deprem anında bulunanların can güvenliğinin sağlanması amaçlanır.

Deprem yüklerini taşıyacak taşıyıcı sistem elemanlarının her birinde, temel zeminine kadar sürekli bir şekilde bu yüklerin güvenli şekilde aktarılmasını sağlayacak kadar rijitlik, kararlılık ve dayanım hedeflenir.

Depreme dayanıklı tasarım yaparken sünek davranış ile deprem enerjisinin büyük bölümünün tüketilmesi amaçlanır ve bu nedenle sünek tasarım ilkelerine bağlı kalınır.

Seçilen bir deprem etkisine karşı sistemde gerekli dayanımın sağlanması doğru tasarım ile gerçekleştirilir. Yapıdaki göçmenin ve istenmeyen derecede büyük hasarların engellenmesi, sistemin büyük elastik ötesi yer değiştirmelerde de dayanımının devam etmesine bağlıdır. Bu şekilde sistemin dayanımının azalmadan sürmesi sistemin süneklik özelliğidir. Süneklik, büyük şekil değiştirmeler yapabilme özelliğidir.

Yapıların taşıyıcı sistemleri, Deprem Yönetmeliği'nde "Süneklik Düzeyi Normal Sistemler" ve "Süneklik Düzeyi Yüksek Sistemler" olarak ikiye ayrılmaktadır.

Kütlesi yüksek bir seviyede toplanmış binalardan, alt katlar aşırı şekilde zorlanacağı için kaçınılmalıdır.

5.5.5 Deprem etkisinin altındaki yapı için çözümleme yöntemleri

- Zaman alanında çözümleme: Bu çözüm yönteminde, taşıyıcı sistem zaman alanında boyutlama için kabul edilen bir deprem hareketi için çözülür. Tasarımın ve projenin ilk aşamasında bu yöntemin tercih edilmeme nedeni ise yapının davranışının boyutlarına bağlı olmasıdır.
- Mod birleştirme yöntemi: Bu yöntemin temeli, sistemin her bir serbest titreşim modunun deprem hareketine olan tepkisinin ayrı ayrı hesaplanıp, sonrasında bu modların birleştirilmesidir. Sistemin kütlelerinin her katta toplandığı kabul edilerek bu katlardaki yer değiştirme ve dönme hesaplanır.
- Eşdeğer deprem yükü yöntemi: Özellikle taşıyıcı sistemi düzenli olan yapılarda yağın davranışını en iyi şekilde temsil eder.

Deprem bölgelerinin belirlenmesinde önceki depremlerin büyüklükleri, sismolojik araştırmalar belirleyici olurlar. Yapıların depreme dayanıklı olarak tasarlanmasında kullanılan Toplam Eşdeğer Deprem Yüğü, taban kesme kuvvetidir.

Yapı önem katsayısı ise yapının kullanım amacına göre belirlenir. Deprem sonrasında ilk aşamada kullanılacak kadar öneme sahip yapılar ile daha çok can kaybının olabileceği yerlerde bulunan yapıların yapı önem katsayısı daha büyüktür.

Güncel Deprem Yönetmeliği'nde yükseltilmiş sıvı tankları için yapı önem katsayısı “1.5” olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.5.5 : Bina önem katsayıları.

<i>Binanın Kullanım Amacı veya Türü</i>	<i>Bina Önem Katsayısı (I)</i>
<u>1. Deprem sonrası kullanımı gereken binalar ve tehlikeli madde içeren binalar</u> a) Deprem sonrasında hemen kullanılması gerekli binalar (Hastaneler, dispanserler, sağlık ocakları, itfaiye bina ve tesisleri, PTT ve diğer haberleşme tesisleri, ulaşım istasyonları ve terminalleri, enerji üretim ve dağıtım tesisleri; vilayet, kaymakamlık ve belediye yönetim binaları, ilk yardım ve afet planlama istasyonları) b) Toksik, patlayıcı, parlayıcı, vb özellikleri olan maddelerin bulunduğu veya depolandığı binalar	1.5
<u>2. İnsanların uzun süreli ve yoğun olarak bulunduğu ve değerli eşyanın saklandığı binalar</u> a) Okullar, diğer eğitim bina ve tesisleri, yurt ve yatakhaneler, askeri kışlalar, cezaevleri, vb. b) Müzeler	1.4
<u>3. İnsanların kısa süreli ve yoğun olarak bulunduğu binalar</u> Spor tesisleri, sinema, tiyatro ve konser salonları, vb.	1.2
<u>4. Diğer binalar</u> Yukarıdaki tanımlara girmeyen diğer binalar (Konutlar, işyerleri, oteller, bina türü endüstri yapıları, vb)	1.0

Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı: Deprem yönetmeliği, tasarım depreminde yapının taşıyıcı elemanlarında bir miktar hasar kabul eder ancak bu hasarın sınırlı olması ve onarılabilir olmasını şart koşar.

Yönetmelikte, kapasite tasarımı öne çıkarılarak, tasarım depremi etkisinde ve daha büyük depremlerde sünek güç tükenmesinin oluşması amaçlanır.

Taşıyıcı sistemde güvenlik için, düşey yüklerin belirlenmesindeki zorluklar ve malzeme dayanımındaki değişimler göz önüne alınarak güvenlik katsayıları öngörülmüştür.

Hareket yükün belirlenebilmesi için yük arttırma katsayısı büyük seçilir. Yönetmelikte kullanılan Tasarım Depreminden daha büyük bir deprem olması da olasılıklar dahilindedir. Böyle bir durumda sünekliğin sağlanabilmesi can kaybını azaltacaktır.

Çizelge 5.5.6 : Deprem yükü azaltma katsayısı.

<i>YAPI TÜRÜ</i>	<i>R</i>
Süneklik düzeyi yüksek çerçeveler veya dışmerkez çaprazlı çelik perdeler tarafından taşınan yükseltilmiş sıvı tankları, basınçlı tanklar, bunkerler, hazneler	4
Süneklik düzeyi normal çerçeveler veya merkezi çaprazlı çelik perdeler tarafından taşınan yükseltilmiş sıvı tankları, basınçlı tanklar, bunkerler, hazneler	2
Kütlesi yüksekliği boyunca yayılı, yerinde dökülmüş betonarme silo, endüstri bacaları ve benzeri taşıyıcı sistemler (*)	3
Betonarme soğutma kuleleri (*)	3
Kütlesi yüksekliği boyunca yayılı uzay kafes kirişli çelik kuleler, çelik silo ve endüstri bacaları (*)	4
Gergili yüksek çelik direk ve gergili çelik bacalar	2
Kütlesi tepede yığılı, bağımsız tek bir düşey taşıyıcı eleman tarafından taşınan ters sarkaç türü yapılar	2
Endüstri tipi çelik depolama ve istif rafları	4

5.5.6 Yükseltilmiş su tankları ve problem

Yükseltilmiş su tankları (su kuleleri) bir su dağıtım sistemine yeterli basıncı sağlayabilecek kadar yükseklikte inşa edilen su depolama yapılarıdır. Genel amacı, içme suyunu dağıtım kanalı ile bir fabrikaya, küçük bir yerleşim bölgesine veya bir veya birden çok eve ulaştırabilmektir. Su tankları, dağıtım kanalının ihtiyacı olan basınca göre tasarlanırlar ve buna göre yükseklikleri belirlenir. (Her 30 metrede yaklaşık 300kPA basınç sağlanır.)

Yükseltilmiş su tankları güçlendirilmiş beton veya çelikten üretilirler. Rezervuar ise farklı geometrilerde yapılabilmektedir. Genel olarak su kulelerinin yüksekliği 25-30m arasındadır.

1950’lerde çoklukla kullanılan su tankları günümüzde yerini daha çok basit pompalara bırakmıştır. Bu tip pompalar gerekli basıncı sağlayabilmektedir, su kulelerinin avantajı ise elektrik kesintilerinde basit pompalar çalışmaz hale gelmesine rağmen, su kuleleri hidrostatik basınç sayesinde bir süre daha çalışabilmektedir.

Özellikle deprem gibi afetlerden sonra yerleşim merkezlerinden uzakta olan fabrika veya yerleşim bölgelerinde su dağıtımının devam edebilmesi için su kuleleri iyi bir çözüm olabilmektedir.

Ancak deprem veya diğ er doğal afetler sonrasında kullanımına ihtiyaç duyulabilecek olan bu su depolama yapılarının, deprem gibi tahmin edilemeyen bir doğal afette; hafif Şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar g ormemesi, orta Şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın sınırlı ve onarılabilir düzeyde kalması, Şiddetli depremlerde ise can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlanması ve bu sayede deprem sonrasında kullanılabilir durumda olması gerekir.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te de bu konuya deęinilmiőtir ve bina dıőı diğ er yapılar olmasına rağmen yönetmelik dahiline alınımıőtır.

Y kseltilmiőt su tanklarının hasar görmelerinin baőlıca nedeni depremdir. Tasarım esnasında, deprem yükleri öngörülmeden projelendirilen yapıların deprem sırasında aldıkları hasar nedeniyle kullanılamaz hale geldikleri görülmüştür.

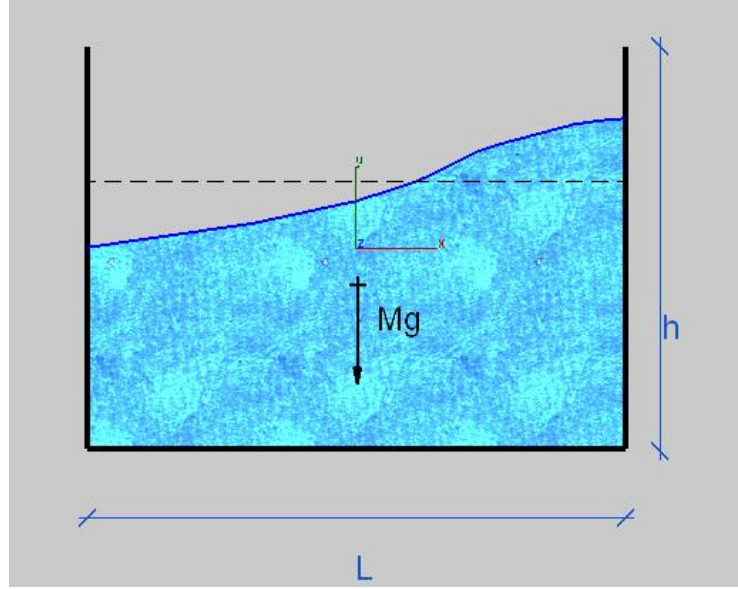


Şekil 5.5.6 : Zarar g rm őt su tankları.

Soldaki fotoğrafta gösterildiği üzere; ABD gibi Şiddetli fırtınaların sıklıkla görüldüğü yerlerde ek rüzgar yükünden dolayı zarar g rm őt su tanklarına rastlanımıőtır. Sağdaki fotoğrafta olduğu gibi; Cary, North Carolina'da hasar g rm őt bir su tankı...

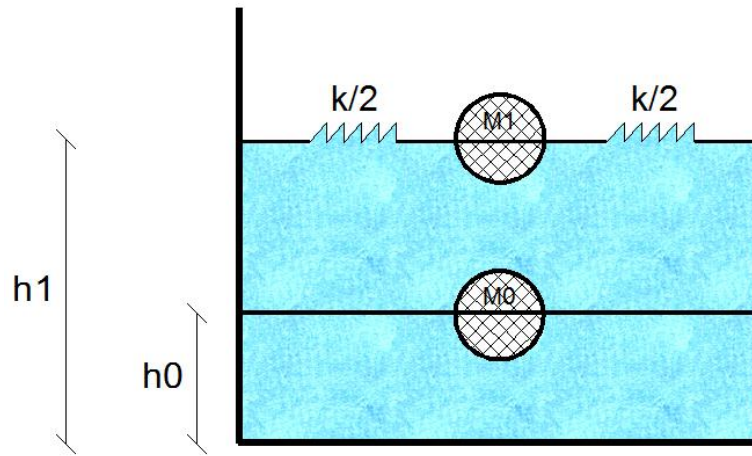
5.5.7 Sıvı tanklarının deprem etkisi altındaki dinamik davranışları

İçinde su bulunan, dikdörtgen kesitli bir sıvı tankının deprem etkisi altındaki dinamik davranışı belirlenirken tanktaki sıvı hacmi, hazneye rijit olarak bağlı ve sıvı tankına elastik bir yay ile bağlı şekilde iki ayrı kütle halinde alınır.



Şekil 5.5.7: Su tankı ve serbest yüzey.

Sıvı tankının geometrik özelliğine (tankın yüksekliği ve tankın deprem doğrultusundaki boyutuna bağlı) bağlı olarak farklı modeller geliştirilmiştir. $h/l < 1.5$ koşulu sağlandıkça aşağıdaki model geçerlidir.



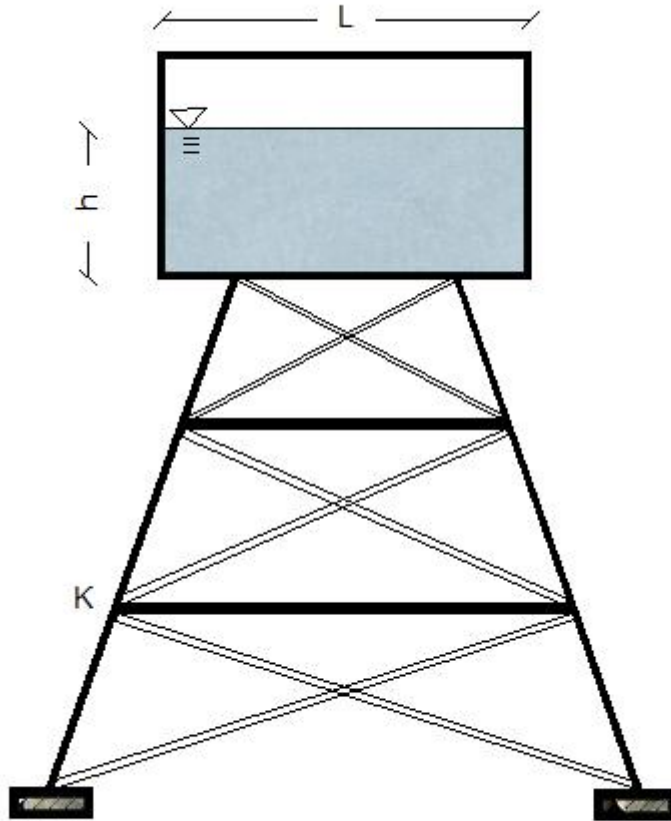
Şekil 5.5.8 : Su tankı modeli.

6- PROBLEMİN TANIMI

6.1 Yükseltilmiş Tank Modeli

Yükseltilmiş su depolama tankımız aşağıdaki gibi modellenmiştir.

Yükseltilmiş su tankının deprem sırasında yer hareketi nedeniyle üzerine gelen deprem yükü ve tankın içindeki suyun bu hareket esnasında hareketi nedeniyle oluşan sıvı çalkantısı dolayısıyla oluşan ek yükler tespit edilecek, serbest yüzeyin hareketi ve dalga yüksekliği belirli anlar için takip edilecektir.



Şekil 6.1 : Su depolama tankı ve boyutlandırma.

6.2 İzlenen Metotlar Ve Hesaplama

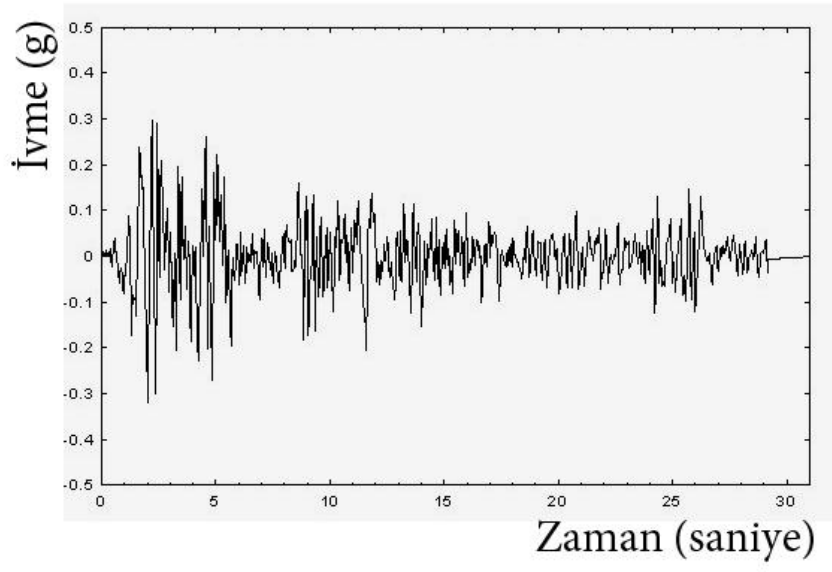
Deprem yükü altındaki yapının DBYBHY’de verilen koşullara uygun tasarlanması gerekir. Depreme dayanıklı yapı, yeterli kapasiteye sahip ve yeterli rijitlik ve sünekliğe sahip olmalıdır. Deprem yükü altındaki yapının içinde bulunan sıvının hareketi ve oluşabilecek çalkantı durumunda oluşacak ek yükler de göz önüne alınmalıdır.

DBYBHY’de verilen talimatlara göre tasarım deprem yükünü hesapladıktan sonra homojen, izotropik, viskoz ve Newton kanunlarına uyduğu kabul edilen akışkanın depremden kaynaklanan yer hareketinin zamana bağlı olarak değişen ivmesi altında iki boyutta hareket ettiği kabul edilerek SOLA-VOF metodunu kullanan bir yazılım yardımı ile akışkanın çalkantısından oluşan ek yükler, serbest yüzey hareketi, dalga yüksekliği ve toplam yatay kuvvetler tespit edilir.

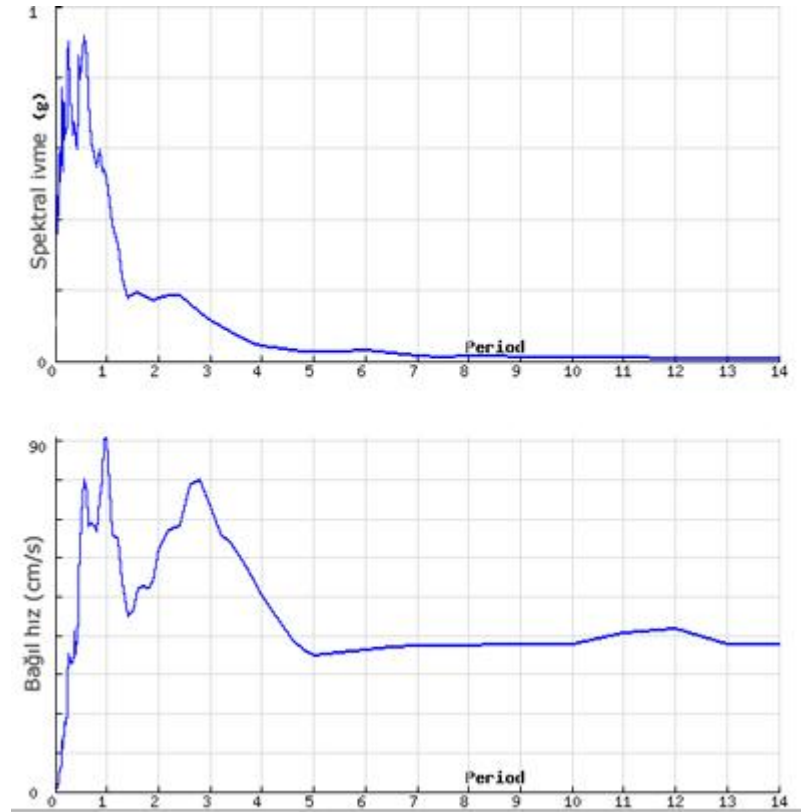
Problemimizde örnek deprem olarak 18 Mayıs 1940’da Imperial Valley, ABD’de olan 7.1 büyüklüğündeki El Centro depremi alınmıştır. El Centro depremine ait vibrasyon verileri yazılımda kullanılmıştır. Yer ivmesi-Zaman grafiğinin belirli zaman aralıkları incelenmiş ve en küçük kareler yöntemi ile mümkün olduğunca gerçeğe uygun bir denklem yazılmış ve akışkanın çalkantı hesabında bu denklem kullanılmıştır.



Şekil 6.2.1: El Centro depreminden sonra oluşan hasarları gösteren bir fotoğraf.



Şekil 6.2.2: El Centro depreminde kaydedilen yer ivmesi – zaman grafiği.



Şekil 6.2.3 : El Centro depreminde kaydedilen spektrumlar.

6.3 Problemin Çözümü

4. bölümde tanımlanan hesaplama yöntemi ile dikdörtgen kesitli su tankındaki sıvının çalkantısına ait modelleme yapılır ve yazılım ile sonuçlar hesaplanır.

Örnek depremdeki yer ivmesi-zaman grafiğinden elde edilen depremin farklı titreşim periyotlarından belirli aralıklarla seçilen zamana denk gelen titreşim periyodu ve karşı gelen frekans ile tanka hareket verilir.

Tanka verilen hareket, bölüm 3’de anlatıldığı gibi VOF-SOLA metodu ile nümerik şekilde hesaplanır.

Elde edilen basınçlar ve kuvvetlerin zamanla değişimi incelenirken, serbest yüzey ve dalga yüzeyi de takip edilir.

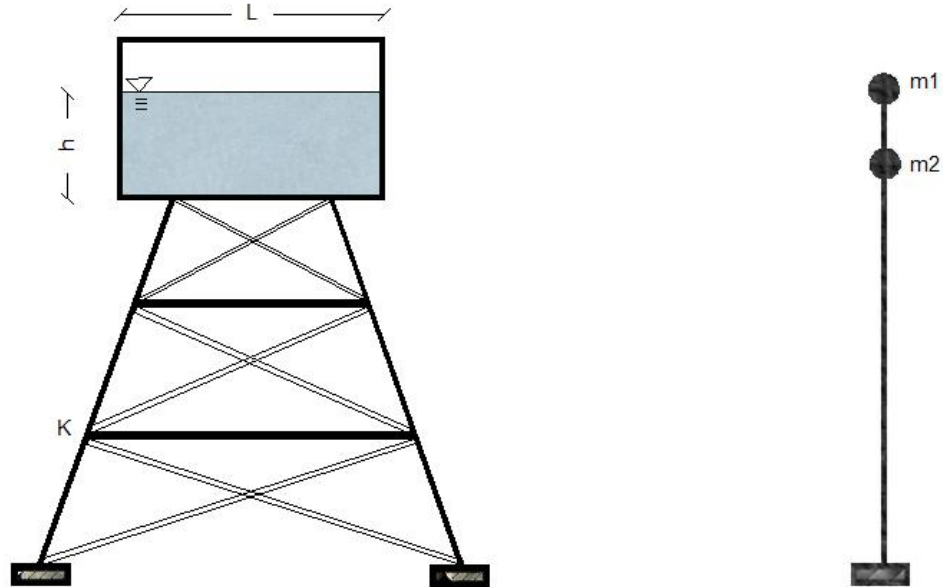
Ayrıca, deprem sırasındaki hareketin su tankında oluşturduğu titreşim frekansının su dolu tankın doğal frekansına yakın olabileceği, yani rezonans olabilecek durumlar araştırılır ve bu durumlarda oluşan kuvvetler incelenir, serbest yüzey ve akışkanın dalga yüksekliği hesaplanır.

7. PROBLEMLER

7.1 Problem 1:

Bu problemde, örnek deprem ve yer hareketinden kaynaklanan yapı hareketi nedeniyle sistem üzerinde oluşan yükler ve sıvı çalkantısından oluşan çalkantı yüklerinin toplamının yapının dayanımına ne kadar etki ettiğini araştıracağız. VOF-SOLA tekniği ile geliştirdiğimiz yazılım ile tank içindeki suyun serbest yüzey hareketini takip edeceğiz. İki serbestlik dereceli olarak modellediğimiz yapının dinamik davranışını belirlendikten sonra, ortaya çıkan maksimum yatay kuvvet, yer değiştirmeler hesaplanacaktır.

Deprem etkisindeki dinamik davranışını inceleyeceğimiz yükseltilmiş su tankımız aşağıdaki gibidir. Dikdörtgen su tankını çelik kule taşımaktadır. Tankın deprem doğrultusundaki boyutu “ L ”, çelik kule yüksekliği H_1 , su seviyesi “ h ” ile gösterilmektedir. Çelik kulenin rijitliği K ’dır.



Şekil 7.1 Yükseltilmiş su tankı ve iki serbestlik dereceli modeli.

Su tankının iki serbestlik dereceli modeli Şekil 7.1'deki gibidir.

Sönüm oranlarını aşağıdaki gibi alıyoruz.

1. mod için $\xi = \% 0.5$
2. mod için $\xi = \% 2.0$

Deprem olarak ise “El Centro” depremi alınmıştır. $\ddot{U}_g \max = 0.3476g$

$L=5m$, $h=3m$

Dikdörtgen tank için parametreler:

$a=1.2$, $b=0.527$, $c=1.58$

$M=2.5 * 5 * 3 = 37.5 * 10^3 kg$

$$\frac{M_0}{M} = \frac{\tanh(\frac{\sqrt{3}}{a})}{\frac{\sqrt{3}}{a}} = 0.62$$

$$\frac{M_1}{M} = \frac{b * \tanh(ca)}{a} = 0.42$$

$$M_0 = 37.5 * 10^3 * 0.62$$

$$M_0 = 23.25 * 10^3 kg$$

$$M_1 = 15.75 * 10^3 kg$$

$$\frac{k * h}{M_1 * g} = ca \tanh(ca)$$

$$k=93.32 \text{ kN/m}$$

$$K=10500 \text{ kN/m}$$

$$m_1=15.75 * 10^3 kg$$

$$m_2=35.25 * 10^3 kg$$



Şekil 7.2 : İki serbestlik dereceli model.

Sistemin Serbest Titreşim Frekansı Denklemi

$$|k - \omega^2 m| = 0$$

Problemlerimizde 1.doğal periyodu kullanacağız.

$\omega_1=2.42$ ve $\omega_2=17.33$ olarak hesaplanır.

Sistemin modal vektörleri:

$$\begin{bmatrix} 93 - 15.75 * 2.42^2 & -93 \\ -93 & 10593 - 35.25 * 2.42^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{1i} \\ \theta_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Housner eğrisi yardımı ile Spektral ivme hesaplanır:

$$T_i = 2\pi / \omega_i$$

$$T_1 = 2.59s$$

$$T_2 = 0.36s$$

$$S_{a1} / \ddot{U}_g \max = 0.6$$

$$S_{a2} / \ddot{U}_g \max = 2.2$$

$$S_{a1} = 0.3476 * 0.6 * 9.81 = 2.045 \text{ m/s}^2$$

$$S_{a2} = 0.3476 * 2.2 * 9.81 = 7.502 \text{ m/s}^2$$

$$S_{v1} = S_{a1} / \omega_1 = 0.6 / 2.42 = 0.248 \text{ böylece } u_{\max} = 0.248 / 2.42 = 0.102m$$

$$S_{v2} = S_{a2} / \omega_2 = 7.502 / 17.33 = 0.433 \text{ böylece } u_{\max} = 0.433 / 17.33 = 0.025m$$

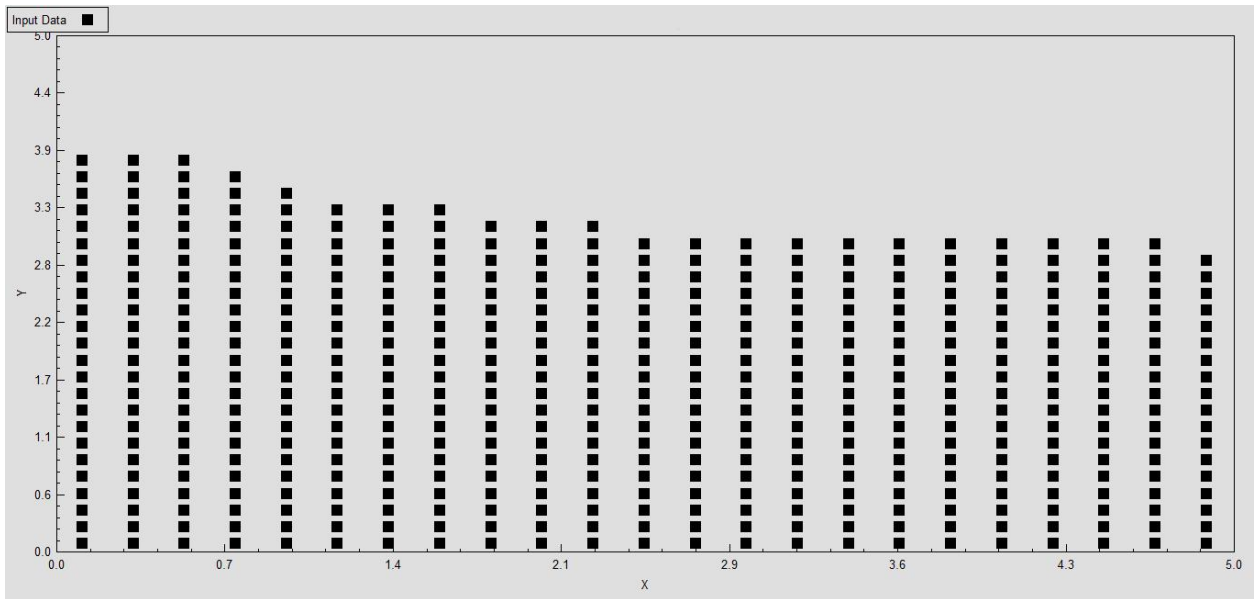
En büyük kuvvet ise yaklaşık olarak $K * u_{\max} = 1080 \text{ kN}$ olarak bulunabilir.

7.2 Durum 1:

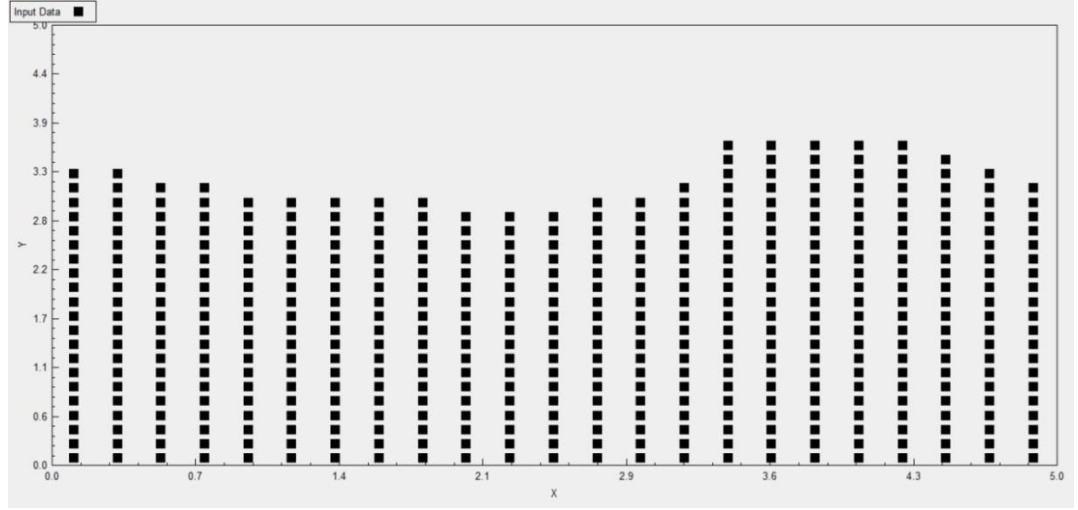
Problemimiz için ilk durumda, örnek deprem ve yer hareketinden kaynaklanan yapı hareketi nedeniyle sistem üzerinde oluşan yükler ve sıvı çalkantısından oluşan çalkantı yüklerinin toplamının yapının dayanımına ne kadar etki ettiğini araştıracağız.

Deprem etkisindeki dinamik davranışını inceleyeceğimiz yükseltilmiş su tankının deprem doğrultusundaki boyutu “L”, çelik kule yüksekliği H1, su seviyesi “h” ile gösterilmektedir. Çelik kulenin rijitliği K’dır. Su yüksekliği bu durumda 3m, doluluk oranı ise %60’dır. Yapının doğal frekansı 2.42 rd/sn ve depremin maksimum ivmesi ise 0.3476g’dır. Deprem periyodu 1.5sn’dır. Sıvının serbest yüzeyini 1.5sn ve 2.5sn için takip edeceğiz ve programımızla bu anlardaki serbest yüzey şeklini çizeceğiz.

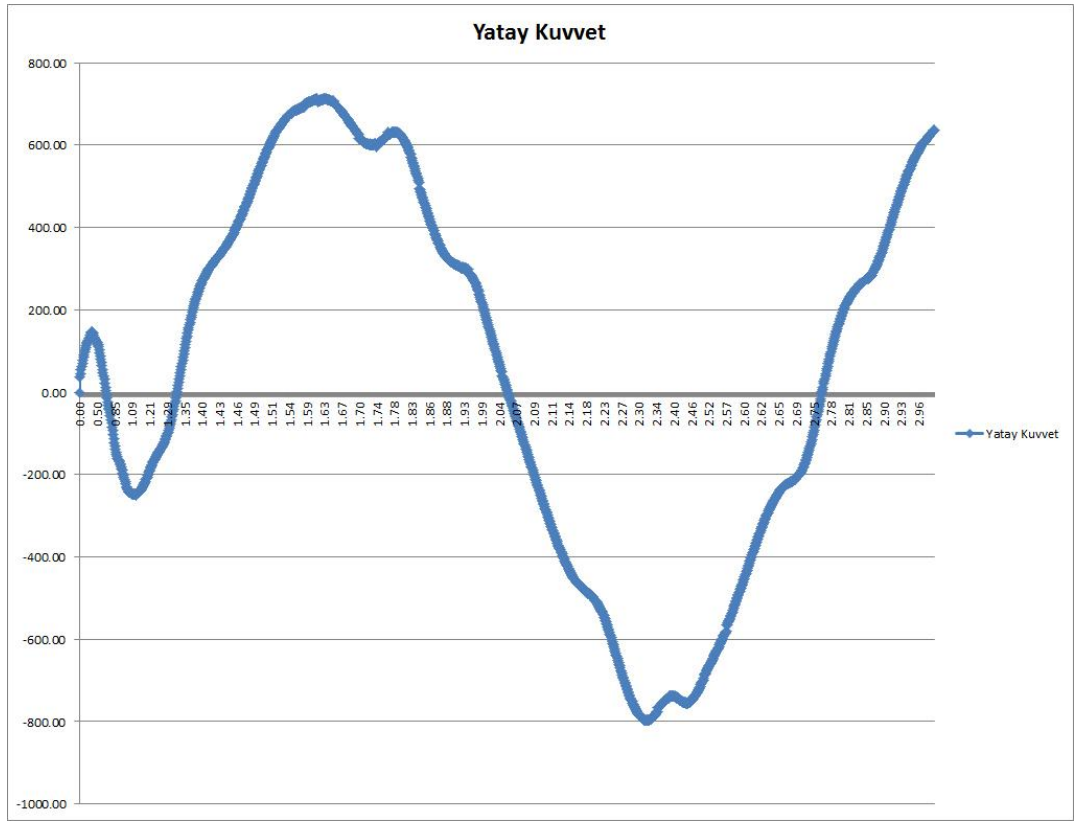
- Su yüksekliği = 3m
- Doluluk oranı = %60
- Yapının doğal frekansı=2.42 rd/sn
- Depremin maksimum ivmesi $\ddot{U}_{gmax} = 0.3476g$
- Deprem periyodu: 1.5sn
- T1=1.5sn’de Serbest Yüzey şekli
- T1=2.5sn’de Serbest Yüzey şekli



Şekil 7.2.1 T=1.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri



Şekil 7.2.2 T=2.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri



Şekil 7.2.3 Durum 1 için yatay kuvvetin zamanla değişim grafiği.

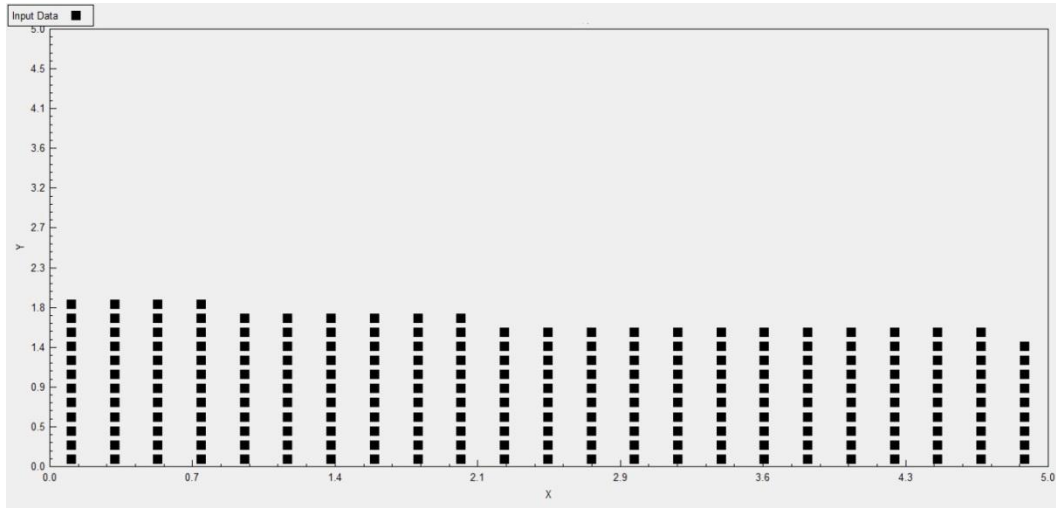
7.3 Durum 2:

Problemimiz için ikinci durumda, örnek deprem ve yer hareketinden kaynaklanan yapı hareketi nedeniyle sistem üzerinde oluşan yükler ve sıvı çalkantısından oluşan çalkantı yüklerinin toplamının yapının dayanımına ne kadar etki ettiğini araştıracağız.

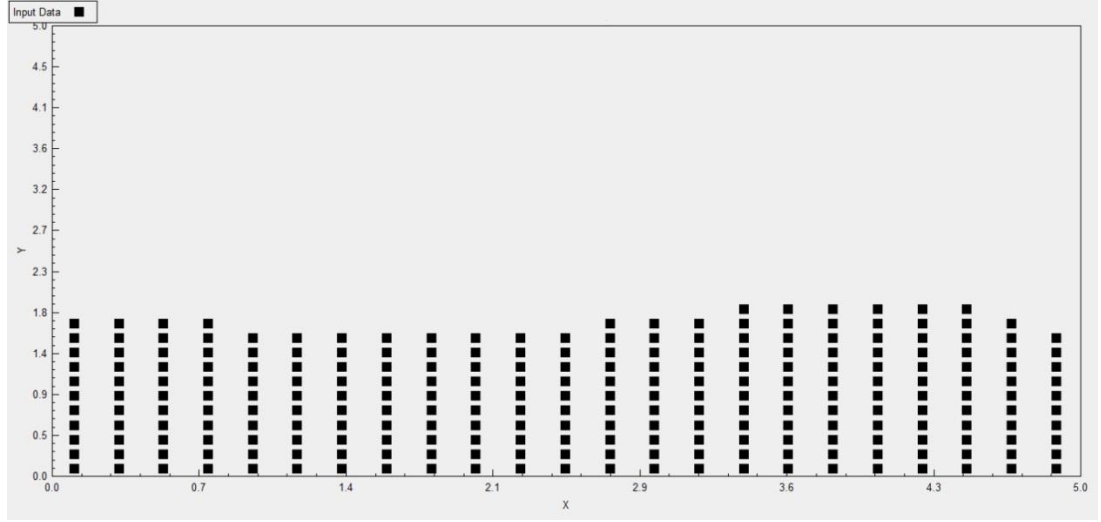
Deprem etkisindeki dinamik davranışını inceleyeceğimiz yükseltilmiş su tankının deprem doğrultusundaki boyutu “L”, çelik kule yüksekliği H1, su seviyesi “h” ile gösterilmektedir. Çelik kulenin rijitliği K’dır. Su yüksekliği ikinci durumda birinci duruma göre azalmış ve 1.5m’ye inmiştir. Doluluk oranı ise bu durumda %30’dur.

Yapının doğal frekansı yine 2.42 rd/sn ve depremin maksimum ivmesi ise 0.3476g’dır. Deprem periyodu 1.5sn’dır. Sıvının serbest yüzeyini 1.5sn ve 2.5sn için takip edeceğiz ve programımızla bu anlardaki serbest yüzey şeklini ve yatay kuvvetin zamanla değişim grafiğini çizeceğiz.

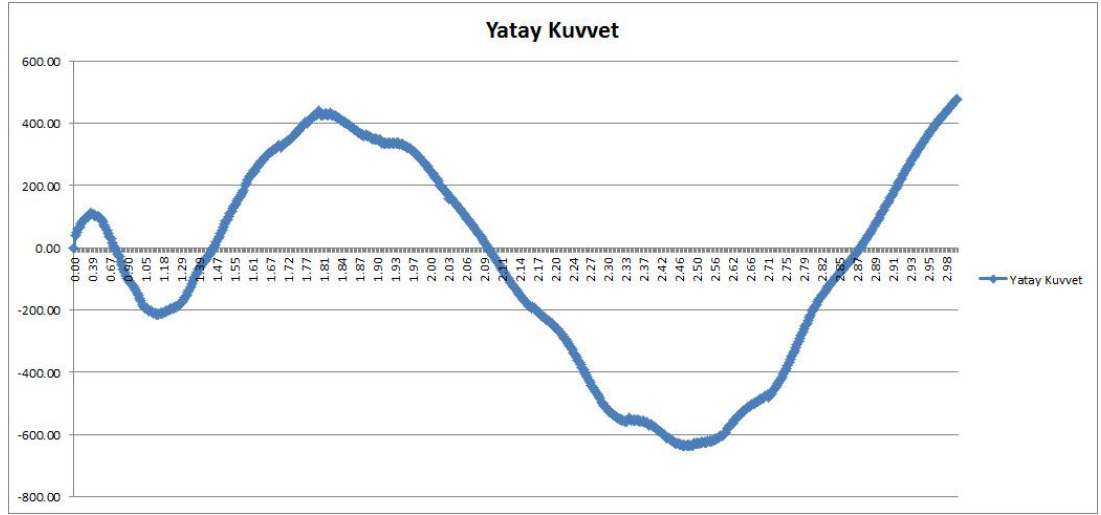
- Su yüksekliği = 1.5m Doluluk oranı=%30
- Yapının doğal frekansı=2.42 rd/sn
- Depremin maksimum ivmesi $\ddot{U}_g max = 0.3476g$
- Deprem periyodu: 1.5sn
- T1=1.5sn’de Serbest Yüzey şekli
- T1=2.5sn’de Serbest Yüzey şekli



Şekil 7.3.1 T=1.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri



Şekil 7.3.2 T=2.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri



Şekil 7.3.3 Durum 2 için yatay kuvvetin zamanla değişim grafiği.

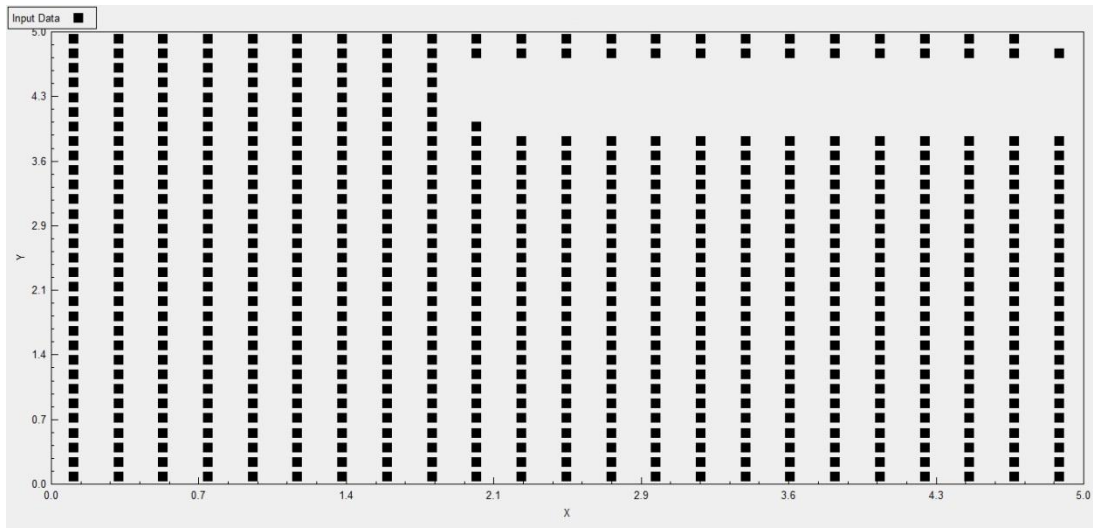
7.4 Durum 3:

Problemimiz için üçüncü durumda, örnek deprem ve yer hareketinden kaynaklanan yapı hareketi nedeniyle sistem üzerinde oluşan yükler ve sıvı çalkantısından oluşan çalkantı yüklerinin toplamının yapının dayanımına ne kadar etki ettiğini araştıracağız.

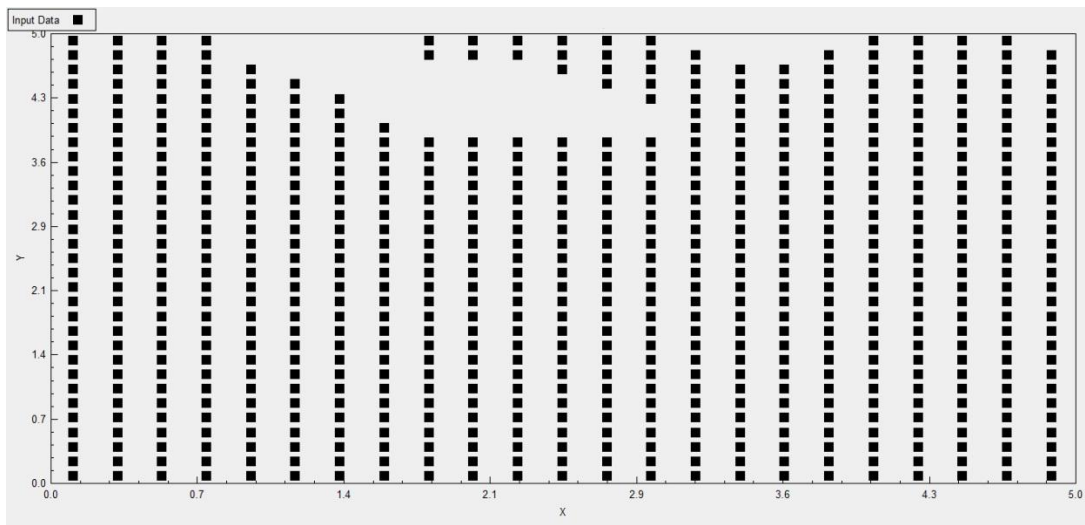
Deprem etkisindeki dinamik davranışını inceleyeceğimiz yükseltilmiş su tankının deprem doğrultusundaki boyutu “L”, çelik kule yüksekliği H1, su seviyesi “h” ile gösterilmektedir. Çelik kulenin rijitliği K’dır. Su yüksekliği üçüncü durumda 2.5m’ye çıkarılmıştır. Doluluk oranı ise bu durumda %50’dir. Yapının doğal frekansı

yine 2.42 rd/sn ve depremin maksimum ivmesi ise 0.3476g'dir. Deprem periyodu 1.5sn'dir. Sıvının serbest yüzeyini 1.5sn ve 2.5sn için takip edeceğiz ve programımızla bu anlardaki serbest yüzey şeklini ve yatay kuvvetin zamanla değişim grafiğini çizeceğiz.

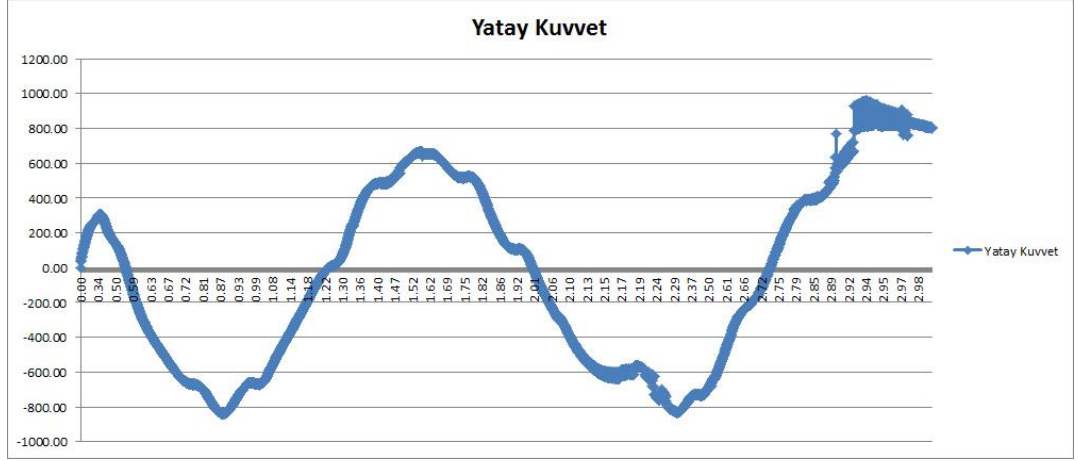
- Su yüksekliği = 2.5m Doluluk oranı=%50
- Yapının doğal frekansı=2.42 rd/sn
- Depremin maksimum ivmesi $\ddot{U}_g max = 0.3476g$
- Deprem periyodu: 1.5sn
- T1=1.5sn'de Serbest Yüzey şekli
- T1=2.5sn'de Serbest Yüzey şekli



Şekil 7.4.1 T=1.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri



Şekil 7.4.2 T=2.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri

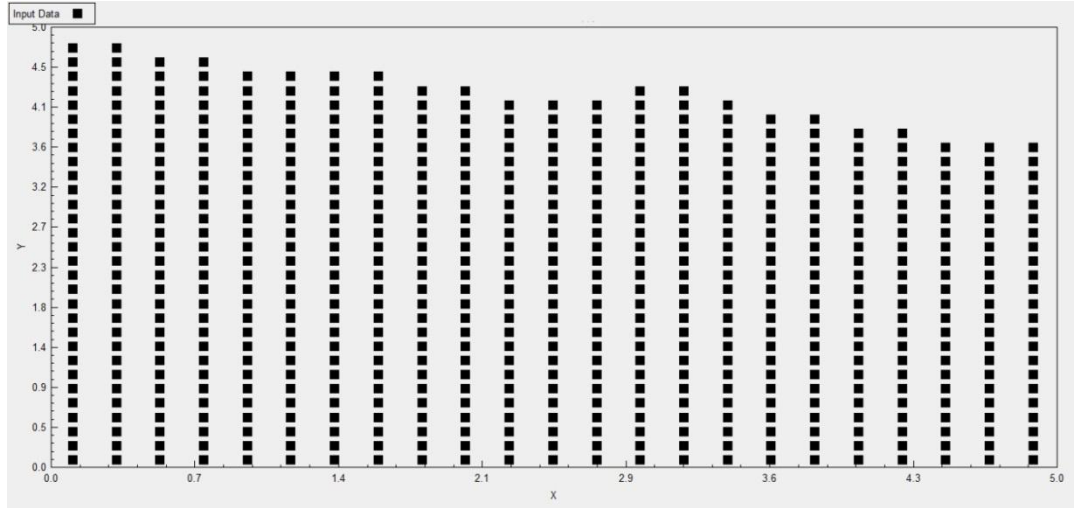


Şekil 7.4.3 Durum 3 için yatay kuvvetin zamanla değişim grafiği.

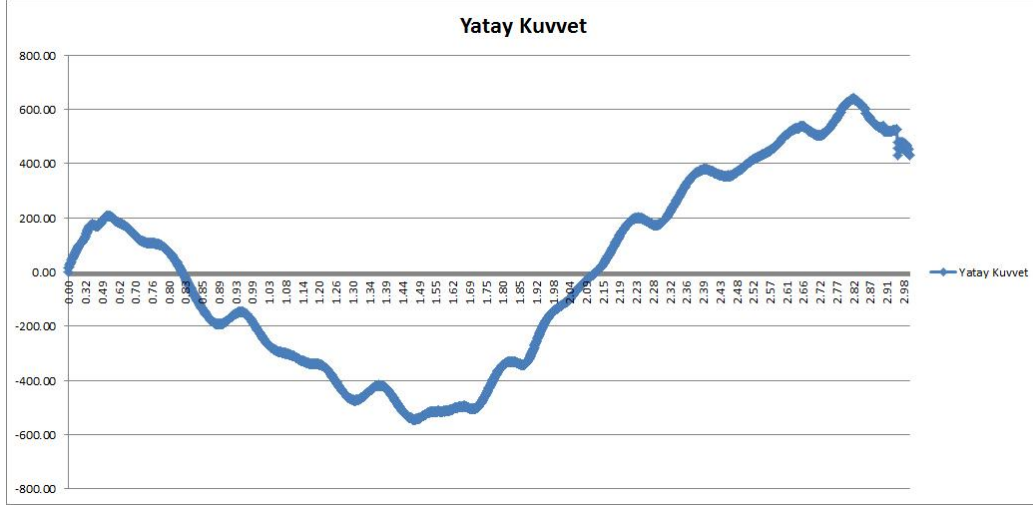
7.4 Durum 4:

Bu durumun önemi ise yapının doğal periyodu ile etki eden depremin periyodunun birbirine çok yakın olması, yani rezonans durumunun oluşabilmesidir.

- Su yüksekliği = 4m Doluluk oranı=%80
- Yapının doğal frekansı=2.42 rd/sn
- Depremin maksimum ivmesi $\ddot{U}_g max = 0.3476g$
- Deprem periyodu: 2.41sn
- T1=1.5sn'de Serbest Yüzey şekli



Şekil 7.4.4 T=1.5 sn anındaki serbest yüzey şekli ve su yükseklikleri



Şekil 7.4.5 Durum 4 için yatay kuvvetin zamanla değişim grafiği.

Yukarıdaki grafiklerde de görüldüğü gibi çalkantının yapı üzerinde oluşturduğu ek yükler, su doluluk oranı ve yapının doğal periyodu ile depremin periyoduna bağlı olarak değişmektedir. En büyük yatay kuvvetlerin maksimumu, su kütlesi arttıkça büyümektedir. Depremin periyodu ile yapının doğal periyodu birbirine yaklaştıkça oluşan yatay kuvvetin de daha uzun süreler ile daha büyük seviyelerde kaldığı da hesaplanmıştır. Ayrıca bu periyodların birbirine yaklaşması ile oluşan kuvvetlerin değişimi de daha düzensiz bir hal almıştır.

8. SONUÇLAR

Son yapılan çalışmalar ile sıvı çalkantısı problemi üzerinde sayısal hesaplamalarda büyük gelişmeler elde edilmiştir. Tanklardaki sıvı çalkantısı stabilite ve yapısal hasar gibi problemler oluşturmaları açısından büyük öneme sahiptir. Sıvı çalkantısının yapı üzerinde yarattığı etkiler ve zararlar su depolama tanklarında da gözle görülür seviyelere gelebilmektedir. Su tankının sismik hareketler, kar ve rüzgar yükleri nedeniyle yapabileceği hareketlerde tankın içerisindeki sıvının doğal frekansı hareketin frekansına yaklaştığında güçlü çalkantılar oluşabilmektedir. Bu çalkantıların destek sistemi üzerinde yapısal davranışa etkileri nümerik hesaplamalar ile araştırılmıştır.

Nümerik hesaplamalarda kullanılan VOF tekniği iki boyutlu viskoz sıvının çalkantısı modellenmiştir. VOF tekniği ile ayrıca akışkan tanecikleri karmaşık serbest yüzey üzerinde takip edilmiştir. Çalışmada akışkan homojen olarak varsayılmıştır. Tankın içinde bir hareketli koordinat sistemi kullanılmış ve sınır koşullarının sadeleştirilmesi sağlanmıştır.

Sayısal hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada incelenen su depolama tankı problemindeki kompozit yapının üzerine gelen yükler ve bu yüklerin yapı davranışı üzerindeki etkileri tespit edilmiş ve gözlemlenmiştir. Sıvı çalkantısının etkilerinin tasarım deprem yükü ile birlikte yapı üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması yapılmış ve çalkantının etkilerinin boyutu araştırılmıştır. Tank geometrisi, sıvı yüksekliği, doluluk oranı ve yapı doğal periyodu gibi değişkenlerin bu karşılaştırmada oynadıkları rol araştırılmış ve ortaya konmuştur.

Ele alınan problem için farklı durumlar incelenmiştir. 1.durumda akışkan yüksekliği 3 metre alınmış ve doluluk oranı %60 seviyesinde tutulmuştur. Serbest yüzey simülasyon sırasında takip edilmiş ve anlık olarak $T=1.5\text{sn}$ ve $T=2.5\text{sn}$ sürelerinde serbest yüzey ve dalga yüksekliğini gösteren şekiller çizilmiştir. 2.durumda, bu kez akışkan yüksekliği 1.5 metre alınmış ve doluluk oranı da %30'a indirilmiştir. Yine serbest yüzey takip edilerek $T=1.5\text{sn}$ ve $T=2.5\text{sn}$ sürelerindeki serbest yüzey ve dalga yüksekliğini gösteren şekiller çizilmiştir. 3. Durumda %50'ye çıkarılan doluluk oranı

4.durum yani son durumda ise %80'e arttırılarak ilk iki durumda olduğu gibi yine $T=1.5\text{sn}$ ve $T=2.5\text{sn}$ sürelerindeki serbest yüzey ve dalga yüksekliğini gösteren şekiller çizilmiştir. Yapının El Centro depremindeki en büyük yer ivmesinin olduğu yer hareketi sırasındaki davranışı iki serbestlik dereceli sistem modellemesi ile hesaplanmış ve yapının doğal periyodları ve oluşan maksimum yatay kuvvetler hesaplanmıştır. Bu kuvvetler ve akışkanın çalkantısından oluşan kuvvetler farklı durumlarda bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Yapılan çalışmada bulunduğu üzere, değişen tank geometrisi ve değişen yapı periyodu ile çalkantıdan gelen yükün etkileri değişmektedir. Tankın hareketinin frekansı ile sıvının frekansı birbirine yakın olduklarında oluşan rezonans çalkantıdan doğan etkileri büyötmektedir. Farklı zemin tipleri ve yapının bulunduğu yerin ait olduğu deprem bölgesine göre tasarım deprem yükünün değişimi göz önüne alınmalıdır. Çalkantıdan kaynaklanabilecek büyük kuvvetlerin yapıya verebileceği zararlar bu şekilde öngörölmeli ve yapı tasarımında, çalkantı etkilerinin de göz önüne alınması gerektiği durumlar olduğu göz ardı edilmemelidir. Yapının tasarımı; çalkantı kaynaklı bu etkilerin yapıya zarar verebileceği durumlarda, yapının bu etkilere dayanabilecek şekilde yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

ACI Committee 371., 2008. Guide for the Analysis, Design, and Construction of Elevated Concrete and Composite Steel - Concrete Water Storage Tanks.

Abramson, H.N., 1966. Dynamic Behaviour of liquids in moving containers with application to space vehicle technology, NASA-SP-106.

Akyıldız, H., Çelebi, M.S., Numerical Computation of Pressure in a Rigid Rectangular Tank Due to Large Amplitude Liquid Sloshing, Turkish J. of Eng. And Env. Sciences, Vol 25, No.6, 2001

Akyıldız, H., Ünal, E., 2004. Experimental studies on liquid sloshing. I.T.U. Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering. Department of Ocean Engineering, Final Report, TR 04/03

A. K. Chopra, 2000. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall

Celep, Zekai (2011) Yapı Dinamiği, 86-430.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına İlişkin Yönetmelik, 2007.

Faltinsen O.M., 1974. A Non Linear Theory of Sloshing in Rectangular Tanks, J. Of Ship Research, Vol.18,No.4,pp 224-241

Faltinsen OM., Timokha AN., 2009 Sloshing. Cambridge University Press New York, USA.

Haroun M.A, 1985 Seismically induced fluid forces on elevated tanks” , Journal of technical topics in civil engineering , Vol. 111

Harlow,F.H., Welch,J.E.1965. Numerical calculation of time dependent viscous incompressible flow of fluid with a free surface. The Physics of Fluids 8,2182–2189.

Hirt, C.W., Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries. J. Comput. Phys. 39, 201-225.

İbrahim RA, Pilipchuk VN, Ikeda T (2001) Recent Advances in Liquid Sloshing Dynamics. Applied Mechanical Review 54(2):133-199.

Solaas, F., Faltinsen, O.M., 1997. Combined numerican and analytical solution for sloshing in two dimensional tanks of general shape. Journal of Shipresearch 41 (2), 118-129.

Su T.C., Lou Y.K., Flipse J.E. and Bridges T.J., A Numerical Analysis of Large Amplitude Liquid Sloshing in Baffled Containers, US Department of Transportation, Final Report, MA-RD-940-82046, 1982.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Erhan İnce

Doğum Yeri ve Tarihi: Karabük - 17.05.1979

E-Posta: admin@rivahosting.net

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği