# DALGAKIRAN PLAKALI SIVI İHTİVA EDEN TANKLARIN DEPREM DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

**Y. FAHJAN[1], Z. ÖZDEMİR[2], K. AKGÜL[3] ve M. SOULI[4]**

[1] *Doçent Dr., Deprem ve Yapı Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, Türkiye*
[2] *Yrd Doçent Dr., İnşaat ve Yapı Mühendisliği Bölümü, University of Sheffield, Birleşik Krallık*
[3] *İnşaat Mühendisi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi, Avcılar, Türkiye*
[4] *Profesör, Université des Sciences et des Technologies de Lille, Fransa*
*Email: fahjan@gyte.edu.tr*

**ÖZET:**

Deprem etkisi altında tankların içeriğindeki sıvının çalkalanması sonucu ortaya çıkan hasarların insan hayatını tehlikeye sokacak ve çevre sağlığını tehdit edecek boyutlara vardığı pek çok büyük deprem sonrasında gözlemlenmiştir. Deprem sırasında tanklarda hasara sebep olan yüksek genlikli çalkalanma davranışını kontrol edebilmek amacıyla başvurulan yöntemlerden bir tanesi tankların içine dalgakıran plakaların yerleştirilmesidir. Bu dalgakıran plakalar tankların içinde meydana gelen çalkalanma davranışını iki farklı şekilde etkiler. Birincisi, bu plakalar çalkalanma hareketinin sönümünü arttırırlar. İkinci olarak da, dalgakıran plakalar tankın içindeki çalkalanmanın doğal titreşim frekanslarını değiştirirler.
Dalgakıran plakalı tankların içindeki sıvının çalkalanma davranışını analitik, deneysel ve nümerik olarak incelemek mümkündür. Tankların içinde meydana gelen çalkalanma davranışını belirlemekte nümerik simülasyonların kullanılması, deneysel ve analitik çalışmalardan daha ekonomik ve daha hızlı çözüme ulaşılmasını sağlamaktadır. Çalkalanma problemleri için sıvı-katı etkileşimini dikkate alan nümerik yöntemler kullanıldığında, sonlu elemanlar ağındaki eleman boyutları, analiz süresi ve hafıza gereksinimlerini etkilediğinden ve nümerik stabilite sorunlarına yol açabildiğinden çok dikkatli seçilmeleri gerekmektedir. Böylece, bu çalışmada, sonlu elemanlar yönteminin doğrusal elastik olmayan sıvı-katı etkileşim algoritmaları kullanılarak iki boyutlu dalgakıran plakalı tanklarda meydana gelen sismik çalkalanma olayı incelenecektir. Çalışmanın ilk aşamasında, kullanılacak nümerik metot literatürdeki analitik ve deneysel çalışmalar ile doğrulanacaktır. Sonlu elemanlar yönteminin sıvı-katı etkileşimi algoritmaları pahalı olduğundan, analiz süresi ve sonuçların doğruluğu bakımından optimum sonucu elde etmek için, farklı ağ (mesh) eleman boyutlarına sahip tank modelleri hazırlanarak analiz için en uygun model belirlenecektir.

**ANAHTAR KELİMELER :** Dalgakıran Plakalar, Tankların Deprem Analizi, Katı-Sıvı Etkileşimi, Sonlu Elemanlar Metodu

## 1. GİRİŞ

Sıvı ihtiva eden dalgakıran plakalı dikdörgen tanklar üzerine yapılan çalışmalar nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Sıvı tanklarda sönüm etkinliğinin artırılması için yapılan çalışmalar çok sayıda araştırmacının konusunu teşkil etmiştir.

Biswal (2003),hem rijit hem de esnek dalgakıran plakalarının göz önüne alan nümerik çalışmalar yapmıştır. Dalgakıran plakalarının sıvı serbest yüzeyine yakın bölgelere yerleştirildiğinde sönüm etkisinin arttığına dair sonuçlara ulaşmıştır.

Akyıldız ve Ünal (2004), salınım altında yatay ve düşey dalgakıran plakalı dikdörtgen tanklar üzerinde sayısal inceleme yapmıştırlar. Ayrıca basınç değişimi üzerine sayısal ve deneysel çalışmalar yapmış ve sıvı çalkalanma yükünün üç boyutlu ektisinin kısmi dolu hareketli dikdörtgen tanklar üzerindeki etkilerini incelemiştirler.

Dalgakıran plakalı ve plakasız durumda sıvı çalkalanmasının doğrusal olmayan davranışı ve sönüm karakteristiği için, sıvı hacim tekniğine dayanan bir sayısal algoritma kullanmıştırlar.

Cho ve diğerleri (2005), 2 boyutlu ankraj plakalı dikdörtgen tankın yatay harmonik hareket altında içerisindeki sıvının rezonans çalkalanma davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalkalanma akışı doğrusallaştırılmış potansiyel akış teorisine dayanarak formüle edilmiştir. Frekans alanında rezonans çalkalanma analizi için sonlu eleman programı geliştirilmiştir.

Biswal ve diğerleri (2006), sinüzoidal zemin hareketi altında sıvı ile dolu iki boyutlu dalgakıran plakalı rijit dikdörtgen tanklarda, sıvının doğrusal olmayan çalkalanma genliğini Eulerian-Lagrangian sonlu eleman formülasyonu kullanarak belirlemişlerdir. Aynı zamanda bu yöntemi çalışmada dairesel dalgakıran plakalı silindirik tanklara da uygulamışlardır.

Arafa (2007), rijit dikdörtgen tanklardaki sıvının çalkalanma davranışını incelemek amacı ile sıvı-tank etkileşim problemi için sonlu eleman formülasyonu geliştirmiştir. Yatay yer hareketine maruz tanklarda sıvı çalkalanmasını; çalkalanma frekansı, sıvı hızı, serbest yüzey deplasmanı ve hidrodinamik kuvvetler açısından incelemiştir. Modele ayrıca düşey ve yatay dalgakıran plakaları ekleyerek, dalga kıran plakalarının çalkalanma frekansı ve serbest yüzeyin zorlanmış titreşimi üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Firouz ve diğerleri (2008), değişken geometrili 3 boyutlu dalgakıran plakalı tanklarda çalkalanan sıvının mod şeklini ve doğal frekansını belirlemek için sınır eleman yöntemi geliştirmiştirler. Değişken geometrili tanklarda çalkalanma frekansının belirlenmesi için sayısal model kurmuşturlar.

Liu ve Lin (2009), 3 boyutlu dalgakıran plakalı tanklarda sıvı çalkalanmasını incelemek için sayısal model geliştirmişlerdir. Elde edilen sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Isacson ve Premasiri (2001), yatay salınım altındaki sıvı ile dolu dikdörtgen tanklarda dalgakıran plakaları sebebiyle oluşan hidrodinamik sönümlemeyi araştırmak üzere deneysel çalışma yapmıştır. Hidrodinamik sönümün tahmini, çalkalanma hareketi ile ilişkili sıvının toplam enerjisinin değerlendirilmesi ve dalgakıran plakalarının etrafında sıvı akışının ayrılmasından dolayı oluşan ortalama enerji dağılımını içermektedir. Hidrodinamik sönümü ölçme deneyleri, teorik modelleri doğrulamak ve çeşitli dalgakıran plaka konfigürasyon etkilerini incelemektir.

Goudarzi ve diğerleri (2009), kısmi dolu dikdörtgen tanklarda harmonik salınım altında yatay ve dikey dalgakıran plakaları ile sağlanan hidrodinamik sönümlemeyi deneysel olarak araştırmış ve sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Serbest titreşen sistemde logaritmik azaltma metodu uygulanmıştır. Bu yöntemde tank kararlı duruma gelene kadar yada en büyük serbest yüzey deplasmanının yapana kadar rezonans frekansında salınım yaptırılmış sonra hızlıca durdurularak serbest yüzey deplasmanının sönüm oranı izlenmiştir.

Panigrahy (2009), dalgakıran plakalı ve plakasız tanklarda tank çeperinde oluşan basınç ve suyun serbest yüzey yer değiştirmesini tahmin etmek için analitik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada titreşim masası üzerine yerleştirilen dikdörtgen tank modeli kullanılmıştır Sallama sehpasının frekansını ve su seviyesini değiştirmek suretiyle deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmada analiz süresi, hafıza gereksinimleri, nümerik stabilite ve sonuçların doğruluğu dikkate alınarak, en uygun iki boyutlu sonlu elemanlar ağı LS-DYNA yazılımı ile belirlenmiştir. Doğrusal elastik olmayan sıvı-katı etkileşim algoritmalarının güvenilirliği için literatürde deneysel olarak incelenen dalgakıran plakalı tank modellerine uygun LS-DYNA modelleri hazırlanıp, analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel ve nümerik çalışmalar sonucu elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan yöntemlerin güvenilirliğin kanıtlanmasının ardından etkin dalgakıran boyunun ve yüksekliğinin belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır.

## 2. SIVI-KATI ETKİLEŞİMİNİNDE DOĞRUSAL OLMAYAN YÖNTEMLER

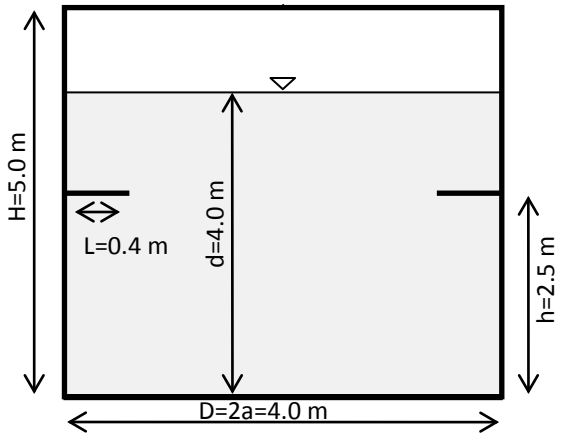
Sıvı-yapı etkileşimini içeren tankların sismik analizi karmaşık bir problemdir. Karmaşıklığın temelinde tankın ince cidara sahip bir yapı olması, cidarın eksenel ve çevresel esnemelerinin ve çalkalanan sıvının modlarının çoklu dinamik tepkilerinin olması, içerikteki sıvının ve titreşen cidarın doğrusal olmayan bir davranışa sahip olması ve tank cidarının burkulma şekil değiştirme modlarını içermesi yatar. Ayrıca, tankın çatısının olması sistemin davranışında büyük değişikliklere sebep olur. Bütün bu etkenleri göz önüne alarak tank-sıvı sisteminin gerçek sismik davranışının analitik yöntemler yardımıyla belirlenmesi mümkün değildir. Analitik yöntemler hem yapının hem de içerikteki sıvının davranışı ile ilgili pek çok varsayım yapılarak geliştirilirler. Tankların sismik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi oldukça masraflıdır. Tank-sıvı sistemlerinin gerçek davranışlarının incelenmesi için en iyi yöntem nümerik metotların kullanılmasıdır. Günümüzde, mevcut bilgisayar programları ile tank-sıvı sisteminin sahip olduğu bütün nonlineer davranış kaynaklarını dikkate alarak sistemin dinamik tepkisini incelemek mümkündür.

Önerilen proje kapsamında, sonlu elemanlar yöntemini kullanan LS-DYNA programı ile iki ve üç boyutlu sıvı ihtiva eden dalgakıran plakalı tankların sismik analizleri yapılacaktır. Tank ve sıvının malzeme özellikleri için gerçek değerler kullanılacak; yer hareketi olarak Türkiye'de meydana gelen depremlerden seçilen kayıtlar uygulanacaktır. LS-DYNA simülasyonlardan elde edilen sonuçlarla problemin sadece önemli parametrelerini gösteren basit analitik metotların yeterli yaklaşıklığa sahip olup olmadığı incelenecektir.

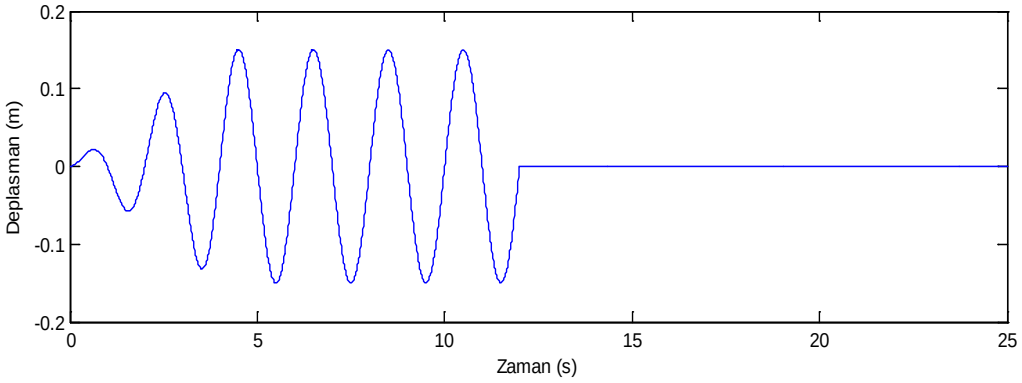
LS-DYNA, sıvı-yapı etkileşimi de dâhil olmak üzere, çeşitli türdeki dinamik mühendislik problemleri için başarıyla kullanılabilen dolaylı (explicit) sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu çalışmada, yüksek derecedeki esnekliği ve doğrusal elastik olmayan davranışları modelleyebilme başarısından ötürü LS-DYNA sayısal analiz platformu olarak seçilmiştir. Ayrıca, mevcut malzeme modellerinin çokluğu ve sıvı ve yapı malzemelerinin şekil değiştirme oranı hassaslığını (Strain Rate Sensibility) da modelleyebilmesi LS-DYNA programının sağladığı avantajlar arasında yer almaktadır.

## 3. SONLU ELEMANLAR AĞININ OLUŞTURULMASI

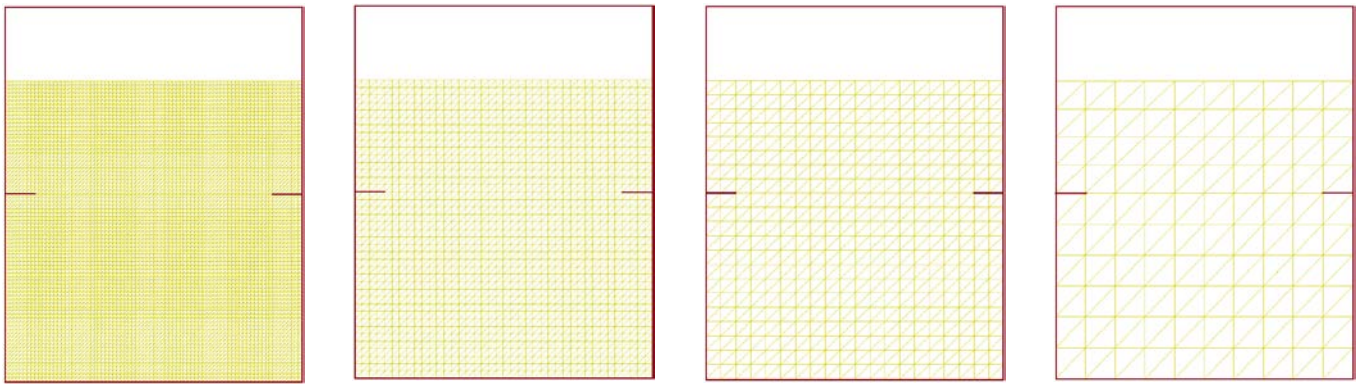
Nümerik analizde ağ boyutunu belirlemek için seçilen iki boyutlu tankın boyutları Şekil 1'de gösterilmiştir. Tank modelinde ağ boyutunun seçimini yaparken analiz süresi, hafıza gereksinimleri ve nümerik stabilite gibi etkenler göz önüne alınmalıdır. Bu açıdan sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan modelin optimum ağ (mesh) boyutunu belirlemek için dört farklı modeller hazırlanmıştır. (Şekil 3)Hazırlanan modellerin seçilen giriş hareketi altında(Şekil 2) analizi gerçekleştirilmiştir




Şekil 1. Genel Tank Modeli




Şekil 2. Ağ(mesh) Hassasiyeti İçin Kullanılan Hareket Kaydı



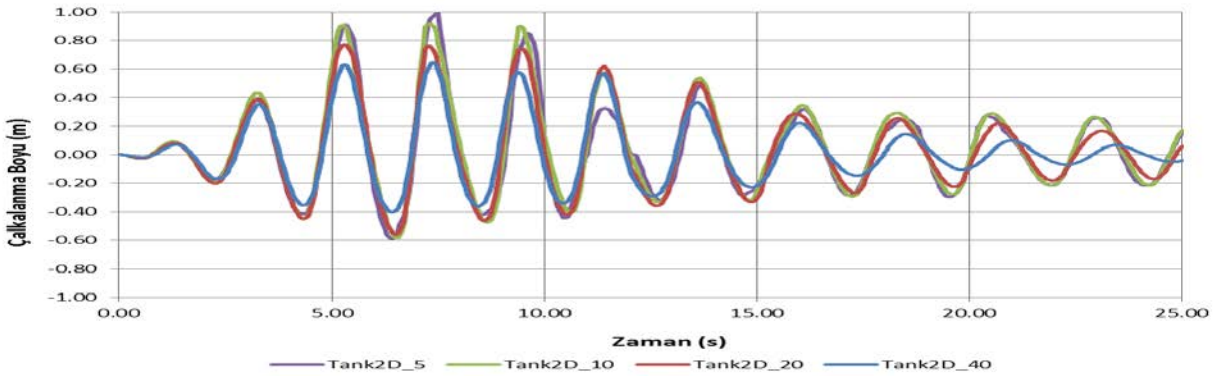
(a) (b) (c) (d)

Şekil 3. Ağ(Mesh) Boyutları;0.5m(a),0.1m(b),0.2m(c),0.4m(d)

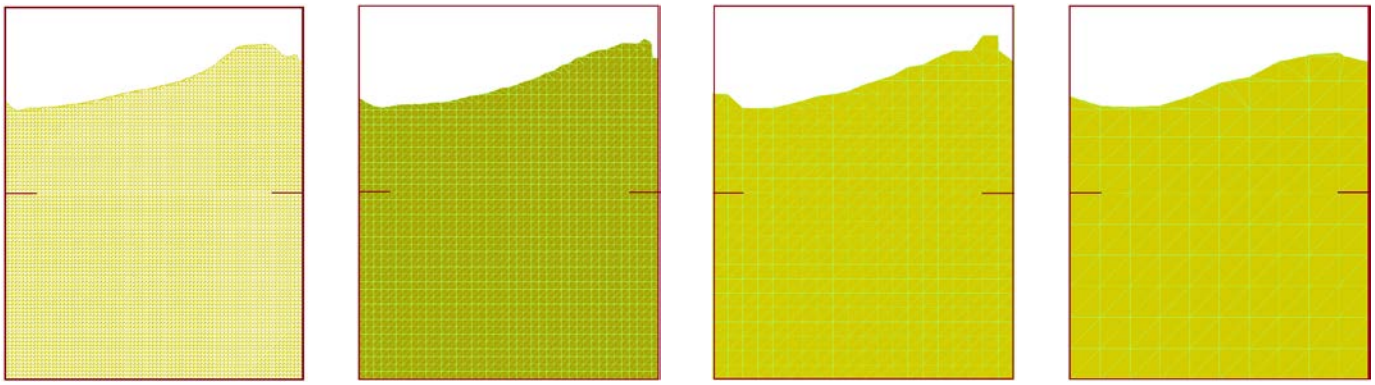
Yapılan analizler sonucunda ağ(mesh) boyutunun düşürülüp, eleman sayısının arttırılmasıyla işlem süresinin arttığı gözlemlenmiştir (Tablo 1). Çalkalanma yüksekliklerinin karşılaştırılması ise Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmiştir. Ağ boyutundan optimum değerinden sonra, ağ boyutunun küçültülmesi işlem süresi önemli ölçüde arttırırken, elde edilen sonuçların çok fazla değişmediği gözlenmiştir. Yapılan nümerik analizler sonucu dalgakıran elemanının en az 2,tank elemanının en az 20 parçaya bölünmesi optimum sonlu elemanlar ağını oluşturmamızı sağlamaktadır.

Tablo 1: Farklı Ağ (Mesh) Boyutları İçin Analiz Süreleri

| Model İsmi | Ağ Boyutu (m) | İşlem Süresi (s) |
|---|---|---|
| Tank2D_5 | 0.05 | 96387 (26h 44m 27s) |
| Tank2D_10 | 0.10 | 11678 (3h 14m 38s) |
| Tank2D_20 | 0.20 | 2030 (0h 33m 50s) |
| Tank2D_40 | 0.40 | 288 (0h 4m 48s) |




Şekil 4. Farklı Ağ (Mesh) Boyutları İçin Çalkalanma Yüksekliklerinin Karşılaştırılması



(Tank2D_5) (Tank2D_10) (Tank2D_20) (Tank2D_40)

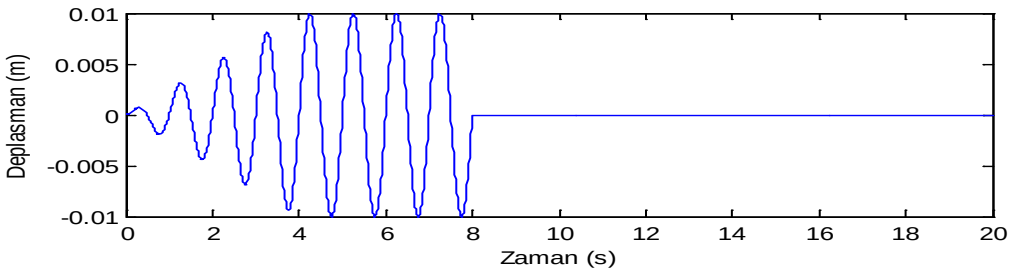
Şekil 5. Farklı Ağ (Mesh) Boyutları İçin Çalkalanma Yükseklikleri (Zaman adımı 14.4 s)

## 4. KALİBRASYON ÇALIŞMALARI

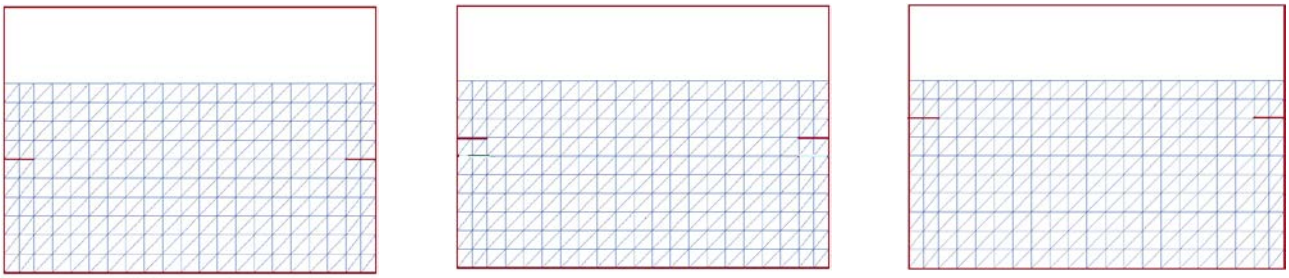
Isacson ve Premasiri (2001), harmonik harekete maruz dalga kıran plakalı dikdörtgen bir tankın içindeki sıvının davranışını incelemek için bir seri deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Tank 0,5m uzunluğunda, 0,5m genişliğinde ve 0,5m yüksekliğindedir. Dalgakıran plakasının boyu 0.04m ve su seviyesi 0.25m olarak sabit tutulmuş ve deneyler dalga kıran plakasının üç farklı seviyesi için yapılmıştır. Analizde genliği 0.01 m olan harmonik hareket kullanılmıştır.(Şekil 6) Tank kararlı duruma gelene kadar yada en büyük serbest yüzey deplasmanının yapana kadar rezonans frekansında salınım yaptırılmış, sonra hızlıca durdurularak serbest yüzey deplasmanının sönüm oranı izlenmiştir. Çalkalanma boyları zamanla değişimi grafikler halinde sunulmuş ve Isacson ve Premasiri (2001) elde ettiği deneysel ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada Isacson ve Premasiri (2001), çalışmasında kullanılan tank modelleri kullanılarak dalgakıran plakalı tankların nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Tank parametreleri Tablo 2'de verilirken, modelleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Isacson Ve Premasiri (2001) Çalışmasında Kullanılan Tank Modelleri

| Model Adı | h/d | h (m) | Ağ Boyutu (m) |
|---|---|---|---|
| Isaacson _A | 0.6 | 0.15 | 0.025 |
| Isaacson _C | 0.7 | 0.175 | 0.025 |
| Isaacson _D | 0.8 | 0.20 | 0.025 |



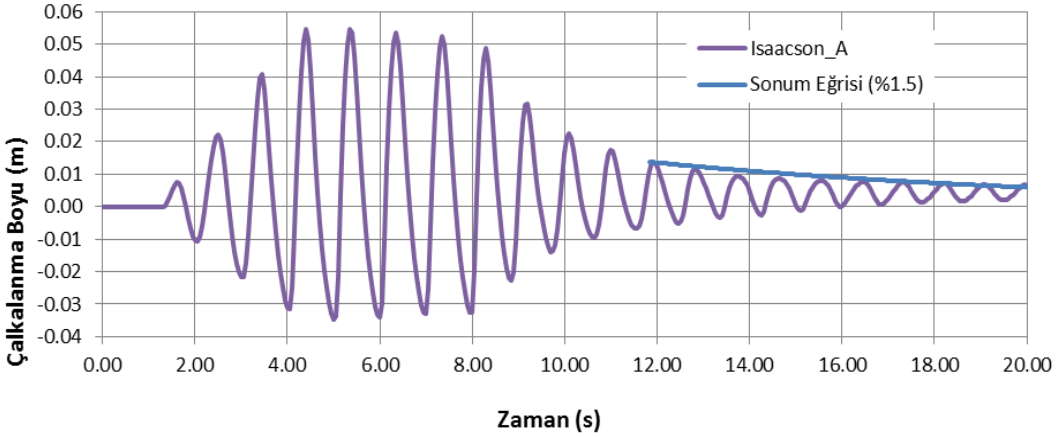

Şekil 6. Isacson Ve Premasiri (2001) Deneylerinde Kullanılan Hareket Kaydı



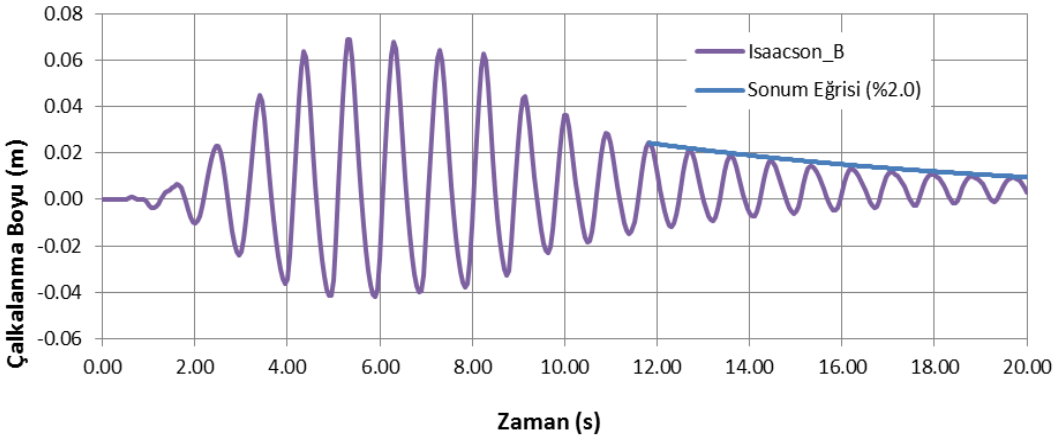
Model - Isaacson _A  Model - Isaacson _B  Model - Isaacson _C

Şekil 7. Isacson ve Premasiri (2001) deneylerinde kullanılan tank modelleri

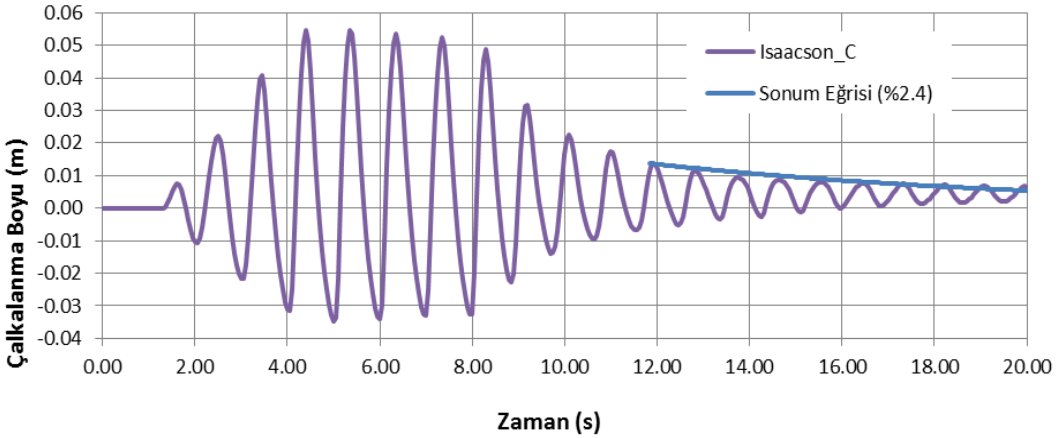
LS-DYNA programı ile gerçekleştirilen nümerik analiz sonucu elde edilen çalkalanma yükseklikleri Şekil 8-Şekil 10'da gösterilmiştir. Sönüm oranlarının karşılaştırılması ise Tablo 3'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Model Isaacson_A için Sıvı Serbest Yüzeyi Yüksekliğinin Zamanla Değişimi ve Sönün Oranı




Şekil 9. Model Isaacson_B için Sıvı Serbest Yüzeyi Yüksekliğinin Zamanla Değişimi ve Sönün Oranı



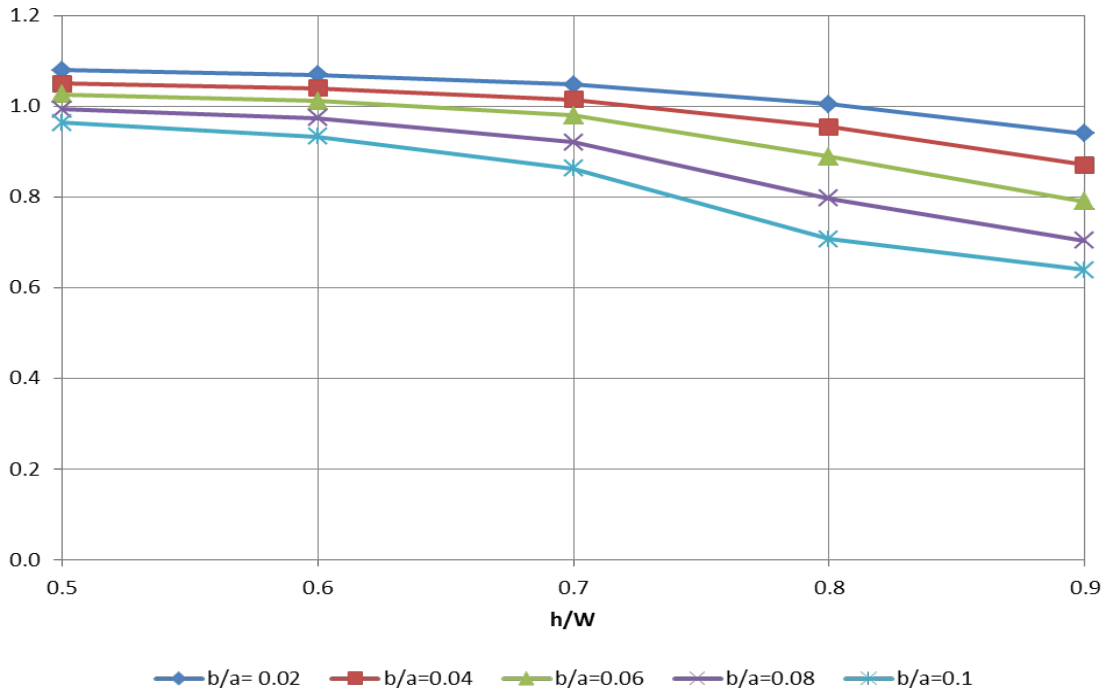

Şekil 10. Model Isaacson_C için Sıvı Serbest Yüzeyi Yüksekliğinin Zamanla Değişimi ve Sönün Oranı

Tablo 3: Isacson ve Premasiri (2001) çalışmasında elde edilen sönüm oranlarının nümerik çalışmada elde edilen değerlerle karşılaştırılması

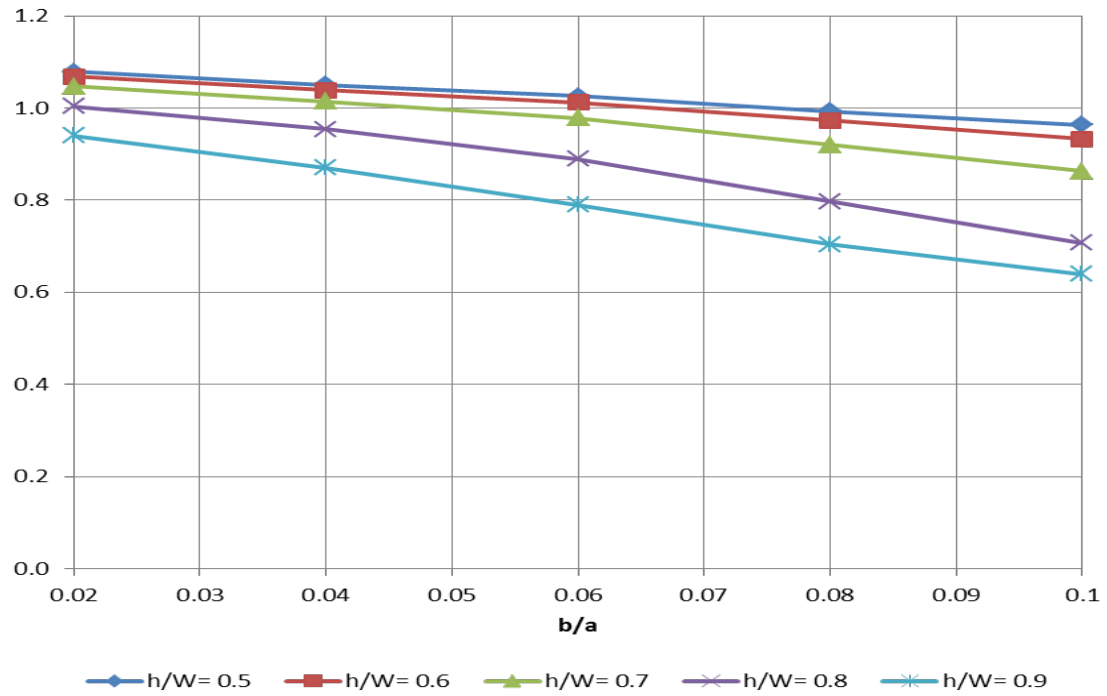
| Model Adı | $\zeta$ DENEYSEL | $\zeta$ ANALİTİK | $\zeta$ LS-DYNA |
|---|---|---|---|
| Isaacson _A | 0.013 | 0.018 | 0.0150 |
| Isaacson _B | 0.018 | 0.031 | 0.020 |
| Isaacson _C | 0.025 | 0.050 | 0.024 |

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Nümerik yöntemin güvenilirliği kanıtladıktan sonra dalgakıran plakalı tankların deprem etkisi altında davranışını değerlendirilmiştir. Literatürde yer alan tank parametrelerine uygun olarak seçilen 25 adet dalgakıran plakalı tank modelinin 7 adet deprem etkisi alında analizi gerçekleştirilmiştir. Tank modelinin dalgakıran plakasız durumu için çalkalanma dalga yüksekliği seviyesi her bir model için belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler, dalgakıran plakasının her farklı boyutu ve konumu için elde edilen çalkalanma dalga yüksekliği seviyeleri ile karşılaştırılmıştır. Dalgakıran plakası boyunun çalkalanma yüksekliğine etkisi Şekil 11'de, Dalgakıran plakası boyunun çalkalanma yüksekliğine etkisi ise Şekil 12'de gösterilmiştir.




Şekil 11. Sıvı Tanklarda Dalgakıran Plakası Boyunun Çalkalanma Yüksekliğine Etkisi




Şekil 12. Sıvı Tanklarda Dalgakıran Plakası Konumunun Çalkalanma Yüksekliğine Etkisi

Yapılan analizler sonucu dalgakıran plakasının çalkalanma yüksekliğini her zaman azaltmadığı tam tersine arttırdığı gözlenmiştir. Sonuç olarak; tanklarda dalgakıran plakası boyunun çalkalanma yüksekliğine etkisinin en büyük olduğu durum b/a =0.1 iken dalgakıran plakası konumunun çalkalanma yüksekliğine etkisinin en büyük olduğu durum h/W =0.9 oranıdır.

## TEŞEKKÜR

Çalışmamız, Tübitak - Fransa PIA Bosphorus İşbirliği Programı kapsamında ve 111M382 / 26290ZG nolu projeile desteklenmiştir. Her iki kuruma desteklerinden ötürü teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

Isaacson, M., Premasiri, S., 2001. Hydrodynamic damping due to baffles in a rectangular tank. Canadian Journal of Civil Engineering 28 (4), 608–616.

Biswal KC, Bhattacharyya SK, Sinha PK (2003a) Dynamic characteristics of liquid filled rectangular tank. J Inst Eng (India) 84:145–148.

Aquelet N., Souli M., Gabrys J., and Olovson L., A new ALE Formulation for Sloshing Analysis, Structural Engineering and Mechanics, 16, 4, (2003).

Akyildiz H, Unal E (2004) Experimental studies on liquid sloshing. Technical Report, Department of Ocean Engineering and Hydraulics Division, Istanbul Technical University.

Cho, J.R., Lee, H.W., Ha, S.Y., 2005. Finite element analysis of resonant sloshing response in a 2D baffled tank. Journal of Sound and Vibration 228 (4–5), 829–845.

Akyildiz, H., Unal, E., 2005. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing. Ocean Engineering 32, 1503–1516.

Biswal K. C., Bhattacharyya S. K., and Sinha P. K., Non-linear sloshing in partially liquid filled containers with baffles, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 68, 317–337, (2006).

P. K. Panigrahy, U. K. Saha, and D. Maity, “Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks,” Ocean Engineering, vol. 36, no. 3-4, pp. 213–222, 2009.,

Goudarzi M. A., S.R. Sabbagh-Yazdi, and Marx, W., Investigation of sloshing damping in baffled rectangular tanks subjected to the dynamic excitation, Bulletin of Earthquake Engineering, 8, 4, 1055-1072, (2009).