



Farklı doluluk ve uyarma koşullarında sıvı çalkantısının görüntü işleme ve lineer teori yaklaşımı ile analizi

Analysis of liquid sloshing under different filling levels and excitation conditions using image processing and linear theory approach

Burak Erdoğan^{1,*} , Selahattin Kocaman²

¹ Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Antakya Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü, 31060, Antakya, Hatay, Türkiye

² İskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 31200, İskenderun, Hatay, Türkiye

Öz

Bu çalışma, sıvı çalkantısı hareketlerinin dinamik davranışlarını, farklı doluluk oranları, uyarma frekansları ve genlikleri altında görüntü işleme teknikleri ve lineer teori kullanılarak incelemeyi amaçlamaktadır. Deneyel analizlerde, dikdörtgen bir tank içerisindeki sıvının doğal frekanslarına yakın koşullarda çalkantı hareketlerindeki değişim değerlendirilmiştir. Tank, farklı doluluk oranlarındayken farklı genliklerde sinüzoidal hareketlere maruz bırakılmış; sıvı yüzeyindeki çalkantının genlik, frekans ve doluluk oranı gibi parametrelere duyarlılığı hem görüntü işleme teknikleri hem de lineer teori çerçevesinde analiz edilmiştir. Bulgular, uyarma frekansının $1.10 f_1$ olduğu rezonans üstü frekans koşulunda ve düşük uyarma genliğinde lineer teorisinin dalga genliğini tahmin etmede başarılı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte uyarma frekansının $0.90 f_1$ olduğu rezonans altı frekans ve yüksek genlik koşullarında ise dalga şekli ve faz farkı açısından doğruluğunun belirgin biçimde azaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, doluluk oranının artmasının çalkantı hareketlerini stabilize ettiği, yüksek genliklerin ise çalkantıyı şiddetlendirdiği belirlenmiştir. Çalışma, mühendislik uygulamalarında sıvı taşıyan tankların güvenliği ve stabilitesini artırmak adına önemli bulgular ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Çalkantı, Doğal frekans, Lineer teori, Sıvı tankı, Görüntü işleme

1 Giriş

Çalkantı, bir tank içindeki kısmen dolu sıvının, dış kuvvetlere (örneğin, bir aracın ivmelenmesi, fren yapması, dönüş yapması veya bir geminin dalga hareketlerine maruz kalması gibi) tepki olarak serbest yüzeyinde meydana gelen dalgalanma hareketidir. Çalkantının karakteri; sıvının tank içindeki hareketleri, doluluk seviyesi, tankın karşılaştığı dış kuvvetin niteliği, tankın şekli ve sıvının fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir [1]. Doluluk oranı, tank içindeki çalkantı hareketini belirleyen önemli bir etkidir. Doluluk oranı kritik değerin ($h/L \approx 0.34$) altındaysa sistem sert yay davranışı gösterir ve dalga büyüdükçe rezonans frekansı yükselebilir. Doluluk oranı kritik değerin üzerine çıktığında ise sistem yumuşak yay davranışı gösterir; bu

Abstract

This study investigates the dynamic behavior of liquid sloshing under various filling ratios, excitation frequencies, and amplitudes by employing image processing techniques and linear theory. In the experimental analysis, sloshing behavior was evaluated in a rectangular tank under conditions close to the natural frequencies of the contained liquid. The tank was subjected to sinusoidal motions with different amplitudes at various filling levels, and the sensitivity of the free surface response to key parameters - such as excitation amplitude, frequency, and filling ratio - was analyzed using both image processing methods and linear theory. The results indicate that under resonance-over excitation ($f_e = 1.1f_1$) and low-amplitude conditions, linear theory successfully predicted the wave amplitude. However, under resonance-under excitation ($f_e = 0.90 f_1$) and high amplitude, significant discrepancies were observed in terms of wave shape and phase, revealing a notable reduction in accuracy. Furthermore, higher filling ratios were found to stabilize the sloshing motion, while increased excitation amplitudes intensified the wave dynamics. The findings of this study provide valuable insights for enhancing the safety and stability of liquid-containing tanks in engineering applications.

Keywords: Sloshing, Natural frequency, Linear theory, Liquid tank, Image processing

durumda dalga büyüdükçe rezonans frekansı azalabilir ve çalkantı hareketi belirginleşerek yüzeydeki dalgalanmalar daha geniş bir alana yayılır. Bu nedenle, büyük dalgalar oluşturmak ve rezonans durumunu korumak için tankın salınım frekansı doluluk oranına göre bazen artırılmalı, bazen de azaltılmalıdır [2]. Çalkantı problemi, birçok mühendislik disipliniinde ciddi bir sorun olarak kabul edilmektedir. Çalkantı hareketinin yaratacağı olumsuz etkiler özellikle inşaat, uzay, denizcilik ve nükleer mühendisliği gibi alanlarda ön plana çıkmaktadır. Gemi balast tanklarından uzay aracı yakıt sistemlerine, nükleer reaktörler dahil olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesinde çalkantı hareketinin önemi büyüktür. Deniz taşımacılığında kara taşıtlarına, havacılığa kadar birçok

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: burakerdogan@mku.edu.tr (B. Erdoğan)

Geliş / Received: 05.05.2025 Kabul / Accepted: 28.07.2025 Yayımlanma / Published: 15.10.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1692207

alandaki karşılaşılan bu fenomen, mühendislikte karşılaşılan karmaşık ve geniş çaplı bir problem olarak dikkat çekmektedir. Bu nedenle, çalkantının yol açtığı zararların öngörülmesi ve sıvı tanklarının stabilitesine zarar verebilecek bu sorunun engellenmesi büyük bir önem arz etmektedir. Tank içindeki sıvı, sayısız doğal frekans değerlerine sahiptir. Dış kaynaklı uyarıların, tanktaki sıvının doğal frekanslarından biriyle aynı veya yakın frekansta olması durumunda, sıvı içinde yoğun çalkantı hareketleri ortaya çıkmaktadır [3]. Tankın hareket frekansının sıvının doğal frekansı ile uyum sağladığı bu durum, rezonans olarak adlandırılır. Çalkantıyla ilgili yapılan çalışmaların çoğu, genellikle sıvının birinci mod doğal frekans değerine odaklanarak yürütülmüştür. Çalkantı probleminin çözümüne yönelik ilk adım, iki ana değişkenin belirlenmesiyle gerçekleşmektedir. Bunlardan ilki, çalkantı hareketi nedeniyle serbest sıvı yüzeyinde meydana gelen değişiklikler, ikincisi ise çalkantı etkisiyle tank duvarlarında oluşan hidrodinamik kuvvetlerin belirlenmesidir [4]. Çalkantı deneylerinde serbest yüzeyin ölçülmesi için kapasitif probalar, ultrasonik sensörler, lazerler ve optik kameralar kullanılır [5]. Kapasitif probalar, elektrotlar arasındaki sıvı seviyesindeki değişiklikleri algılayarak oldukça hassas sonuçlar verir, ancak bu yöntem temas gerektirir ve iletken akışkanlarla kullanıldığında sorunlar ortaya çıkabilir. Ultrasonik sensörler, dalgaların uçuş süresini ölçerek temasız ölçümler sunar, fakat yoğun çalkantı hareketi sırasında güvenilirlikleri düşebilir. Lazer tabanlı sistemler, doppler etkisini kullanarak temasız olarak sıvı seviyesini belirler, ancak bu sistemler maliyetlidir ve aşırı çalkantı durumlarında performansları azalabilir. Optik kameralar ise temasız bir yöntemle video kaydı yaparak serbest yüzeydeki çalkantı hareketini analiz eder, ancak bu analiz gerçek zamanlı olmadığından veri işleme için ek süre gerekebilir [5]. Çalkantı kuvvetinin ölçülmesinde ise yük hücreleri ve basınç sensörleri kullanılır. Yük hücreleri, çalkantı sırasında üretilen kuvveti ölçerek güvenilir sonuçlar verir, ancak deney tankında sıvı varlığında ve yokluğunda olmak üzere iki aşamalı ölçüm yapılmasını gerektirebilir. Basınç sensörleri, konteyner duvarlarındaki farklı konumlarda toplanan basınç verilerini entegre ederek akışkan kuvvetini tahmin eder ve güvenilir sonuçlar sağlar, fakat birden fazla basınç sensörünün kullanılmasını gerektirebilir [5].

Çok sayıda araştırmacı, sıvı çalkantısının çeşitli değişkenlerden nasıl etkilendiğini araştırmak ve çalkantı problemini detaylı bir şekilde ele alabilmek için, geçmişte yapılan çalışmalardan elde edilen verilere dayanarak farklı araştırma tekniklerinden faydalanmıştır. Sıvı çalkantısını detaylıca incelemek için kullanılan önde gelen yöntemler arasında, potansiyel akış prensiplerine dayalı teorik incelemeler, çeşitli akış denklemlerinin analizine yönelik sayısal yaklaşımlar ve ölçeklendirilmiş fiziksel modeller üzerinde yürütülen deneysel çalışmalar bulunmaktadır [6]. Teorik analizler genellikle akışkan dinamiğine dair bazı varsayımlara dayanarak gerçekleştirilir ve bu yöntemler hızlı hesaplama olanağı sağlar. Ancak, çalkantı sonucu ortaya çıkan doğrusal olmayan serbest yüzey hareketlerini bu analizlerle tam olarak tahmin etmek zordur. Fiziksel model

testleri güvenilir veriler sağlar, ancak model ölçeklendirme belirsizlikleri bu yaklaşımın uygulanabilirliğini kısıtlayabilir. Son dönemde, sıvı çalkantısının incelenmesinde sıkıştırılamaz Navier-Stokes veya Laplace denklemlerine dayalı sayısal simülasyonlar öne çıkan bir yöntem haline gelmiştir [6]. Çalkantı probleminin dinamik ve serbest yüzey özellikleri, üç boyutlu Navier-Stokes denklemlerini bu problemi modellemek için en uygun hale getirmektedir. Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler, üç boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) denklemlerine dayanan ve çeşitli türbülans modellerini içeren hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımlarının kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu yazılımlar, çalkantı probleminin çözümünde önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Teknolojik gelişmeler sayesinde, bilgisayarlar çalkantı problemlerini daha hızlı çözebilmekte ve doğrusal olmayan yapıya rağmen çözüm gerçekleştirebilmektedir. Deneysel yöntemlerin her zaman mümkün olmadığı durumlarda, sayısal simülasyonlar önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu yöntemlerle, deneysel olarak belirlenmesi zor olan hız ve basınç gibi parametreler kolaylıkla elde edilebilir [7]. Çalkantı probleminin çözümü, sıvının serbest yüzeyinin doğru tahmin edilmesine dayanır. Serbest yüzeyin pozisyonu genellikle yalnızca başlangıçta bilinir. Serbest yüzeye sahip akış sorunlarında, serbest yüzeyin hareketli sınırları ilgili noktaların tespitini zorlaştırır. Son yıllarda, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) alanında kullanılan ticari yazılımlar arasında sonlu hacim metodu daha çok tercih edilmektedir. Navier-Stokes denklemlerine dayanan bu yöntem, serbest yüzeyli akışların modellenmesi ve su-hava ara yüzeyinin (serbest yüzeyin) belirlenmesi için çeşitli stratejiler gerektirir. Bu stratejiler arasında en yaygın ve ticari HAD yazılımlarında sıkça yer alan yöntem Akışkan Hacmi (Volume of Fluid, VOF) yaklaşımıdır [8].

Çalkantı hareketi, bir sıvı tankının hareketi sonucunda oluşan ve içindeki sıvının üzerinde türbülans oluşturan sıçramalar ve yansımalar içerir. Bu nedenle, sıvı yüzeyindeki bu belirgin hareketlerin modellenmesi sırasında türbülans etkilerinin göz önünde bulundurulması gereklidir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) alanında, türbülanslı akışlar farklı yaklaşımlarla çözülebilmektedir. Direkt Sayısal Simülasyon (DNS) gibi yöntemler akışı modellemeden doğrudan çözerken, Büyük Girdap Simülasyonu (LES) ve Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) gibi yaklaşımlar ise çeşitli türbülans modellerinden faydalanır. Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RONS) denklemleri temelli türbülans modelleri diğerlerine göre daha ekonomik bir çözüm sunar ve yaygın şekilde tercih edilir. Bu modeller, akış üzerindeki türbülans çalkantı etkilerini ortalama akım üzerinden hesaplamak için kullanılır. Özellikle k-ε modeli, bu türbülans modelleri arasında en yaygın ve doğruluğu kanıtlanmış olanlardan biridir [9].

Literatürde, çalkantı hareketi üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde, farklı tank geometrileri ve iç bölmelerin konumlandırılması ile ilgili birçok çalışmanın dikkat çektiği görülmektedir. Bu çalışmalar, sıvı akışının çalkantı hareketi üzerindeki etkilerini hem teorik modeller

hem de deneysel veriler aracılığıyla analiz etmektedir. Özellikle iki farklı sıvının çalkantı hareketlerinin teorik ve deneysel yöntemlerle birlikte incelenmesi [10–13], sıvı tanklarına yerleştirilen engellerin çalkantı davranışına olan etkilerinin araştırılması [14–19] ve lineer teoriye dayalı analitik çözümler [20–22] bu alandaki önemli konular arasında yer almaktadır. Ayrıca, sıvının viskoz, sıkıştırılmaz ve irrotasyonel olduğu varsayılarak yapılan analizler de literatürde geniş bir yer tutmaktadır [3].

Bu çalışmanın temel amacı, sıvı çalkantısı probleminin dinamik etkilerini anlamak ve bu hareketin farklı doluluk oranları, uyarma genlikleri ve frekansları altındaki davranışını hem teorik hem de deneysel yöntemlerle analiz etmektir. Literatürde, rezonans frekansına yakın durumlarda lineer teorilerin yetersizliklerini deneysel olarak destekleyen kapsamlı çalışmalar sınırlıdır; bu çalışma, bu eksikliği deneysel verilerle doldurarak katkı sunmayı hedeflemektedir. Çalışmada, lineer teori ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak, çalkantı hareketlerinin genlik, frekans ve doluluk oranı gibi kritik parametrelere olan duyarlılığı değerlendirilmiştir. Ayrıca, düşük ve yüksek genlik/frekans koşullarında lineer teorisinin tahmin başarısının sınırları incelenmiş ve bu teorisinin mühendislik uygulamaları açısından geçerliliği sorgulanmıştır. Özellikle rezonans koşullarına yakın uyarma frekanslarında sıvı yüzeyinde oluşan dalga hareketleri analiz edilmiştir. Çalkantı probleminin mühendislik uygulamalarındaki önemini vurgulayan bu çalışma, sıvı taşıyan tankların stabilitesi ve güvenliği açısından gerekli tasarım kriterlerine katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda elde edilen bulguların hem teorik modellerle hem de ileride gerçekleştirilecek deneysel araştırmalar için önemli bir veri kaynağı niteliğinde olduğu düşünülmektedir.

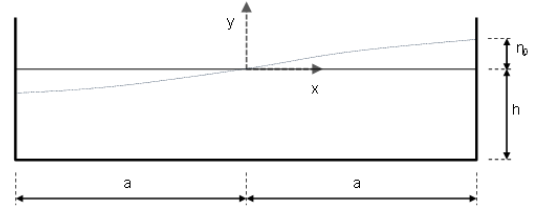
2 Materyal ve metod

2.1 Lineer teori

Lineer teori, bir tank içerisinde kısmen bulunan bir sıvının çalkantı davranışını analiz etmek için potansiyel dalga teorisini temel alan bir analitik çözüm içermektedir [23]. Teori ayrıca sıvı tanklarının sismik tepkilerini ölçmek için de yaygın olarak kullanılmaktadır [20]. Lineer teori, düşük uyarma frekansları ve genliklerinde harekete maruz bırakılan sıvı tanklarında çalkantı hareketini analiz etmek için kullanılan bir yöntemdir. Teori, viskozitenin ihmal edildiği bir akış varsayımı altında iki boyutlu çalkantı hareketlerini ve periyodik yatay taban hareketlerini inceler. Lineer teorisin temel varsayımlarından biri, sıvının viskoz etkilerinin ihmal edilerek davranışın idealize edilmesidir. Teori sayesinde çalkantı hareketi basit matematiksel denklemlerle modellenerek çalkantı davranışının genliği ve frekansı elde edilebilmektedir. Viskozite etkileri, türbülans ve diğer karmaşık faktörler göz önüne alındığında, gerçek dünya uygulamalarında daha gelişmiş sayısal modellerin veya deneysel çalışmaların kullanılması gerekmektedir.

Teorinin anlaşılmasını kolaylaştırmak için sıvı tankının hareketi $X_t = A \sin(\omega t)$ eşitliğiyle incelenmiştir. Bu denklemde ‘A’ sıvı tankının uyarma genliğini, ‘t’ zamanı ve ‘ ω ’ ise tankı uyaran hareketin açısal frekansını temsil

etmektedir. Koordinat sistemi Şekil 1’de gösterildiği gibi hareketsiz su yüzeyinin merkezine göre sabitlenmiştir [7].



Şekil 1. Çalkantı hareketinin şematik diyagramı

Lineer teori sayesinde belirlenen çalkantı yüksekliği (η) iki ayrı bileşene ayrılmaktadır [20]. Bunlar; dış uyarının etkisiyle oluşan çalkantı yüksekliği (η_1) ve sıvı taşınımından kaynaklanan çalkantı yüksekliğidir (η_2).

$$\eta(x, t) = \eta_1(x, t) + \eta_2(x, t) \quad 1$$

$$\eta_1(x, t) = \frac{A}{g} \left(x\omega^2 + \sum_{n=0}^{\infty} C_n \omega \sin(k_n x) \right) \sin(\omega t) \quad 2$$

$$\eta_2(x, t) = -\frac{A}{g} \sum_{n=0}^{\infty} \omega_n \left(C_n + \frac{H_n}{\omega^2} \right) \sin(k_n x) \sin(\omega_n t) \quad 3$$

$$\eta = \frac{A}{g} x\omega^2 \sin\omega t + \frac{A}{g} \left(\frac{8a}{\pi^2} \right) \sin\left(\frac{\pi x}{2a} \right) \left(\frac{\omega^4}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin\omega t - \frac{\omega\omega_0^3}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin\omega_0 t \right) \quad 4$$

$x = a$, noktasında serbest sıvı yüzeyindeki değişim, aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{A}{g} a\omega^2 \sin\omega t \left(\frac{8a^2}{g\pi^2(\omega_0^2 - \omega^2)} \right) (\omega^4 \sin\omega t - \omega\omega_0^3 \sin\omega_0 t) \quad 5$$

$$\omega_n^2 = gk_n \tanh(k_n h) \quad 6$$

$$k_n = \frac{(2n+1)}{2a} \pi \quad 7$$

$$H_n = \omega^3 \left(\frac{2}{a} \right) \left(\frac{(-1)^n}{k_n^2} \right) \quad 8$$

$$C_n = \frac{H_n}{\omega_n^2 - \omega^2} \quad 9$$

Burada ω_n sıvının doğal frekans değerini, k_n ise dalga numarasını ifade etmektedir.

2.2 Deney düzeneği ve yöntem

Dikdörtgen kesitli deney tankı içerisinde bulunan sıvının çalkantı hareketi sonucu davranışı, çalışma kapsamında yapılan deneyler ve kullanılan ölçüm teknikleri ile araştırılmıştır. Deney tankının uzunluğu 40 cm, yüksekliği 30 cm ve genişliği ise 10 cm’dir (Şekil 2). Deney tankı,

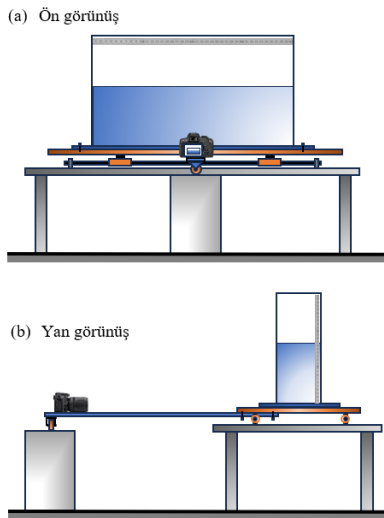
uyarma genliği ve frekansı düzenlenebilen bir titreşim platformu üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3) [7].



Şekil 2. Deney düzeneği

Tankın dar yapısı bilinçli olarak seçilmiş olup, bu sayede sıvının hareketlerinden kaynaklanan üç boyutlu olumsuz etkiler azaltılmıştır. Ayarlanabilir frekans ve genlikteki sarsma tablası, deney tankını belirli uyarma koşulları altında test etmeyi sağlamıştır. Tankın her yüzeyi 4.8 mm kalınlığında şeffaf pleksiglas malzemeden yapılmış olup, bu sayede içerideki sıvının görüntü analizi kolaylaştırılmıştır. Pleksiglas, camdan daha az yansıtıcı, darbeye daha dayanıklı, toz barındırmayan, hafif, kolay işlenebilen ve UV'ye karşı dirençli özellikleriyle tercih edilmiştir.

Deney tankındaki sıvının çalkantı hareketleri, tanka monte edilmiş ve tank ile birlikte eş zamanlı hareket eden bir akıllı telefon kamerası ile 1080p (1920x1080 piksel) çözünürlükte ve saniyede 60 kare hızında kaydedilmiştir (Şekil 3) [7]. Yüksek kare kayıt hızının tercih edilmesinin temel nedeni, çalkantı hareketinin dinamik yapısının ve bu harekete bağlı karmaşık ayrıntıların daha etkin bir şekilde izlenebilmesidir. Bu yerleşim, sıvının hareketlerini, sabit bir tank görünümü altında net olarak gözlemlemeyi mümkün kılmıştır. Sistemin entegre edildiği frekans kontrollü sarsma tablası sayesinde, tankın uyarma genliği ve frekansı belirlenen ölçüm noktaları üzerinden etkin bir şekilde izlenmiştir. Ayrıca, ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla tanka bir çelik metre cetvel yapıştırılmıştır.

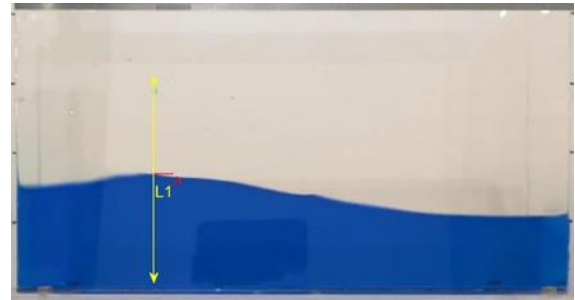


Şekil 3. Deney düzeneği ve kamera yerleşiminin şematik gösterimi (a) ön görünüş (b) yan görünüş

Elde edilen görüntülerin analizi ve işlenmesi, Image-Pro Plus ve ImageJ yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yazılımlar sayesinde, çalkantı hareketine ilişkin metrik ölçümler kolaylıkla elde edilebilmektedir. Kocaman [24], doktora tezi kapsamında gerçekleştirdiği çalışmada, bu yazılımlarda mevcut kenar tanıma ve filtreleme fonksiyonlarını kullanarak, istenilen bir noktada su seviyesinin zamana bağlı değişimini belirleyebilen bir kod geliştirmiştir. “Sanal derinlik ölçer” olarak adlandırılan bu yöntem sayesinde, serbest su yüzeyinin (x, y) koordinatları her bir zaman adımında yüksek hassasiyetle belirlenebilmektedir (Şekil 4) [7]. Bu ölçümün kolaylaştırılması amacıyla deney tankındaki sıvı, mavi renkli gıda boyası ile renklendirilmiştir.

Yazılıma entegre edilen bu kod, su-hava arakesitini suyun en yüksek noktası olarak algılamakta ve bu sınırı her bir video karesinde tespit ederek işlemektedir. Böylece, belirli bir noktadaki serbest su seviyesinin koordinatları ile zaman içindeki değişimi belirlenebilmektedir. Ölçüm yapılacak bölgenin koordinat ve boyut bilgileri girildikten sonra, sanal derinlik ölçeri temsil eden bir ok oluşturulmakta ve bu okun yönündeki komşu piksellerin gri tonlama değerlerinde meydana gelen ani değişimler, yazılım tarafından kenar olarak algılanmaktadır. Bu yöntemle, su seviyesini temsil eden noktanın koordinatları güvenilir biçimde belirlenmektedir.

Sanal derinlik ölçer yöntemi, önceki çalışmalarda başarıyla uygulanmış ve çeşitli deneysel senaryolarda akış davranışının güvenilir biçimde analiz edilmesini sağlayarak doğruluğunu ortaya koyan sonuçlar üretmiştir [4,25–28]. Geleneksel sensörlerin sınırlamalarına kıyasla, bu yöntem çok daha kapsamlı ve güvenilir veri sunmakta; dolayısıyla literatürde alternatif ve etkili bir ölçüm aracı olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 4. Sanal derinlik ölçer

2.3. Dikdörtgen tanktaki sıvının doğal frekansının hesaplanması

Yatay basit harmonik hareket uygulanan tank içindeki sıvının çalkantı davranışı, tankın şekli, sıvının derinliği, tankı harekete geçiren genlik ve frekans gibi faktörlere göre değişmektedir. Yatay harmonik harekete maruz bırakılan tankın hareketi aşağıda verilen denklemle ifade edilmektedir.

$$X(t) = -A \cos \omega t \quad 10$$

Bu eşitlikte, A uyarma genliğini, t zamanı ve ω ise deney tankının harekete zorlandığı sinüzoidal hareketin frekansını

ifade etmektedir. Çalışmada tank, çeşitli frekans ve genliklerde harekete maruz bırakılmış ve tank içerisindeki sıvının çalkantı davranışı değerlendirilmiştir. Kısmen dolu tanklardaki sıvının hareketi, sayısız doğal frekans ve mod içerir. Dikdörtgen bir tankta, tank uzunluğu L ve su derinliği h olduğunda, lineer dalga teorisine dayalı olarak her mod için lineer çalkantı frekansları aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{ng\pi}{L} \tanh\left(\frac{n\pi h}{L}\right)} \quad n = 1, 2, 3 \quad (11)$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (12)$$

Bu denklemler, düşük sıvı seviyeleri ve tankın küçük genlikli uyarma durumlarında geçerli olup, su derinliği ile tank uzunluğunun oranı h/L 'nin 0,04 ile 0,5 arasında olduğu koşullar için uygundur [29]. Kısmen dolu tanklarda, sıvının çalkantı hareketi, tankın hareket frekansının sıvının doğal frekanslarına yaklaşmasıyla en yoğun hale gelir. Tanktaki sıvı sonsuz sayıda doğal frekansa sahip olsa da, çalkantı açısından en baskın olan ilk moddur.

Gerçekleştirilen ilk deneysel analizlerde, deney tankının birinci mod doğal frekansına eşit bir uyarma frekansı ile harekete geçirilmesi durumunda, uyarma genliği arttıkça maksimum dalga yüksekliklerinin de arttığı belirlenmiştir. Liu ve diğerlerinin [30] çalışmalarıyla uyumlu olarak, tankın birinci mod doğal frekansına eşit olan uyarma frekansında ortaya çıkan güçlü çalkantı hareketlerinin yanı sıra, üçüncü mod doğal frekansına (f_3) eşit uyarma frekansının da belirgin bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Üçüncü modun etkisi, birinci moda kıyasla daha düşük seviyede olsa da, diğer modlara göre dikkate alınması gereken çalkantı hareketlerine yol açmaktadır. Farklı doğal frekans modlarının çalkantı dinamikleri üzerindeki etkileri, uyarma genliği, doluluk oranı ve uyarma frekansı gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Sonuç olarak, çalkantı hareketinin daha iyi anlaşılması ve olası olumsuz etkilerin en aza indirilebilmesi için öncelikli olarak birinci mod doğal frekansının dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle çalışmada, sıvının ilk mod doğal frekansı ve buna yakın frekanslar deney tankına uygulanarak, sıvının çalkantı tepkileri incelenmiştir.

2.4. RMS, RMSE ve normalize edilmiş yüzde hata hesaplama

Bu çalışmada, lineer teori ve görüntü işleme yöntemiyle elde edilen zamana bağlı dalga yüksekliği verileri arasındaki uyumu değerlendirmek amacıyla Kök Ortalama Kare değeri (RMS-Root Mean Square), Kök Ortalama Kare Hata değeri (RMSE- Root Mean Square Error) ile normalize edilmiş yüzde fark değerleri hesaplanmıştır (Denklem 13-16). RMS değeri, her bir veri seti için dalga formunun ortalama enerji düzeyini göstermektedir. RMSE değeri ise lineer teori verileri ile görüntü işleme yöntemi arasındaki dalga şekli farkının zamana bağlı ortalama hata miktarını ifade eder.

$$RMS_d = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2\right)}, RMS_a = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)} \quad (13)$$

$$RMS\% = \frac{|RMS_d - RMS_a|}{RMS_d} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^2 - y_i^2)\right)} \quad (15)$$

$$RMSE\% = \frac{|RMSE_d - RMSE_a|}{RMSE_d} \quad (16)$$

Burada:

- x_i , görüntü işleme yöntemiyle elde edilen dalga yüksekliği verisinin i . örnek değerini,
- y_i , lineer teoriye dayalı olarak hesaplanan karşılık gelen i . dalga yüksekliği değerini,
- n , toplam örneklem sayısını,
- RMS_d ve $RMSE_d$, deneysel (görüntü işleme tabanlı) yöntemle karşılık gelen RMS ve RMSE değerlerini,
- RMS_a ve $RMSE_a$, analitik (lineer teoriye dayalı) yöntemle karşılık gelen RMS ve RMSE değerlerini ifade etmektedir.

RMSE yöntemi, deneysel veriler ile sayısal analiz sonuçları arasındaki nokta-nokta doğruluğu değerlendirmek amacıyla uygulanmıştır. RMS yöntemi ise çalkalanma sinyallerinin toplam enerji içeriğindeki farklılıkları ve genel genlik seviyelerindeki sapmaları karşılaştırmak için kullanılmıştır. Ancak, RMS yönteminin faz kaymaları ve zaman gecikmelerine duyarlı olması nedeniyle, sinyaller arasındaki şekil farklılıklarını maskeleyebileceği ve sinyallerin RMS değerleri benzer olsa bile dalga formlarının önemli ölçüde farklı olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Buna karşın, RMSE değeri faz farkı oluştuğunda çalkalanma davranışları benzer bile olsa büyük hata değerleri gösterebilecektir. Bu nedenle, bu iki tamamlayıcı yaklaşım birlikte kullanılarak hem yerel hataların tespiti hem de genel enerji seviyesi değerlendirmesi açısından çalkalanma analizinin kapsamlı bir değerlendirme yapılması amaçlanmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, dikdörtgen kesitli tank içerisinde meydana gelen sıvı çalkantısı probleminin dinamik davranışı; deneysel ve lineer teoriye dayalı analitik çözümlerle birlikte değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında; farklı doluluk oranları, uyarma frekansları ve genliklerin çalkantı hareketine etkileri çok yönlü olarak incelenmiş; her iki yöntemin sonuçları karşılaştırmalı şekilde ele alınmıştır.

Çalkantı problemini anlamaya yönelik kullanılan denklemler genellikle karmaşık yapıda olduğundan, bazı varsayımlar temelinde geliştirilen analitik yöntemler uygulamada büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda,

çalkantı hareketini kavramsallaştırmak için kullanılan lineer teori yaklaşımı, söz konusu davranışın matematiksel olarak modellenmesine olanak tanımaktadır. Sıvı ortamındaki dalga hareketlerinin açıklanmasında yaygın olarak başvuru alan teorik yaklaşımlar arasında doğrusal (lineer) denklemler öne çıkmaktadır.

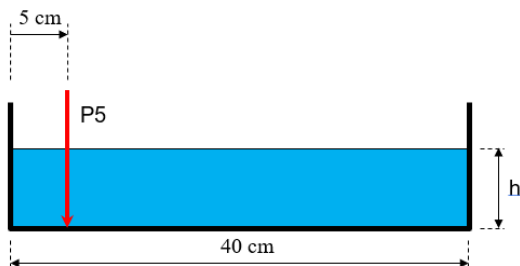
Lineer teori, çalkantı hareketinin temel mekanizmasını sadeleştirmek amacıyla çeşitli varsayımlara dayanır. Bu yaklaşımda dalga genliklerinin küçük olduğu, yüzey eğimlerinin lineer kabul edilebileceği varsayılır [20]. Ayrıca, sıvının yoğunluğu sabit kabul edilirken; viskozite ve yüzey gerilimi gibi fiziksel etkiler genelde ihmal edilmektedir.

Özetle, lineer teori, çalkantı hareketini matematiksel olarak açıklamada ve sıvı ortamındaki hareketleri öngörmekte temel bir yöntem sunar. Bununla birlikte, çalkantı hareketlerinin doğası gereği lineer olmayan etkiler içermesi, bu etkilerin de dikkate alındığı daha karmaşık modellerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmada da olduğu gibi, lineer teori çalkantı davranışını genel bir bakış açısıyla değerlendirmek adına önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Özellikle düşük genlikli ve düşük frekanslı çalkantı problemlerinin incelenmesinde etkili bir yaklaşımdır.

Çalışma kapsamında, lineer teori yaklaşımı ile hesaplanan sıvı yüzeyi değişimleri, görüntü işleme yöntemi ile elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmış; özellikle düşük genlikli ve rezonans frekansından yüksek uyarma frekansı koşullarında teorik modelin büyük oranda doğru sonuç verdiği görülmüştür. Ancak uyarma frekansının rezonans frekansının altında olduğu koşulda, sistemin doğrusal olmayan davranışlar sergilediği ve teorik modelle elde edilen sonuçların yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, farklı doluluk oranları, uyarma frekansları ve uyarma genliklerinin çalkantı hareketi üzerindeki etkileri ayrı ayrı incelenmiş; elde edilen dalga hareketine ilişkin deneysel bulgular ile analitik çözümlerin karşılaştırmalı analizine ilerleyen bölümde yer verilmiştir.

3.1. Çalkantı hareketinde lineer teori ve görüntü işleme yöntemlerinin frekans bazlı karşılaştırılması

Çalışmanın bu aşamasında, deney tankı 6 mm genişliğinde sinüzoidal hareketle sarsılmıştır. Bu hareketin etkisiyle, tankın sol duvarından 5 cm mesafede bulunan bir noktada, çalkantı hareketi nedeniyle sıvı yüzeyinde meydana gelen seviye değişiklikleri lineer teori ve görüntü işleme teknikleri kullanılarak incelenmiştir (Şekil 5) [7]. Deneyler, Tablo 1’de belirtilen koşullara göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. P5 noktasının şematik gösterimi

Tablo 1. Farklı doluluk oranları için sıvının doğal ve tankın uyarma frekansları

h(cm)	h/L	f_1 (Hz)	f_c
7	0.175	0.988	1.10 f_1
7	0.175	0.988	0.90 f_1
8	0.20	1.042	1.10 f_1
8	0.20	1.042	0.90 f_1
9	0.225	1.089	1.10 f_1
9	0.225	1.089	0.90 f_1
10	0.25	1.131	1.10 f_1
10	0.25	1.131	0.90 f_1

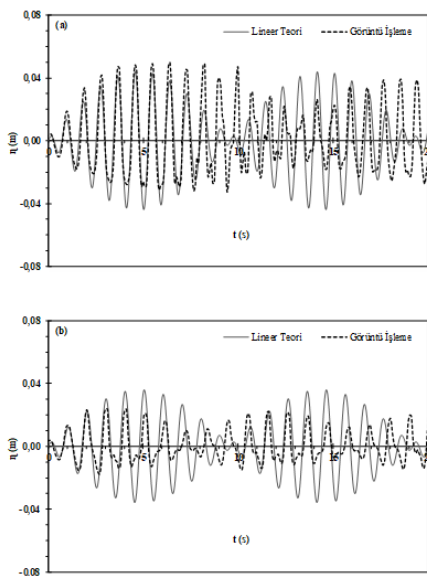
Çalışmalardan elde edilen veriler Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da gösterilmiştir [7]. Şekil 6 ve Şekil 7’nin incelenmesi sonucunda, her iki yöntemin frekans tepkisi analiz edildiğinde, özellikle hareketin başlangıcında benzer sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Uyarma frekansının $f_c = 1.10 f_1$ olduğu Şekil 6(a) ve Şekil 7(a) durumlarında, pozitif dalga genliklerinin genellikle görüntü işleme yöntemi ile daha yüksek elde edildiği belirlenmiştir. Buna karşın, negatif dalga genliklerinde lineer teori ile elde edilen sonuçların daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Uyarma frekansının $f_c = 0.90 f_1$ olduğu Şekil 6(b) ve Şekil 7(b) sonuçlarında ise, dalga genliklerinin lineer teori sonuçlarından genellikle daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7 birlikte değerlendirildiğinde, çalkantı hareketinin başlangıcından bir süre sonra görüntü işleme sonuçları ile lineer teori arasında belirgin bir faz farkı olduğu anlaşılmaktadır. Bu, sistem dinamikleri açısından lineer modelin bazı durumlarda çalkantı hareketini doğru bir şekilde temsil edemediğini göstermektedir. Bu farklılıkların nicel olarak ortaya konulabilmesi için dalga genliği ve şekil uyumsuzlukları, Kök Ortalama Kare (RMS) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) değerlerinin bağıl (%) biçimde analiz edilmesiyle değerlendirilmiştir (Tablo 2). RMS–RMSE bağıl analizleri, farklı doluluk oranları ve uyarma frekansları altında sistem davranışındaki hata büyüklüğünü, lineer teori sonuçlarının görüntü işleme verileri esas alınarak normalize edilmesiyle sayısal olarak ortaya koymuş ve iki yöntem arasındaki uyum düzeyini karşılaştırmaya imkân tanımıştır. Genel olarak, rezonans üstü frekans değerlerinde RMS değerlerinin uyumlu çıkması, dalga genliklerinin iki yöntemle de benzer büyüklükte elde edildiğini göstermektedir. Ancak RMSE değerlerinden anlaşıldığı üzere, genlik büyüklükleri benzer olmasına rağmen dalga şekli ve faz farkı kaynaklı sapmalar belirgin kalabilmektedir. Ayrıca; 1.10 f_1 durumunda hesaplanana hata değerlerinin 0.90 f_1 durumuna kıyasla belirgin biçimde daha küçük olduğu görülmektedir. Bu kapsamda elde edilen bulgular Tablo 2’de sunulmuş ve grafik sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Örneğin $f_c = 1.10f_1$ durumunda RMS değeri %5.96 olarak bulunmuş, bu değer dalga genliği açısından iki yöntemin büyük ölçüde benzer büyüklükte sonuçlar ürettiğini göstermiştir; ancak aynı durumda RMSE değeri %73.98’e ulaşarak dalga şeklinin faz uyumsuzluğu nedeniyle önemli ölçüde sapma olduğunu ortaya koymuştur.

Şekil 8 ve Şekil 9’da yüksek doluluk oranlarına ilişkin bulgular gösterilmektedir. Goudarzi ve diğerleri [20] ile Park ve diğerlerinin [21] çalışmalarına benzer biçimde, serbest sıvı yüzeyinde çalkantı hareketi sonrası dalga

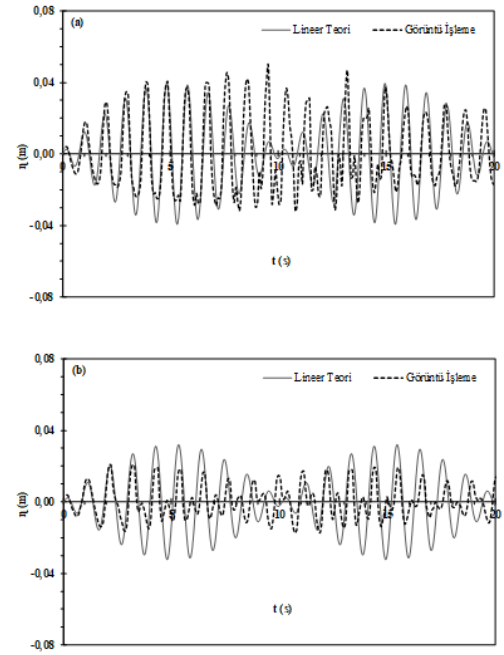
yüksekliklerine ilişkin Şekil 8(a) ve Şekil 9(a)'da sunulan veriler, iki farklı yöntemin sonuçlarının oldukça uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Çalkantı hareketi başladığında, ilk 15 saniye boyunca, tepe ve çukur dalga yüksekliklerinin her iki yöntemde de aynı zamanlarda olduğu gözlemlenmiştir. Bu süre içinde, küçük sapmalar haricinde, dalga yüksekliklerinin zamanlaması iki yöntem arasında büyük ölçüde uyumludur. Nitekim bu durum, Tablo 2'de verilen RMS ve RMSE bağıl değerlerine de yansımış; yüksek doluluk oranlarında (örneğin $h/L = 0.25$, $f_c = 1.10 f_1$) RMS %9.04 gibi düşük seviyede bulunurken RMSE değeri %35.63'e kadar düşmüş ve hem genlik düzeyi hem de dalga şekli açısından iki yöntemin uyum düzeyinin arttığı sayısal olarak doğrulanmıştır. Tankın uyarma frekansının birinci mod doğal frekans değerinden düşük olduğu Şekil 8(b) ve Şekil 9(b)'de ise bazı uyumsuzluklar olmasına rağmen, genel olarak sonuçların iyi bir uyum sergilediği görülmüştür. Özellikle $f_c/f_1 = 1.10$ uyarma frekansında doluluk oranındaki artış, lineer teori ve görüntü işleme sonuçlarını birbirine yaklaştırmıştır. Bu durum, doluluk oranı arttıkça lineer teorisinin daha doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. Sonuç olarak, belirli koşullar altında lineer teorisinin sıvı yüzeyindeki dinamik hareketleri tahmin etmede başarılı olduğu söylenebilir.

Tablo 2. Farklı doluluk oranları ve uyarma frekansları altında normalize edilmiş RMS ve RMSE (%) değerleri

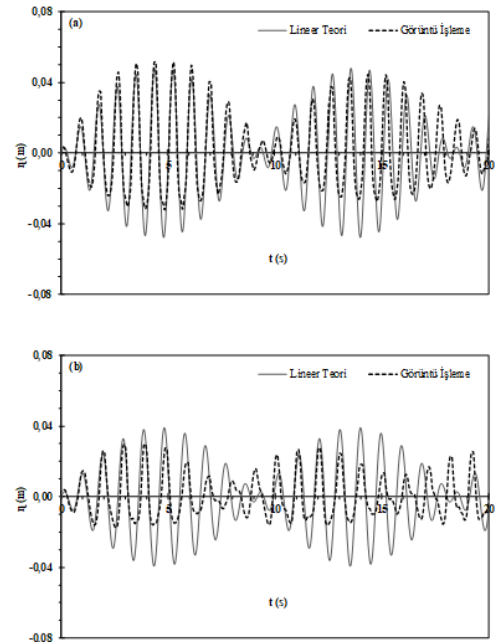
h/L	f_c	RMS(%)	RMSE(%)
0.175	$1.10 f_1$	5.96	73.98
0.175	$0.90 f_1$	73.10	148.80
0.20	$1.10 f_1$	3.62	77.91
0.20	$0.90 f_1$	72.52	141.16
0.225	$1.10 f_1$	8.27	55.35
0.225	$0.90 f_1$	52.90	111.12
0.25	$1.10 f_1$	9.04	35.63
0.25	$0.90 f_1$	37.40	84.69



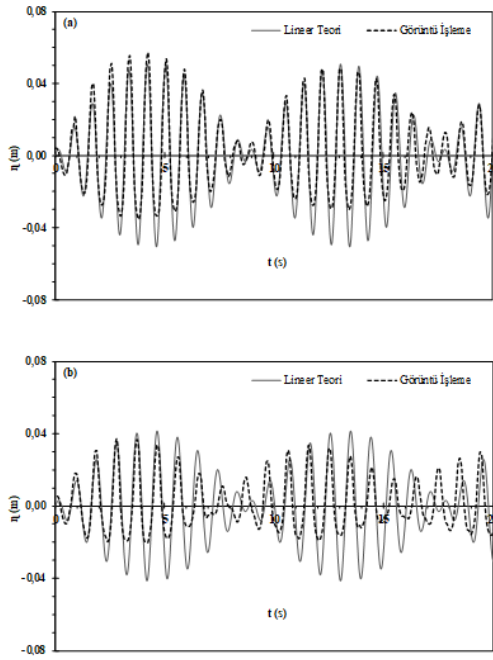
Şekil 6. $h/L = 0,175$ ve $A = 6$ mm uyarma genliğinde (a) $f_c/f_1 = 1.10$ ve; (b) $f_c/f_1 = 0.90$ uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi



Şekil 7. $h/L = 0.20$ ve $A = 6$ mm uyarma genliğinde (a) $f_c/f_1 = 1.10$ ve; (b) $f_c/f_1 = 0.90$ uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi



Şekil 8. $h/L = 0.225$ ve $A = 6$ mm uyarma genliğinde (a) $f_c/f_1 = 1.10$ ve; (b) $f_c/f_1 = 0.90$ uyarma frekansları için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi



Şekil 9. $h/L=0.25$ ve $A=6\text{mm}$ uyarma genliğinde (a) $f_c/f_1=1.10$ ve; (b) $f_c/f_1=0.90$ uyarma frekansları için tank duvarına 5cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi

3.2. Uyarma genliğinin çalkantı hareketi üzerindeki etkileri

Sıvı çalkantısının genliğinin, depolanan sıvının doğal frekansının yanı sıra tankın uyarma genliği ve frekansına bağlı olduğu belirlenmiştir [20]. Bu bağlamda, deney tankının uyarma genliğinin çalkantı davranışı üzerindeki etkileri lineer teori ve deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Böylece, kısmen dolu tanklardaki çalkantı hareketlerinin farklı uyarma genliklerine tepkisi ve bu genliklerin çalkantı üzerindeki etkileri daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir.

Deneyler, tank doluluk oranının (h/L) 0,25 olduğu ve uyarma genliklerinin 5 mm, 8.5 mm ve 12 mm olarak belirlendiği koşullarda gerçekleştirilmiştir. Uyarma frekansı ise $1.30 f_1$ olarak seçilmiştir. Çalkantı hareketlerini incelemek amacıyla referans noktası, tankın sol duvarından 5 cm uzaklıkta belirlenmiştir (Şekil 5). Bu deney koşulları Tablo 3’de tablo halinde sunulmuştur.

Belirtilen koşullara ilişkin elde edilen veriler Şekil 10’da sunulmuştur [7]. Araştırma sonuçlarına göre, uyarma genliğinin artırılması, sıvı yüzeyindeki seviye değişikliğini artırmaktadır. Ayrıca, lineer teori ile görüntü işleme teknikleri kullanılarak elde edilen verilerin büyük ölçüde uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Grafikler dikkatle incelendiğinde, her iki yöntem arasındaki en iyi uyumun düşük uyarma genliğinde ($A=5\text{mm}$) elde edildiği, uyarma genliği arttıkça ($A=6.5\text{mm}$ ve $A=12\text{mm}$) uyumun kademeli olarak azaldığı fark edilmektedir. Bu durum, görsel olarak dalga formu örtüşmesinin uyarma genliğiyle nasıl değiştiğini açıkça göstermektedir.

Ancak, aynı durumu RMS ve RMSE metrikleri üzerinden değerlendirildiğinde, görsel uyumla sayısal uyumun birebir örtüşmediği görülmektedir (Tablo 4). Örneğin, doluluk oranının 0.25 olduğu durum için farklı uyarma genliklerine ait lineer teori ve görüntü işleme uyumu, normalize edilmiş RMS ve RMSE (%) değerleriyle Tablo 4’te sunulmuştur.

Tablo 4 incelendiğinde, düşük genlik değerinde ($A=5\text{mm}$) RMS %5.79 gibi düşük bir seviyede kalırken RMSE %44.96’ya ulaşmıştır. Orta genlikte ($A=6.5\text{mm}$) RMS %11.15’e yükselmiş, RMSE değeri ise %43.81 seviyesinde kalmış; yüksek genlik ($A=12\text{mm}$) durumunda ise RMS %4.44’e düşerken RMSE değeri %39.40’a gerilemiştir. Bu durum, dalga genliğinin genel seviyesinin benzer olmasına rağmen, dalga şekli üzerindeki faz kaymaları, yerel genlik sapmaları ve pozitif-negatif genlik bölgelerinde oluşan asimetrik farklar nedeniyle RMS ve RMSE değerlerinin tek başına gerçek uyumu tam olarak yansıtmadığını ortaya koymaktadır.

Nitekim Şekil 10 incelendiğinde, özellikle yüksek genlikli salınımlar sırasında, görüntü işleme yöntemiyle elde edilen verilerin pozitif genliklerde lineer teoriye kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığı, negatif genliklerde ise daha düşük seviyelerde kaldığı gözlemlenmektedir. Bu zıt yönlü sapmalar, RMS hesaplaması sırasında birbirini kısmen dengeleyerek, veriler arasındaki farkın olduğundan daha az olduğu izlenimini oluşturabilmektedir. Bu nedenle, dalga enerjisi düzeyinin genel karakteristiğini vermesi bakımından RMS ve RMSE değeri önemli bir göstergedir; ancak dalga şekli uyumunu değerlendirmek için pozitif-negatif genlik bölgeleri ayrı ayrı da incelenebilmektedir. Ancak bu çalışmada pozitif ve negatif genlik bölgeleri ayrı ayrı analiz edilmemiş, genel uyum değerlendirmesi bir arada yapılmıştır.

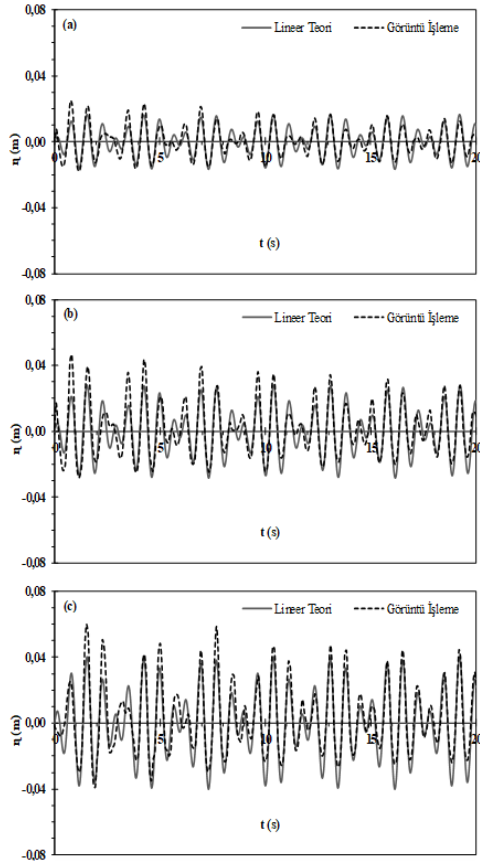
Sonuç olarak, uyarma genliğinin artması, lineer teorisinin dalga genliğini belirli aralıklarda doğru tahmin etmesine rağmen, dalga formu üzerindeki karmaşık etkileşimlerin ve faz kaymalarının ortaya çıkmasıyla uyumu sınırlamaktadır. Bu bulgular, çalkantı analizinde uyarma genliğinin önemli bir parametre olduğunu ve deneysel verilerle teorik modellerin karşılaştırılmasının, modelin doğruluğu ve geçerliliğini değerlendirmede kritik olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu nedenle yüksek frekans ve genliklere sahip durumlar için modifiye edilmiş lineer teori yaklaşımlarının geliştirilerek uygulandığı bilinmektedir [21,22]. Bu çalışmada, lineer teorisinin geçerli olduğu uyarma frekansı ve genlik değerleri araştırıldığından, modifiye edilmiş lineer teoriye dayalı analitik çözümlerle karşılaştırma yapılmamıştır.

Tablo 3. Uyarma genliği ve frekansına bağlı deney parametreleri

Durum	A (mm)	h (cm)	h/L	f_1 (hertz)	f_c
1	5	10	0.25	1.13	$1.30 f_1$
2	8.5	10	0.25	1.13	$1.30 f_1$
3	12	10	0.25	1.13	$1.30 f_1$

Tablo 4. Farklı genlik değerleri için normalize edilmiş RMS ve RMSE (%) değerleri

A (mm)	f_c	RMS(%)	RMSE(%)
5	$1.30 f_1$	5.79	44.96
8.5	$1.30 f_1$	11.15	43.81
12	$1.30 f_1$	4.44	39.40



Şekil 10. $h/L=0.25$ ve $f_c=1.30 f_1$ uyarma frekansında (a) $A=5$ mm; (b) $A=8.5$ mm ve (c) $A=12$ mm uyarma genlikleri için tank duvarına 5 cm uzaklıktaki sıvı yüzeyi değişimi

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, sıvı çalkantısı hareketlerinin farklı uyarma frekansları ve genlikleri altındaki dinamik davranışları hem deneysel hem de lineer teori yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Deneyler farklı doluluk oranları, uyarma genlikleri ile birlikte rezonans frekansının üstü ve altı olmak üzere iki ayrı uyarma frekansı ($f_c = 1.10 f_1$ ve $f_c = 0.90 f_1$) altında gerçekleştirilmiştir. Bu frekansların seçilmesinin temel nedeni, sıvının rezonans frekansına yakın koşullarda çalkantı hareketlerinin nasıl değiştiğini incelemektir. Rezonans frekansı, sıvının doğal salınım frekansını temsil ettiği için, bu değerin altı ve üstünde yapılan uyarımlar, çalkantının farklı dinamik tepkiler vermesine neden olmaktadır. Rezonans altı frekanslarda sıvı hareketleri daha kontrollü ve düşük genlikli olurken, rezonans üstü frekanslarda daha şiddetli ve düzensiz dalga hareketleri ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, $f_c = 1.10 f_1$ ve $f_c = 0.90 f_1$ gibi frekanslar, hem düşük hem de yüksek enerji durumlarında sıvının çalkantı davranışını anlamak için kritik bir aralık sağlamaktadır.

Bu yaklaşım, mühendislik uygulamalarında çalkantının kontrol edilmesi ve güvenli tasarımlar yapılabilmesi için önemli bir veri sunmaktadır. Seçilen frekanslar, özellikle sıvı taşıyan tankların hareketli ortamlarındaki performansını optimize etmek ve çalkantı kaynaklı sorunları en aza indirmek amacıyla yapılan çalışmalara ışık tutmaktadır.

Farklı doluluk oranlarının seçilmesinin temel gerekçesi, tank içerisindeki sıvı hacminin çalkantı hareketlerinin dinamik karakteristikleri üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesidir. Ayrıca, farklı uyarma genliklerinin dikkate alınması, tankın hareketinin şiddetinin sıvı yüzey hareketlerine olan etkisini incelemek açısından önemlidir. Küçük genlikli uyarımlar sıvının daha sakin bir hareket sergilemesine yol açarken, büyük genlikli uyarımlar daha karmaşık ve türbülanslı dalga oluşumlarına neden olmaktadır. Ayrıca, çalkalanma analizinde $1,10 f_1$ uyarım frekansı durumunda hesaplanan hata değerlerinin $0,90 f_1$ uyarım frekansına kıyasla belirgin biçimde daha küçük olduğu görülmektedir, bu da rezonans frekansının üzerindeki uyarımların mevcut değerler için daha doğru analitik sonuçlar verdiğini ortaya koymaktadır. Bu parametrelerin bir arada değerlendirilmesi, sıvı taşıyan tankların çeşitli operasyonel koşullardaki davranışlarını modellemek ve optimize etmek için kritik bir bilgi tabanı sunmaktadır. Seçilen frekanslar, doluluk oranları ve genlikler, mühendislik uygulamalarında çalkantının kontrol edilmesi ve güvenli tasarımların yapılabilmesi için kapsamlı bir yaklaşım sağlamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] M.D. İtibar. Küre biçimli tanklardaki çalkantının modellenmesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2015.
- [2] A. Bardazzi, C. Lugni, O.M. Faltinsen, D. Durante, A. Colagrossi, Different scenarios in sloshing flows near the critical filling depth. Journal of Fluid Mechanics, 984, A73, 2024. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.259>.
- [3] R.A. Ibrahim, Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications. Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- [4] B. Erdogan, Dikdörtgen tank içerisindeki çalkantı hareketinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [5] U. Tosun, R. Aghazadeh, C. Sert, M.B. Özer, Tracking free surface and estimating sloshing force using image processing. Experimental Thermal and Fluid Science, 88, 423–433, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.06.016>.
- [6] J.H. Zheng, M.A. Xue, P. Dou, et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. Journal of Hydrodynamics, 33, 1089–1104, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7>.
- [7] B. Erdogan, Engel yerleşimlerinin sıvı çalkantısının sönümlenmesine etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. Doktora Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2024.
- [8] C.W. Hirt, B.D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, 39(1), 201–225, 1981.

- [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
- [9] Q. Chen, Comparison of different k- ϵ models for indoor air flow computations. Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals, 28(3), 353–369, 1995. <https://doi.org/10.1080/10407799508928838>.
- [10] D. Liu, P. Lin, M.A. Xue, L. Cheng, J. Lian, Numerical simulation of two-layered liquid sloshing in tanks under horizontal excitations. Ocean Engineering, 224, 108768, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108768>.
- [11] F.C. Korkmaz, Damping of sloshing impact on bottom-layer fluid by adding a viscous top-layer fluid. Ocean Engineering, 254, 111357, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111357>.
- [12] W. Cao, X. Li, Y. Gao, X. Li, Z. Liu, A numerical analysis of sloshing dynamics of two-layer liquid with a free surface. Ocean Engineering, 268, 113295, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113295>.
- [13] O. Kargbo, M.A. Xue, J. Zheng, X. Yuan, Multiphase sloshing dynamics of a two-layered fluid and interfacial wave interaction with a porous T-shaped baffle in a tank. Ocean Engineering, 229, 108664, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108664>.
- [14] Y. Y. Tang, Y.D. Liu, C. Chen, Z. Chen, Y.P. He, M. M. Zheng, Numerical study of liquid sloshing in 3D LNG tanks with unequal baffle height allocation schemes. Ocean Engineering, 234, 109181, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109181>.
- [15] C.R. Chu, Y.R. Wu, T.R. Wu, C.Y. Wang, Slosh-induced hydrodynamic force in a water tank with multiple baffles. Ocean Engineering, 167, 282–292, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.049>.
- [16] M.A. Goudarzi, P.N. Danesh, Numerical investigation of a vertically baffled rectangular tank under seismic excitation. Journal of Fluids and Structures, 61, 450–460, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2016.01.001>.
- [17] C. Ma, C. Xiong, M. Ma, Numerical study on suppressing violent transient sloshing with single and double vertical baffles. Ocean Engineering, 223, 108557, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108557>.
- [18] M.A. Xue, J. Zheng, P. Lin, X. Yuan, Experimental study on vertical baffles of different configurations in suppressing sloshing pressure. Ocean Engineering, 136, 178–189, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.031>.
- [19] S.T. Golla, B.J.A.A. Venkatesham, Experimental study on the effect of centrally positioned vertical baffles on sloshing noise in a rectangular tank. Applied Acoustics, 176, 107890, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107890>.
- [20] M.A. Goudarzi, S.R. Sabbagh-Yazdi, Investigation of nonlinear sloshing effects in seismically excited tanks. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 43, 355–365, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.08.001>.
- [21] W.M. Park, D.K. Choi, K. Kim, S.M. Son, S.H. Oh, K.H. Lee, C. Choi, Simple analytical method for predicting the sloshing motion in a rectangular pool. Nuclear Engineering and Technology, 52(5), 947–955, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.10.025>.
- [22] W.M. Park, D.K. Choi, S.H. Oh, S.M. Son, H.S. Kang, K.H. Lee, and C. Choi, A modification of the linear theory to predict sloshing in the spent fuel pool under high frequency seismic conditions. Proceedings of 2018 KNS Autumn Conference, Vol. 1, No. 1.6, pp. –, Yeosu, Korea, 2018.
- [23] O. M. Faltinsen, A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with two-dimensional flow. Journal of Ship Research, 22(3), 193–202, 1978. <https://doi.org/10.5957/jsr.1978.22.3.193>.
- [24] S. Kocaman, Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik olarak incelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2007.
- [25] A. Yilmaz, S. Kocaman, M. Demirci, Numerical modeling of the dam-break wave impact on elastic sluice gate: A new benchmark case for hydroelasticity problems. Ocean Engineering, 231, 108870, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108870>.
- [26] S. Kocaman, K. Dal, A new experimental study and SPH comparison for the sequential dam-break problem. Journal of Marine Science and Engineering, 8(11), 905, 2020. <https://doi.org/10.3390/jmse8110905>.
- [27] H. Ozmen-Cagatay, S. Kocaman, H. Guzel, Investigation of dam-break flood waves in a dry channel with a hump. Journal of Hydro-environment Research, 8(3), 304–315, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.01.005>.
- [28] S. Kocaman, H. Ozmen-Cagatay, Investigation of dam-break induced shock waves impact on a vertical wall. Journal of Hydrology, 525, 1–12, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.040>.
- [29] U. Tosun, Çalkalanan titreşim sönümleyicilerin performansının deneysel yöntemlerle incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2016.
- [30] D. Liu, W. Cai, T. Lu, Comparative assessment of liquid sloshing in dry and wet storage tank of floating offshore platform. Marine Structures, 90, 103425, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103425>.

