

Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi

Hakan AKYILDIZ*

N. Erdem ÜNAL**

Taylan BAĞCI***

ÖZ

Silindirik bir tank içindeki sıvı çalkantısından dolayı oluşan basınç ve serbest su yüzeyi değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın ana amacı dönme etkisiyle silindirik tanklarda oluşan çalkantı problemini incelemek ve tankın içinde bulunan çeşitli noktalardaki basınç değişimlerini ölçmektir. Bu amaçla, kısmi dolu silindirik bir tankta sıvı çalkantısının doğrusal olmayan davranışını ve sönümlenme karakteristiğini ortaya koyacak bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzeneğinde hem perdesiz hem de çeşitli sönümleyici perde tasarımları test edilmiştir. Yapılan deneylerde, tank doluluk oranı, dönme periyodu ve dönme açısı sistematik olarak değiştirilerek bunun hidrodinamik yükler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Basınç değişimleri, sönümleyici perde, çalkantı yükleri, deneysel çalışma, silindirik tank

ABSTRACT

Experimental Investigation of the Liquid Sloshing in a Rigid Cylindrical Tank

Investigations on pressure variations and free surface displacements of liquid from the mean static level in a cylindrical tank have been carried out experimentally. The primary objectives of this study are to investigate the sloshing problem in a rolling cylindrical tank and to measure pressure distributions at different locations. For this purpose, an experimental setup is designed to study the non-linear behaviour and damping characteristics of liquid sloshing in a partially filled cylindrical tank. Several configurations of tanks with and without damping walls are studied. Hydrodynamic load variations on the cylindrical tank are investigated by changing the filling ratio, the rolling period and the rolling angle systematically.

Keywords: Pressure variations, baffles, sloshing loads, experimental study, cylindrical tank

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 02.08.2010 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* İstanbul Teknik Üni., Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul - akyildiz@itu.edu.tr

** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - neu@itu.edu.tr

*** İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - bagcit@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Sıvı çalkantısı, deprem yükleri altındaki büyük sıvı depolama tankları, uçaklardaki yakıt tankları, gemilerdeki sıvı tankları gibi çeşitli dinamik sistemlerde mühendislik problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sistemlerin dinamik davranışları çoğunlukla serbest su yüzeyinin dinamiğinden etkilenmektedir. Dolayısıyla, taşımacılık, insan hayatı ve çevre açısından bu sistemlerin güvenliği çok önemlidir.

Kısmi dolu tanklarda, eğer tank hareketinin periyodu tankın doğal periyoduna yaklaşırsa tankın içerisindeki sıvıda çalkantı hareketi başlamaktadır. Dolayısıyla çalkantı hareketinin başladığı zorlama periyodunun tespiti önemlidir. Çalkantının başladığı periyotlarda tanklarda büyük yapısal yükler oluşabilmektedir [1], [2]. İçerisinde serbest yüzeyli sıvı olan herhangi bir tankta çalkantı hareketi oluşabilir. Tankın şekline ve dağılımın tipine bağlı olarak serbest su yüzeyi, basit yüzeysel, yüzeysel olmayan, çevrintili, rastgele çarpımlar, simetrik, asimetrik, yarı-periyodik ve kaotik gibi çeşitli şekillerde olabilmektedir. Genel olarak, çalkantı hareketinin genliği, tank hareketinin frekansına(periyoduna), genliğine, sıvı derinliğine, sıvının özelliklerine ve tankın geometrisine bağlıdır [3], [4], [5], [6]. Bir tankın içerisindeki sıvının hareketi sonsuz sayıda doğal frekansa sahiptir, fakat tank hareketinin oluşturduğu en düşük birkaç mod, bu doğal frekans için yeterlidir. Bununla birlikte lineer olmayan etkiler, doğal frekanstan biraz farklı frekanslarda ortaya çıkar ve hareketin genliğine bağlıdır [3], [4], [7].

Sıvının serbest yüzeyinin dinamik davranışı zorlamanın ve zorlama frekansının şekline bağlıdır [1], [2]. Zorlama kısa zamanlı ani hareket şeklinde, sinüzoidal, periyodik ve rastgele olabilir. Hareketin şekli ise bir eksen etrafında dönme, yatay hareket veya bu ikisinin birleşimi şeklinde olabilir. Tankın yatay hareketinden dolayı oluşan sıvı çalkantısı ve tankın geometrisinden kaynaklanan doğrusal olmayan etkiler araştırmacıları deneysel çalışmalara yöneltmiştir. Bu çalışmaların detaylı incelenmesi İbrahim v.d. [1] ve İbrahim [8] verilmiştir. Pal ve Bhattacharyya [9] iki boyutlu çalkantı problemini nümerik ve deneysel olarak incelemiştir. Nümerik olarak elde ettikleri sonuçlar değişik zorlama frekanslarına bağlı olarak deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Younes v.d. [10] dikdörtgen tanklarda düşey perdelerden kaynaklanan hidrodinamik sönümü deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada tank içerisine konumlandırılan düşey perdeler değişik yüksekliklerde ve sayılarda ele alınmıştır. Ayrıca perde sayısı arttıkça sönüm oranının arttığı işaret edilmiştir. Eswaran v.d. [11] kısmi doldurulmuş kübik tanklarda kullanılan perdelerin çalkantı yüklerine etkisini nümerik ve deneysel olarak araştırmışlardır.

Tank hareketinin periyodu, tankın içerisinde bulunan sıvının doğal çalkalanma periyoduna yakın olduğu zaman büyük çalkantı genlikleri beklenmelidir. Dolayısıyla, eğer bu iki periyod birbirine yeterince yaklaşırsa çalkalanma meydana gelecektir. Serbest salınımlar altında, serbest sıvı yüzeyi hareketi, viskoz sınır tabakasından oluşan sönümlendirici kuvvetler tarafından bozulmaktadır [2], [8]. Temel olarak, sönüm oranı sıvı yüksekliğine, sıvının kinematik viskozitesine ve tankın boyutlarına bağlıdır. Bu bağlamda, çalışmamızda tank doluluk seviyeleri, tank zorlama periyotları ve genlikleri değiştirilerek basınç tepkileri üzerine çalışılmıştır ve geometrik ve fiziksel değişkenlerin serbest yüzey salınımları üzerine etkisi irdelenmiştir. Tanka, merkezinden geçen bir eksen etrafında dönme hareketi verilmiştir.

DeneySEL çalışmalar, bir tanktaki çalkantının tankın zorlama genliğinin ve periyodunun, sıvı derinliğinin ve yoğunluğunun ve tankın geometrisinin bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, perdeler ile çalkantı hareketinin kontrolü son yıllarda ilgilenilen konulardan biridir [3]. Problemin lineer olmayan doğasından dolayı çözümü analitik ve hatta sayısal olarak çözümü zor olmaktadır. Dolayısıyla, bazı kabullerin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır ve bu durum çözümlerin gerçek duruma göre sapma göstermesine neden olmaktadır. Bundan ötürü de çalkantı etkilerinin araştırılmasında deneySEL çözümler önemli bir yer tutmaktadır. Bu şartlar altında, bazı araştırmalar deneySEL çalışmalarını ve yukarıda belirtilen özellikleri ortaya koymuştur [7], [12], [13].

Silindirik tanklardaki çalkantı problemi ile ilgili bazı çalışmalar Biswal v.d. [14], [15], [16], [17] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalar Bhattacharyya [18] ve ayrıca Faltinsen [2] tarafından özetlenmiştir. Bu çalışmalarda, sıvının serbest yüzeyine yakın konumlandırılan perdelerin çalkantıyı etkili bir biçimde düşürdüğü ifade edilmiştir. Ayrıca, çalkantının frekansının tankın doğal frekansına yakın olduğu durumlarda bu olgunun doğrusal olmadığına dikkat çekilmektedir. Biswal v.d. [17] sonlu elemanlar metodu ile elde ettikleri sonuçları deneySEL sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bu çalışmalarda, silindir tankın duvarlarına yerleştirilen ve sıvı serbest yüzeyine yakın perdelerin maksimum dalga yüksekliğini düşürdüğü ve benzer bir tutumla, perde genişliklerinin artırılmasının da aynı etkiyi yarattığı belirtilmiştir. Ek olarak, birden fazla yatay perde kullanılması durumunda sıvı çalkantısının azaltılması için tabana ve serbest yüzeye yakın perdelerin kullanılmasının daha etkili olduğu söylenebilir [2], [3], [8], [10].

Gavrilyuk v.d. [19] tankın doğal frekanslarının ve çalkantı modlarının sayısal yöntemlerle hassas bir şekilde belirlenebileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmalarda, çalkantı frekansı ve modları, perde genişliği ve perdenin düşey konumu arasındaki ilişkiler tankın çeşitli doluluk oranları için araştırılmıştır.

Bu çalışmada, büyük tank hareketlerinin, büyük genlikli dalga hareketlerinin ve perde yerleşimlerinin etkilerini dikkate alan bir deney düzeneği geliştirmek ve çalkantı yüklerini araştırmak amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmanın devamı olarak farklı perde düzenlemelerinin sıvı çalkantısı üzerindeki etkilerinin incelenmesi düşünülmektedir. Geliştirilen deney düzeneği başka araştırmacılar tarafından nümerik çalışmalarda doğrulama amaçlı kullanılabilir. Geliştirilen deney düzeneğinin hidrodinamik basınçların azaltılmasında etkili olduğu, bununla beraber farklı perde düzenlemelerinin getireceği avantajların da olabileceği değerlendirilmektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Sıvı çalkantısı kısmi dolu tankların hareketinin bir sonucudur. Dolayısıyla, tank hareketinin frekansı ile tankın içerisindeki sıvı hareketinin frekansı arasındaki ilişkinin iyi analiz edilmesi oldukça önemlidir. Bir silindirik tank için, doluluk oranına göre tankın doğal periyotları şu şekilde verilmektedir [7].

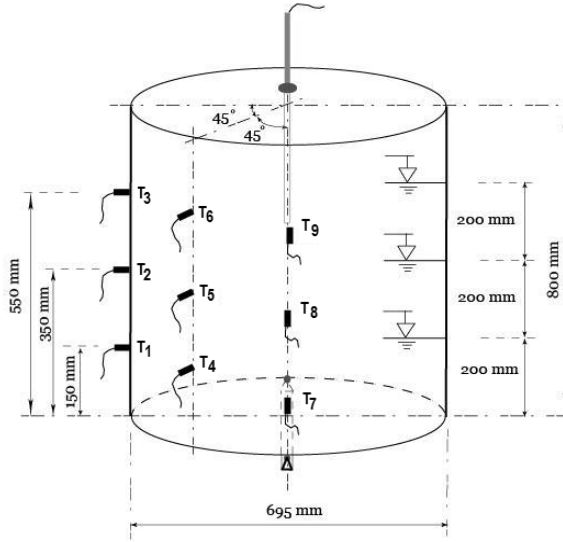
$$T_N = \left(3.522 \sqrt{1 - \frac{h}{d}} + 2.761 \right) \sqrt{\frac{0.5 \times d}{g}} \quad (1)$$

Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi

Burada, T_N doğal periyodu, h sıvının derinliğini, d silindirik tankın çapını ve g yerçekimi ivmesini göstermektedir.

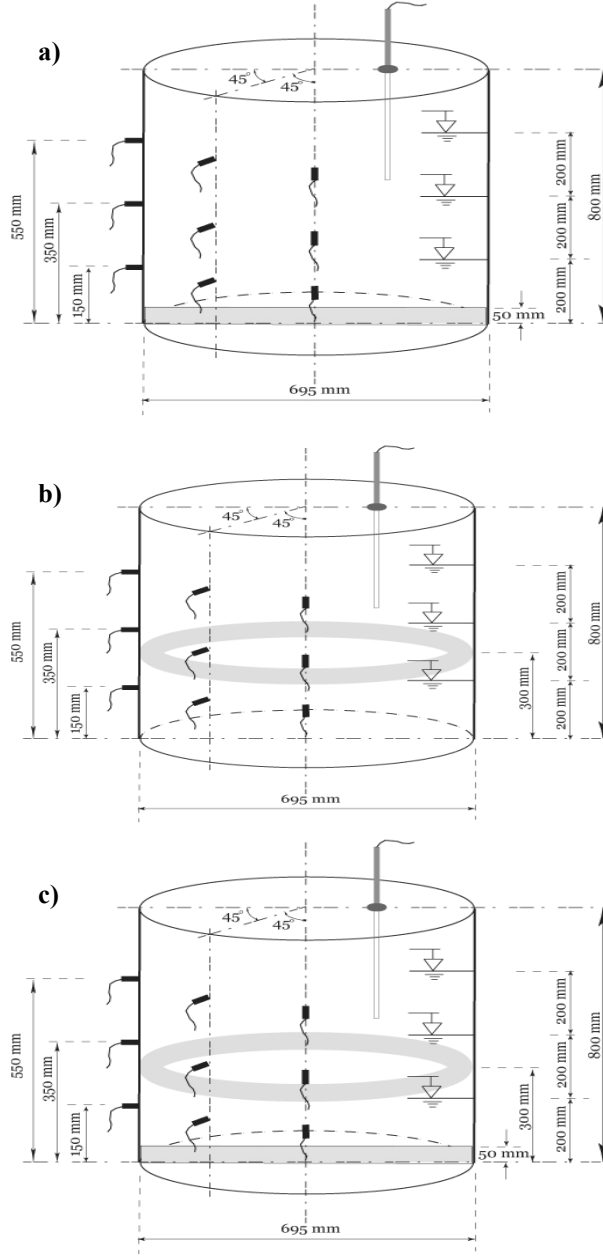
Çalkantı probleminin lineer olmayan özelliğinden dolayı tankın tam doğal periyodunda sıvı çalkantısı meydana gelmez, fakat bu değere çok yakın bir periyotta meydana gelir. Sıvı çalkantısının olduğu tankın doğal periyoduna yakın çalkantı periyodları, farklı perde düzenlemeleri, farklı tank hareketleri ve sıvı yoğunlukları için değişebilir. Dolayısıyla, bu periyodların ele alınan tank düzenlemeleri için iyi analiz edilmesi çok önemlidir [2], [8].

Bu çalışmada, deneylerde kullanılan silindirik tanka sadece dönme hareketi verilmiştir. Çok sayıda fiziksel model araştırması ortaya konmuştur. Bu amaçla, 1.0 cm kalınlığında pleksiglas silindirik bir tank inşa edilmiştir. Tankın boyu 800 mm ve çapı ise 695 mm'dir. Dokuz adet basınç ölçer çeşitli noktalardaki basınç değişimlerini ölçmek amacıyla tanka yerleştirilmiştir. Basınç ölçerlerin yerleri ve perde düzenlemeleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Tank değişebilir iç yapı elemanları ile tasarlanmıştır. Bu iç yapı elemanları taban perdesi ve silindirik gövde yan perdesidir (Şekil 2). Taban perdesi için 7 cm yüksekliğinde 1 cm kalınlığında ve iç çap boyunda olan bir pleksiglas parça kullanılmıştır. Gövde perdesi olarak da 5 cm genişliğinde ve yine 1 cm kalınlığında bir halka kullanılmıştır.



Şekil 1 Tank geometrisi ve basınç ölçerlerinin konumu.

Deneylerin yapıldığı düzenek Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu düzenek çalkantı deneyleri için özel tasarlanmıştır. Bu sayede, tank merkezinden enine olarak geçen eksen etrafında serbestçe dönebilmektedir. Taban iskeletine bağlı olan tank platformunun dönme salınımları bir adet 15 kW'lık DC motor tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca deney düzeneğinde dalga probu için bir adet analog-dijital dönüştürücü karta sahip dalga monitörü ve basınç ölçerler için bir adet data logger (Agilent-Benchmark 34970 A) bulunmaktadır. Datalar yaklaşık olarak 2.5 Hz'lik bir frekansla alınmıştır.



Şekil 2 Perde düzenlemeleri. a) Taban perdesi; b) Gövde perdesi
c) Taban ve Gövde perdesi.

Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi

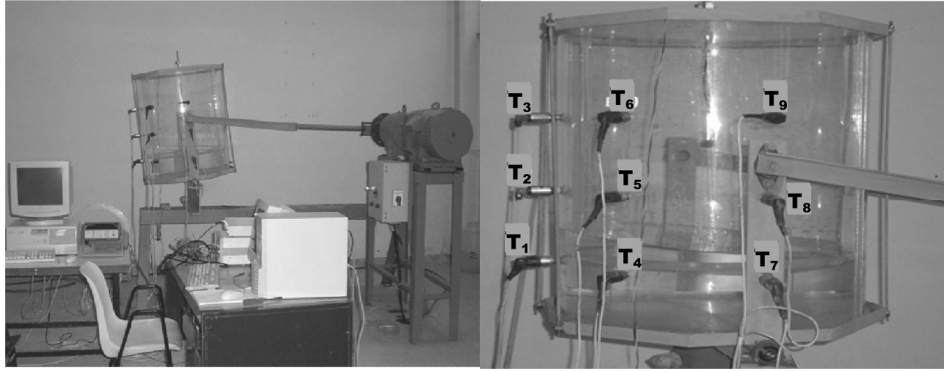
Basınç değişimleri Şekil 3’te gösterilen noktalarda “piezoresistive basınç ölçerler” tarafından kaydedilmiştir. Basınç ölçerler statik basınçlara karşılık gelen voltaj değerleri kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu tip basınç ölçerler 0 ila 5 bar arasında bir ölçüm aralığına ve %0.4-~%0.5 hassasiyete sahiptirler. Tankta oluşan dalga yükseklikleri ise dalga probu ile ölçülmüştür (Şekil 2). Bu problarda bulunan elektrotlar arasındaki su devreyi tamamlamakta ve farklı su seviyelerinde dirençler değişmektedir. Elektriksel sinyal olarak elde edilen bu ölçümler analog-dijital dönüştürücü kart ile (basınçlar için data logger ile) yükseltilmekte ve dijital hale getirilmektedir. Son olarak, bu bilgiler bir bilgisayarda kaydedilmekte ve basınç değişimleri ve dalga yükseklikleri olarak eş zamanlı çizilmektedir. 10 farklı tank konfigürasyonu ve 164 test olmak üzere toplam 20 deney dizisi gerçekleştirilmiştir. Her bir deney dizisi için, birkaç adet periyod değeri için çalışmalar yürütülmüştür. Doluluk oranı, zorlama genliği, salınım periyodu ve basınç ölçerlerin yerleri Tablo 1’de özetlenmiştir. Bu 164 testin yanı sıra, deney düzeneğinin güvenilirliğini ortaya koymak amacıyla rastgele seçilen testler tekrarlanmıştır.

Tablo 1 Test dizileri

Test No.	Perde Düzenlemesi No	Doluluk oranı (h=H*%)	Dönme açısı (Θ_0 Derece)	Tankın doğal periyodu (T_N)(s)	Zorlama periyodu aralığı (T_R)(s)
1-9	1	25	4	1.079	0.5-1.2
10-18	1	25	8	1.079	0.5-1.2
19-27	1	50	4	0.951	0.5-1.2
28-36	1	50	8	0.951	0.5-1.2
37-43	1	75	4	0.765	0.5-1
44-50	1	75	8	0.765	0.5-1
51-59	2	25	4	1.079	0.5-1.2
60-68	2	25	8	1.079	0.5-1.2
69-77	2	50	4	0.951	0.5-1.2
78-86	2	50	8	0.951	0.5-1.2
87-93	2	75	4	0.765	0.5-1
94-100	2	75	8	0.765	0.5-1
101-108	3	50	4	0.951	0.5-1.2
109-117	3	50	8	0.951	0.5-1.2
118-124	3	75	4	0.765	0.5-1
125-132	3	75	8	0.765	0.5-1
133-141	4	50	4	0.951	0.5-1.2
142-150	4	50	8	0.951	0.5-1.2
151-157	4	75	4	0.765	0.5-1
158-164	4	75	8	0.765	0.5-1

Tablo 1’de, Perde Düzenlemesi No:1, perdesiz durumu (Şekil 1); Perde Düzenlemesi No:2, taban perdeli durumu (Şekil 2-a); Perde Düzenlemesi No:3, gövde perdeli durumu (Şekil 2-b) ve Perde Düzenlemesi No:4, taban ve gövde perdeli durumu (Şekil 2-c) ifade etmektedir.

Her bir test sırasında, tank her zaman dik bir pozisyonda önceden belirlenmiş periyod ve dönme açısı ile hareketine başlatılmıştır. Deneyler iki dakika boyunca yapılmış ve ‘data logger’ ile veriler kaydedilmiştir.



Şekil 3 Deney platformu

3. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Bir tank salınımında, doluluk oranı ve salınım periyoduna bağlı olarak değişik dalgalar oluşmaktadır. Sığ suda, rezonans periyodundan çok daha düşük bir dönme periyodu için duran bir dalga oluşmaktadır. Periyod arttıkça, duran dalgalar, dalga boyu kısa ilerleyen dalgalara dönüşür. Derinlik arttıkça, rezonans periyoduna yakın periyotlarda, çalkantı büyük genlikli duran dalgalar ile karakterize edilebilir. Bu dalgalar simetrik değildir ve yüksek genlikli tank hareketlerinde ilerleyen dalgalara dönüşebilir ya da her iki dalga tipi aynı anda gözlenebilir. Çalkantı durumunda iki tip dinamik basınç oluşur. Bunlar ani değişen ve tedrici değişen basınçlar olarak adlandırılırlar. Ani değişen basınçlar sıvı ve katı yüzey arasında çarpmadan dolayı oluşan ve çok hızlı gerçekleşen basınç değişimleridir. Ani değişen basınçlar daha noktasaldırlar ve oldukça yüksek basınç değerlerine ulaşabilirler. Bunlar genellikle hidrolik sıçramalar ve ilerleyen dalgalar ile iç içedir. Tedrici değişen basınçlar ise sıvı hareketinden dolayı oluşan sıradan dinamik basınçlardır. Bunlar duran dalgalardan oluşan ve yavaş değişen basınçlardır. Önemli sayılabilecek ve ani çarpma sonucunda oluşan basınçlar serbest yüzeye yakın bir yerde ya da tank yüzeyinin ani değişen birleşim yerlerinde meydana gelir. Zorlama hareketi harmonik olsa bile bu basınçların değişimi ne harmonik ne de periyodiktir. Yüksek genlikli tank zorlamalarında, çalkantıdan dolayı oluşan basınçlar doğrusal olmayan sönümlenme etkisinden dolayı zorlamanın genliğine daha az duyarlıdır. Çalkantının etkisi ve bunun sonucunda oluşan dinamik basınç yükleri tankın geometrisine, doluluk oranına, tank hareketinin genliği ve şekline bağlıdır. Ayrıca, sıvının doğal periyoduna yakın olan periyoda kadar mümkün olan periyod aralığındaki zorlama periyoduna da bağlıdırlar. Sığ suda, çalkantı, hidrolik sıçramalar

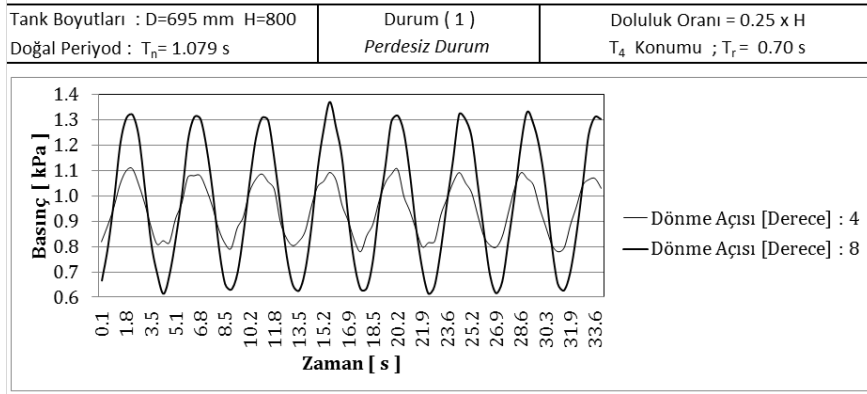
Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi

şeklinde karakterize edilir. Dönme hareketinde, sıvı derinliği hidrolik sıçramanın oluşacağı frekansa etki eder ve sıvı derinliği arttıkça bu sıçramalar azalır. Ayrıca, hidrolik sıçramanın meydana geldiği frekans aralığı dönme ekseninin yerinden de etkilenmektedir. Sabit bir eksen etrafında dönme hareketi için, çalkantı dalgasının genliği tankın zorlama genliği ile doğrusal olarak artar. Artış oranı tankın yüksek salımlı genliklerinde yavaştır. Ayrıca serpinti ve dalga kırılması gibi yüzey dalgaları üzerinde belirgin bir etkisinin de olduğu söylenebilir [2], [8].

Deneylerin yapıldığı zorlama periyodu aralığında, %75 doluluk oranındaki doğal periyod düşünülerek 0.7 s değeri seçilmiştir. Amaç, bazı periyodlarda doğal periyoda yakın bir periyod belirlemektir. Bunun gibi başka çalışma periyotları da seçilebilir.

Durum 1 için, %25 doluluk oranında, perdesiz halde, dönme açısı 4° 'den 8° 'ye çıkartıldığında basınçta artış gözlenmiştir ve zorlama periyodunun artışı da yine basınç artışı olarak tepki vermiştir. Serbest yüzeye yakın basınç ölçerlerden elde edilen basınç değerleri daha derindekilerle karşılaştırıldığında daha çok dalgalanma göstermektedir. Bu nedenle zorlama genliğinin çalkantı yüklerini belirgin bir biçimde etkilediği anlaşılmıştır. Ayrıca, periyod aralıkları dikkate alınır ise maksimum basınç değerleri T4 konumunda elde edilmiştir (Şekil 1).

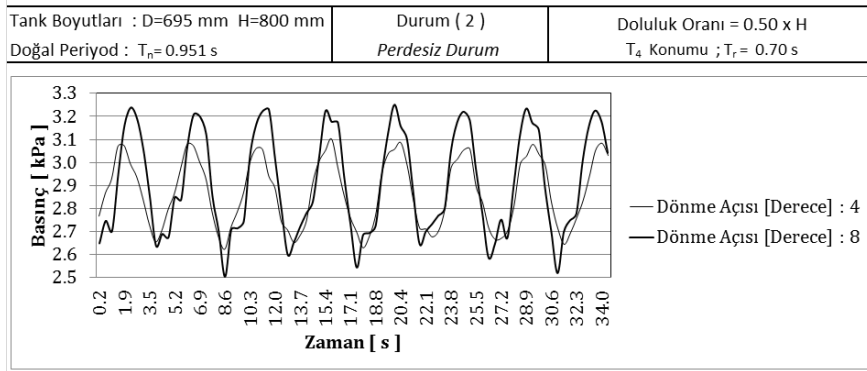
Zorlama genliği arttıkça, sıvı hareketi, hidrolik sıçrama ve dalga kırılması gibi sıvı hareketlerine bağlı olarak şiddetlenir. Sıvı hareketinin şiddetlenmesi üç boyutlu etkilere ve tankın geometrisine bağlıdır (Şekil 4).



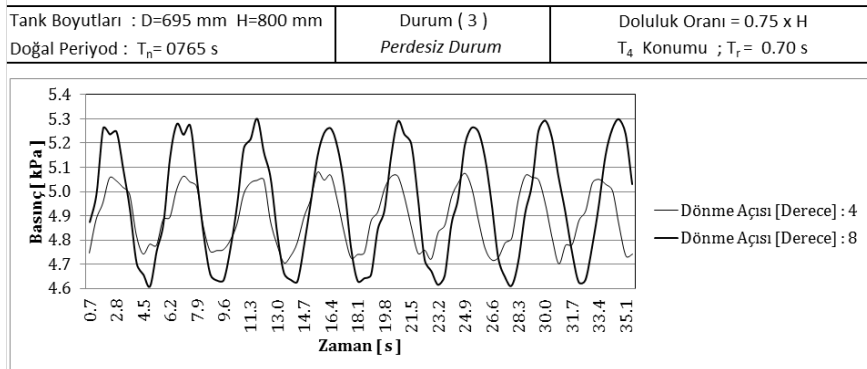
Şekil 4. %25 doluluk oranı ve perdesiz durum için 4° ve 8° dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

Durum 2 için, %50 doluluk oranına sahip perdesiz bir tankta, 4° ve 8° dönme açıları için maksimum basınç değerleri %25 doluluk oranına göre daha fazladır ve periyod aralıkları göz önüne alındığında, T4 konumu maksimum değeri vermektedir. Doluluk oranı arttıkça, tankın geometrisi ve 3-boyutlu etkilerden dolayı çalkantının azaldığı gözlenmiştir (Şekil 5).

Durum 3 için, %75 doluluk oranına sahip perdesiz bir tankta, 4⁰ ve 8⁰ dönme açıları için maksimum basınç miktarları, %50 ve %25 doluluk oranlarına göre daha fazladır. Sıvı derinliğinin artmasıyla dönme hareketinin genliğinin ve periyodunun çalkantı olayının şiddetini doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Bu durum için, T2 ve T5 konumları yaklaşık olarak aynı değerleri vermektedir. Ayrıca, T3 konumundaki maksimum basınç değeri, T6 ve T9 konumlarından daha büyüktür. T4 konumuna ait basınç değerleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5 %50 doluluk oranı ve perdesiz durum için 4⁰ ve 8⁰ dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.



Şekil 6 %75 doluluk oranı ve perdesiz durum için 4⁰ ve 8⁰ dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

Durum 4 için, %25 doluluk oranına sahip tabanda düşey bir perde olan tankta; maksimum basınç değerleri hala T4 konumundan elde edilmektedir (Şekil 1). Düşey perdenin etkisi en çok sığ su durumunda göze çarpmaktadır ve özellikle devrilme moment etkisinin önemli oranda azaldığı görülmüştür. Tankın içine yerleştirilen düşey perde ve buradaki akımın bir

Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi

sınır tabakası oluşturarak viskoz etkilerle, oluşan kinetik enerjiyi dağıttığı anlaşılmıştır. Tankın ortasına düşey yerleştirilen perdenin perdesiz duruma göre maksimum basınçları düşürdüğü, ancak düşey perdeden dolayı oluşan girdaplardan basınç dalgalanmalarının meydana geldiği görülmüştür. T4 konumunda, basınç değerleri perdesiz durum ile karşılaştırılarak sırası ile Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir.

Durum 5 için, %50 doluluk oranına sahip tabanda düşey bir perde olan tankta; doluluk oranı arttıkça, tabandaki düşey perdenin etkisi azalmaktadır. Bu durumda, dönme açısının artmasıyla maksimum basınçların azaldığı ve ayrıca doluluk oranının artmasıyla basınç dalgalanmalarının ve viskoz sönüm etkilerinin azaldığı görülmüştür. 4^0 ve 8^0 dönme açıları için T4 ve T5 konumlarındaki basınç değerleri daha büyük olmaktadır. Ayrıca, T5 konumunda periyot aralığı göz önüne alınarak perdesiz durumla karşılaştırıldığında T2 konumundan daha büyük basınç değerleri vermektedir (Şekil 9 ve 10).

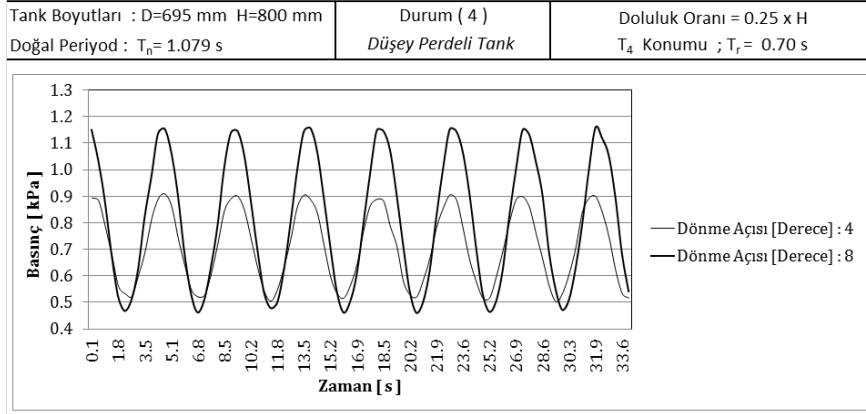
Durum 6 için, %75 doluluk oranına sahip tabanda düşey bir perde olan tankta; basınç dalgalanmaları ve viskoz sönümleme etkisi daha da azalmaktadır. Maksimum basınçlar %50 ve %25 doluluk oranlarından daha fazladır. Ek olarak, 4^0 ’lik dönme açısı için T4, T5 ve T3 konumlarındaki maksimum basınç değerleri doğal periyoda kadar diğer basınç ölçerlerden fazladır. Doğal periyot üzerindeki periyotlar ve periyot değerleri göz önüne alınarak 8^0 ’lik dönme açısı için T3, T6 ve T9 konumlarında yaklaşık olarak aynı değerleri vermektedirler. T4 konumuna ait verilerin perdesiz durumla kıyaslanması sırası ile Şekil 11 ve 12’te verilmiştir.

Durum 7 için, %50 doluluk oranına sahip gövde perdeli tankta (Şekil 2); gövde perdesinin dalganın ilerleyen dalga olma karakteristiğini artırdığı gözlenmiştir. Dolayısıyla, gövde perdeli tank sığ su özelliği göstermektedir. Zorlamanın genliği arttıkça, dalga kırılması ve üç boyutlu etkilerden kaynaklanan sıvı hareketinin şiddeti artmaktadır. 4^0 ve 8^0 dönme açıları için T4 ve T5 konumlarındaki maksimum basınç değerleri diğerlerine göre daha fazladır. Şekil 13’de, T4 konumundaki basınç değerleri görülmektedir.

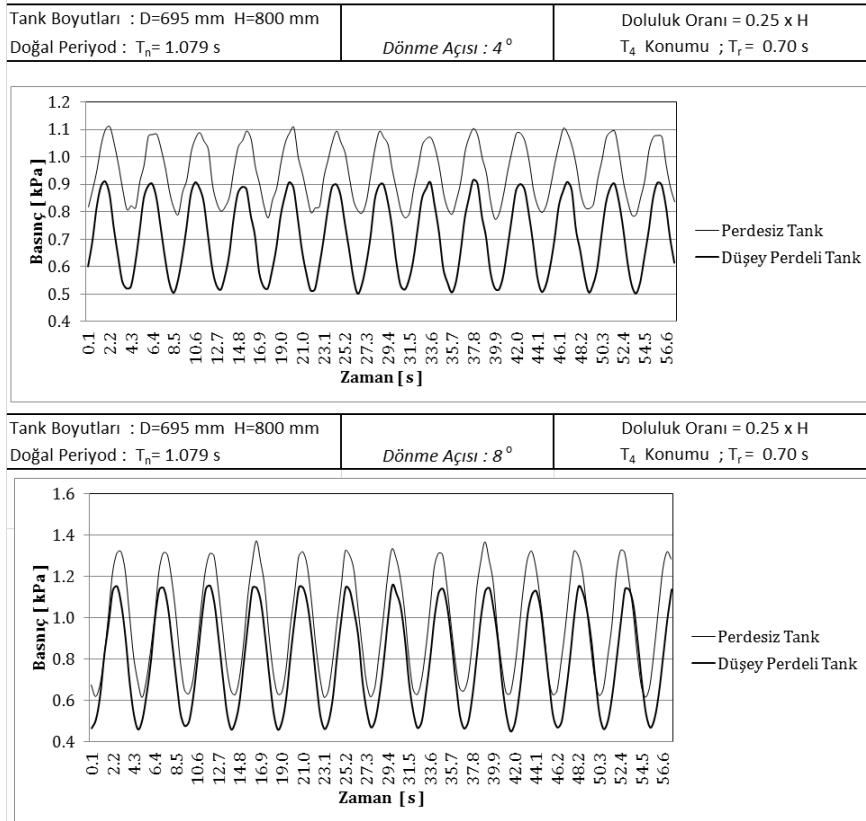
Bu durumda, T4 konumundaki basınç değerlerinin perdesiz durumla karşılaştırılması Şekil 14’da verilmiştir. Gövde perdeli durumun daha etkili olduğu ve maksimum basınçları düşürdüğü söylenebilir.

Durum 8 için, %75 doluluk oranına sahip gövde perdeli tankta; perdesiz ve taban perdeli durumla karşılaştırıldığında doluluk oranı ve dönme açısı arttığında maksimum basınç değerleri azalmıştır. Bu durumda, gövde perdesi sığ su etkisi yaratmakta ve çalkantı dalgasının ilerleyen dalga olma özelliğini arttırmaktadır. Bunun sonucu olarak da daha yüksek çarpma basınçları oluşabilmektedir (Şekil 15 ve 16).

Durum 9 için, %50 doluluk oranına sahip gövde ve düşey taban perdeli tankta (Şekil 2); perdesiz durumla karşılaştırıldığında maksimum basınç değerleri düşmüştür. Bu durumdaki düşey perdenin etkisi sıvı derinliği arttıkça sadece düşey perde olan durumdan daha az etkili olduğu söylenebilir. Yatay gövde perdesi üzerindeki akım, bir hidrolik sıçrama ve bir dalga kırılması oluşturarak enerji sönümleyen bir sığ su karakteristiği sunmaktadır. Ayrıca, bu perde tipinin çalkantı dalgasının ilerleyen dalga olma karakteristiğini artırdığı ve yüksek bir çarpma basıncıyla sonuçlanabilen çalkantı dalgası yaratabileceği görülmüştür. 4^0 ve 8^0 ’lik dönme açıları için T4 ve T5 konumlarındaki basınç miktarları diğerlerine göre fazladır (Şekil 17 ve 18).

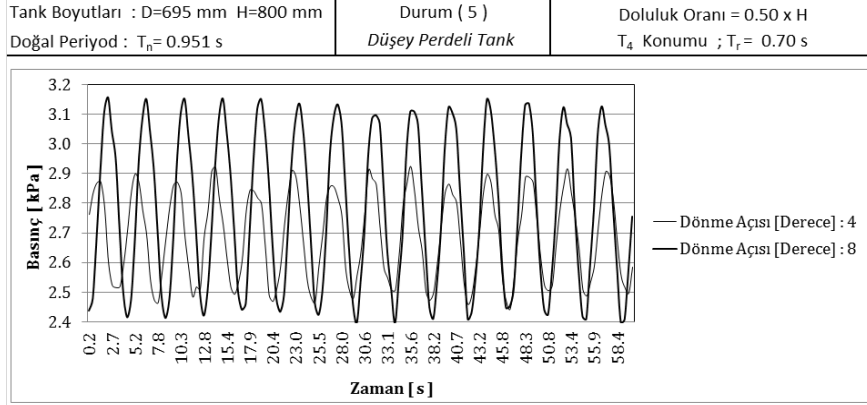


Şekil 7 %25 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

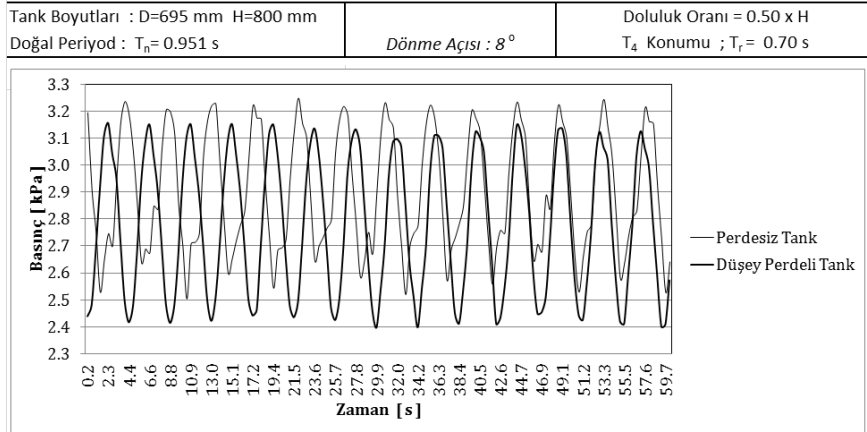
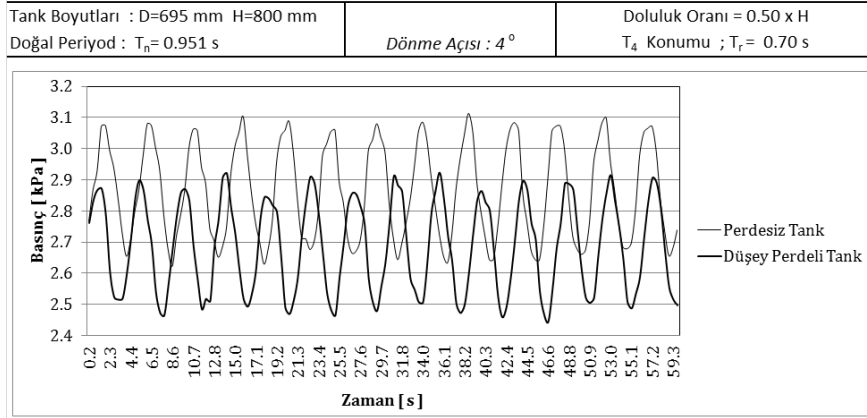


Şekil 8 %25 doluluk oranı, perdesiz ve düşey perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.

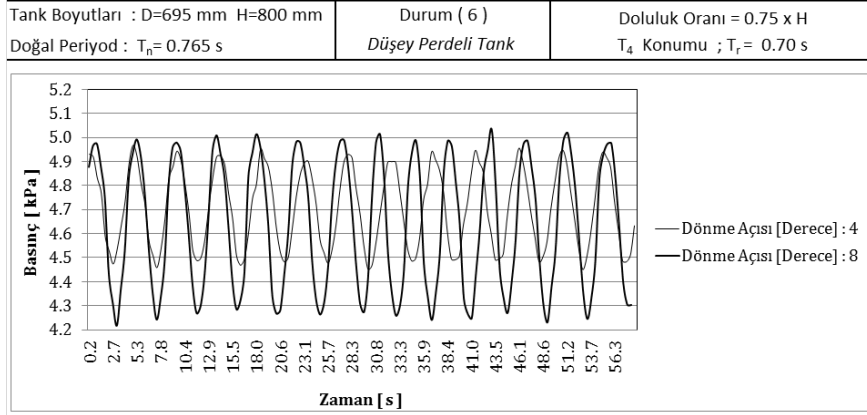
Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi



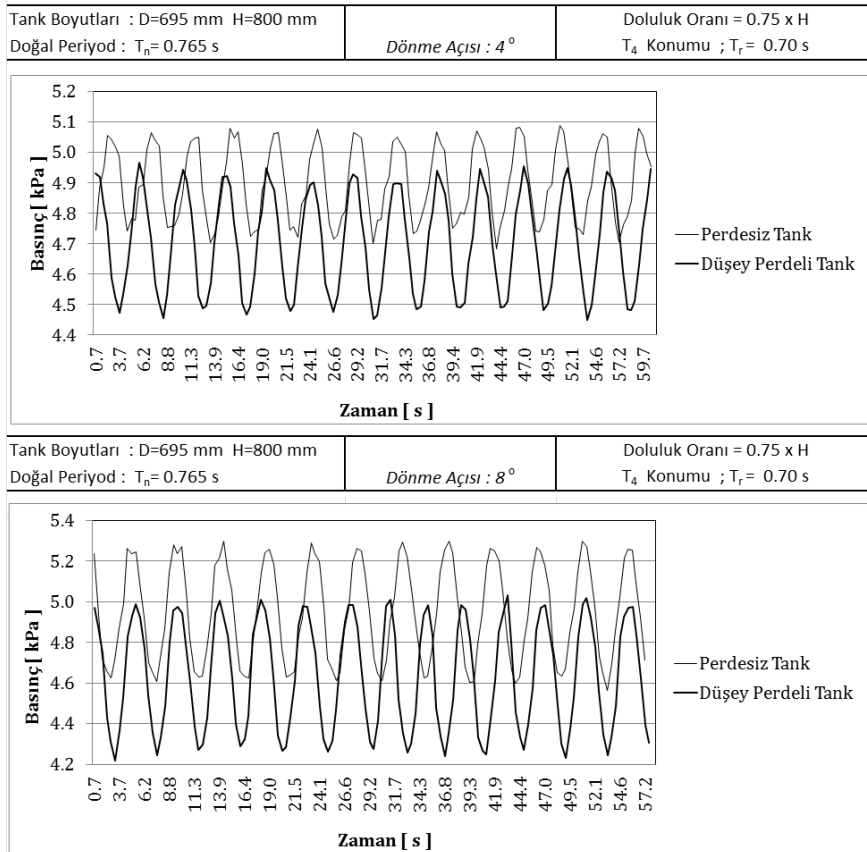
Şekil 9 %50 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.



Şekil 10 %50 doluluk oranı, perdesiz ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

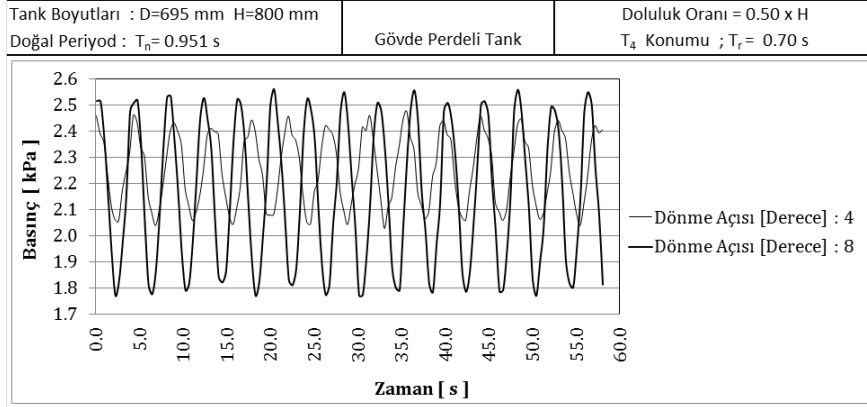


Şekil 11 %75 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

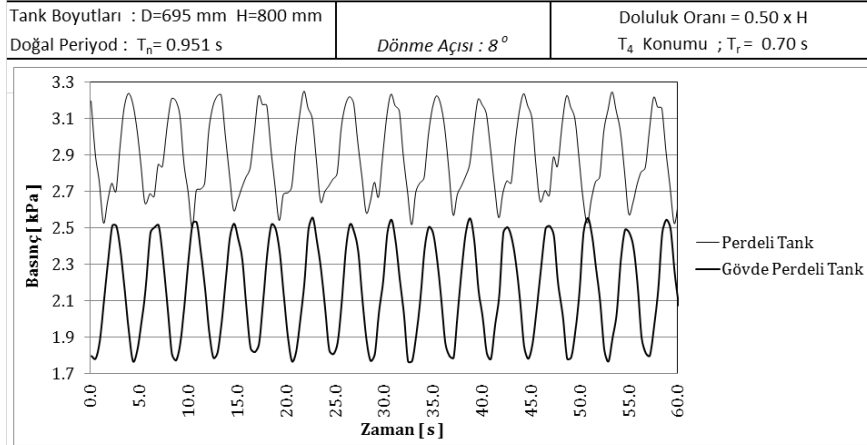
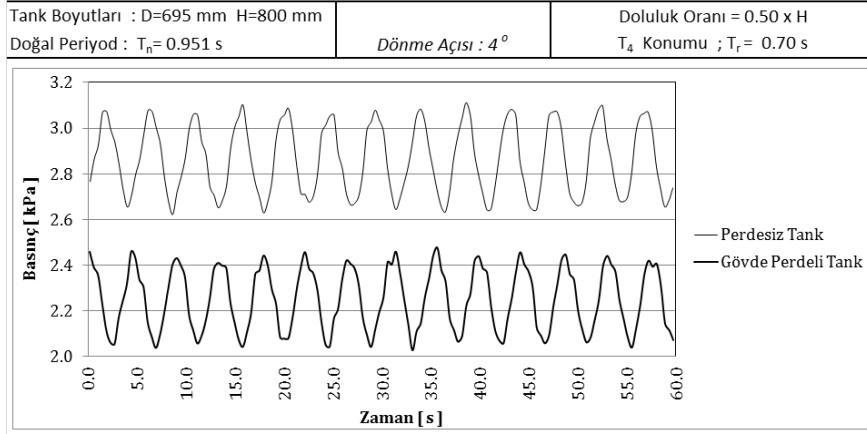


Şekil 12 %75 doluluk oranı, perdesiz ve düşey perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.

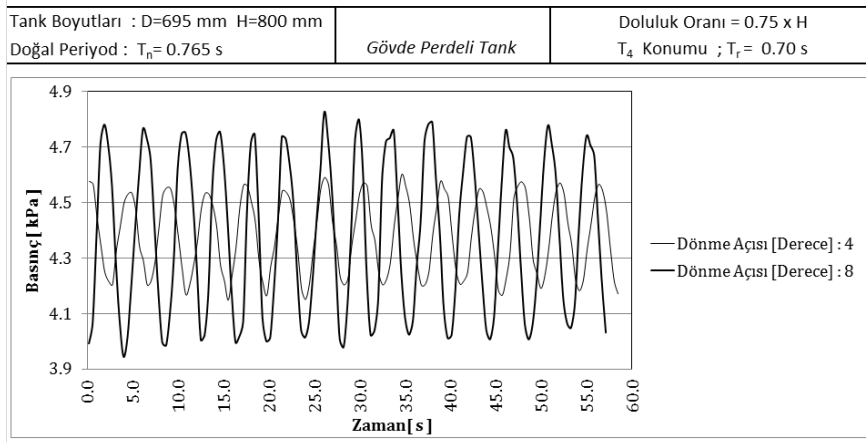
Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi



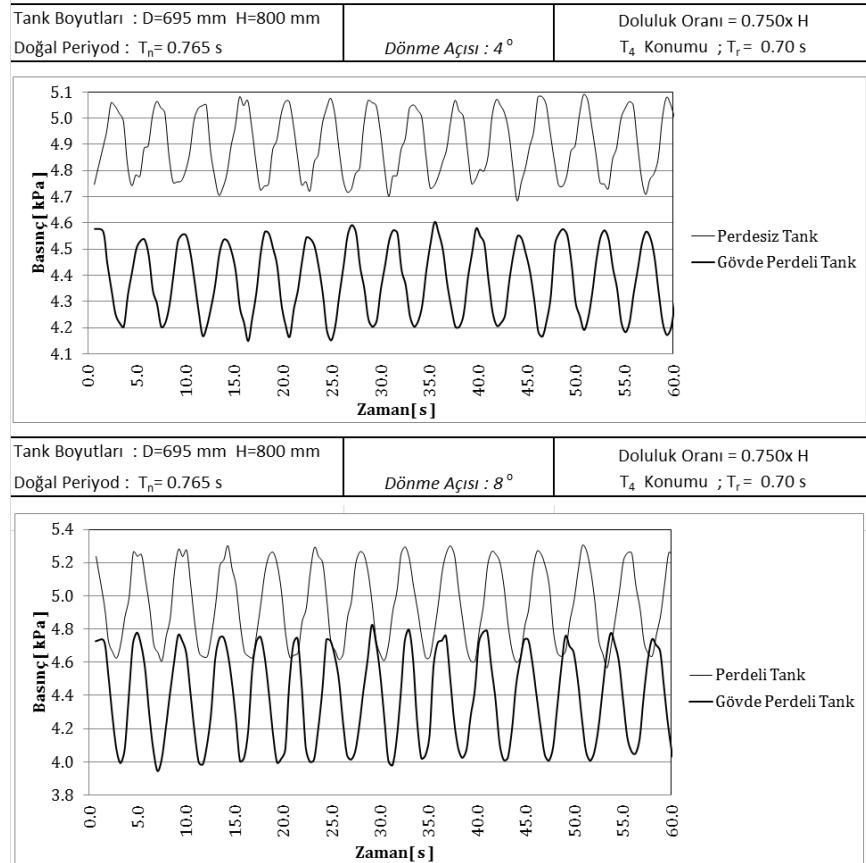
Şekil 13 %50 doluluk oranı ve gövde perdeli durum için 4° ve 8° dönme açlarına göre basınç değerlerinin değişimi.



Şekil 14 %50 doluluk oranı, perdesiz ve gövde perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.

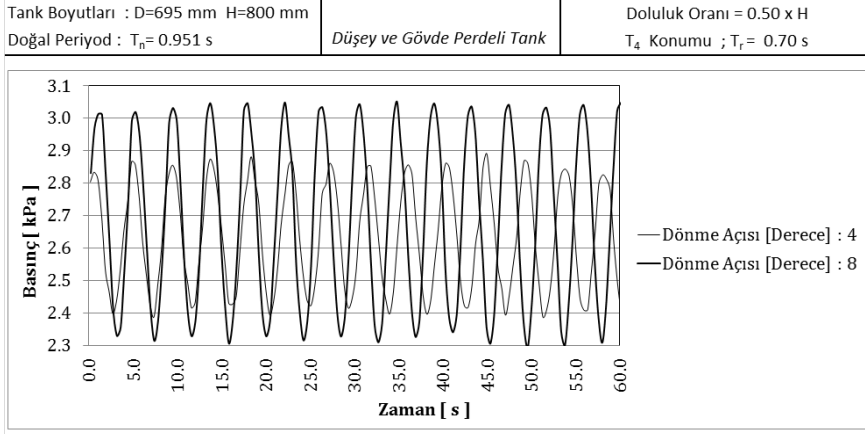


Şekil 15 %75 doluluk oranı ve gövde perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılına göre basınç değerlerinin değişimi

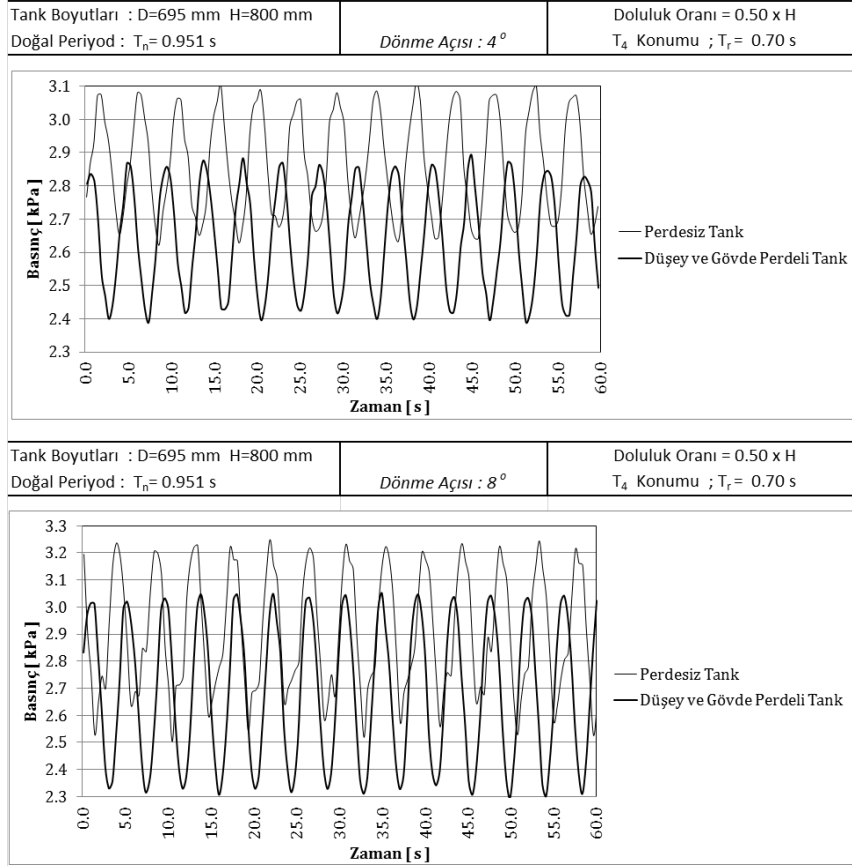


Şekil 16 %75 doluluk oranı, perdesiz ve gövde perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.

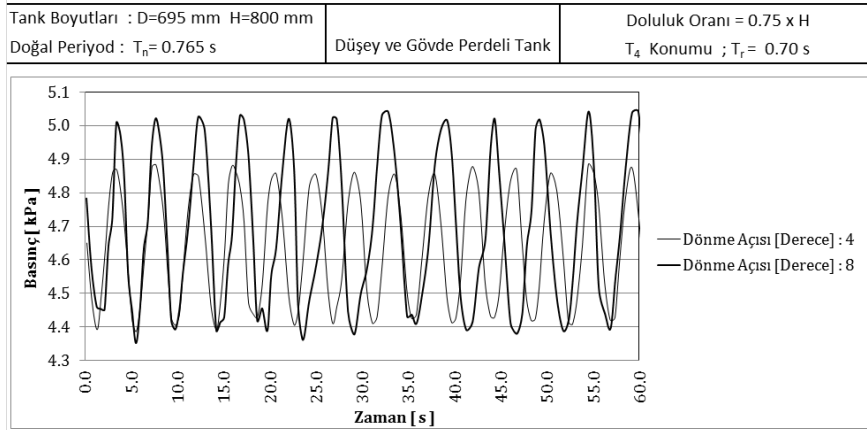
Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi



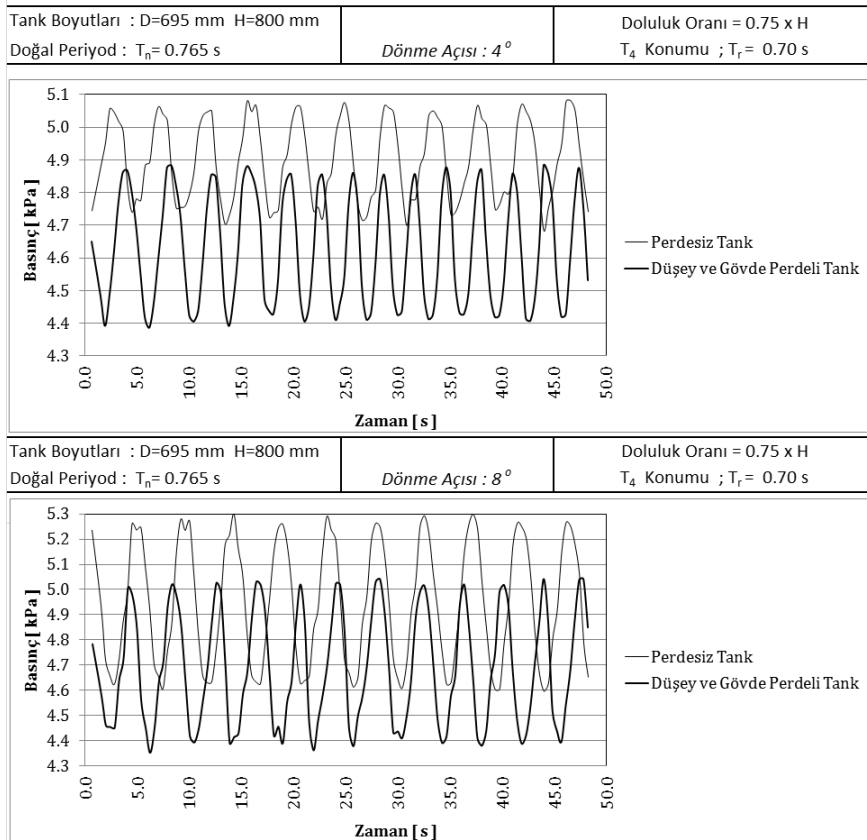
Şekil 17 %50 doluluk oranı, düşey ve gövde perdeli durum için 4° ve 8° dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi



Şekil 18 %50 doluluk oranı, perdesiz durum, düşey ve gövde perdeli durumlar için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması



Şekil 19 %75 doluluk oranı, düşey ve gövde perdeli durum için 4° ve 8° dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

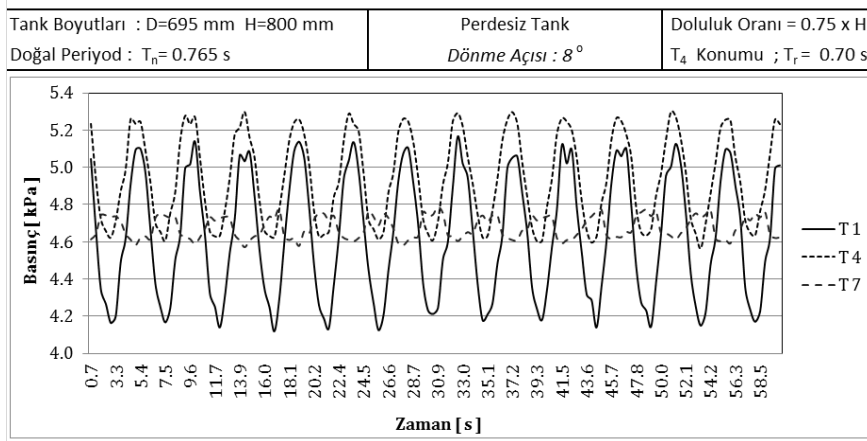


Şekil 20 %75 doluluk oranı, perdesiz durum, düşey ve gövde perdeli durumlar için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması

Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi

Durum 10 için, %75 doluluk oranına sahip gövde ve düşey taban perdeleri birlikte olan tankta; perdesiz durumla karşılaştırıldığında doluluk oranı ve dönme açısı arttığında maksimum basınç değerleri azalır. Bu durumdaki düşey perdenin etkisi sıvı derinliği arttıkça sadece düşey perde olan durumdan daha az etkili olduğu söylenebilir. Bu durumda, gövde perdesi sıvı su etkisi göstermekte çalkantı dalgasının ilerleyen dalga olma karakteristiğini arttırmaktadır. Bu olay, zorlama genliği ve periyodu arttıkça yüksek çarpma basınçları oluşturabilmektedir (Şekil 19 ve 20).

Durum 11 için, %75 doluluk oranına sahip perdesiz bir tankta; 8° 'lik dönme açısı için T4 konumundaki maksimum basınç miktarı T1 ve T7 konumlarından daha fazladır. Dönme açısının, çalkantı olayının lineer olmayan yapısını, artan doluluk oranıyla doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Zorlama genliği arttıkça, sıvı hareketi, tank geometrisi ve üç boyutlu etkilerden dolayı şiddetlenir (Şekil 21).



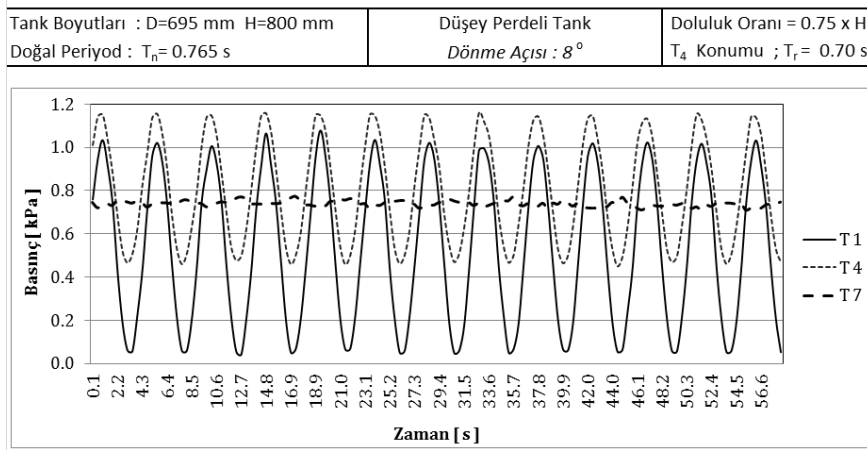
Şekil 21 %75 doluluk oranı ve perdesiz durum için 8° dönme açısında T1, T4 ve T7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi

Durum 12 için, %75 doluluk oranına sahip tabanda düşey bir perde olan tankta; maksimum basınç değerleri hala T4 konumundan elde edilmektedir. Tankın içine yerleştirilen düşey perde ve buradaki akımın bir sınır tabakası oluşturarak viskoz etkilerle, oluşan kinetik enerjisi dağıttığı anlaşılmıştır. Diğer taraftan, basınç dalgalanmaları ve viskoz sönümlenme etkisi doluluk oranının artmasıyla azalmıştır (Şekil 22).

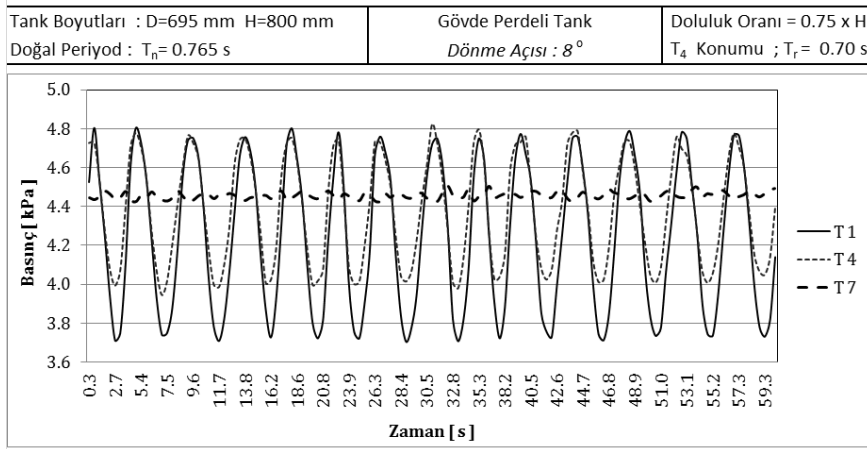
Durum 13 için, %75 doluluk oranına sahip gövde perdeli tankta; 8° 'lik dönme açısı için T1 ve T4 konumlarındaki maksimum basınç değerleri hemen hemen aynı değerlerdir. Yatay bir gövde perdesi üzerindeki akım, yüksek çarpma basıncı ile sonuçlanabilecek sıvı su karakteristiği sergilemektedir. 8° 'lik dönme açısı için maksimum basınçların değeri düşey perdeli durumdakinden daha büyüktür, fakat perdesiz tanka göre daha azdır (Şekil 23).

Durum 14 için, %75 doluluk oranına sahip gövde ve düşey taban perdeleri birlikte olan tankta; perdesiz durumla karşılaştırıldığında doluluk oranı ve dönme açısı arttığında

maksimum basınç değerleri azalmaktadır. Düşey perde etkisinin doluluk oranı arttıkça daha az etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 24).

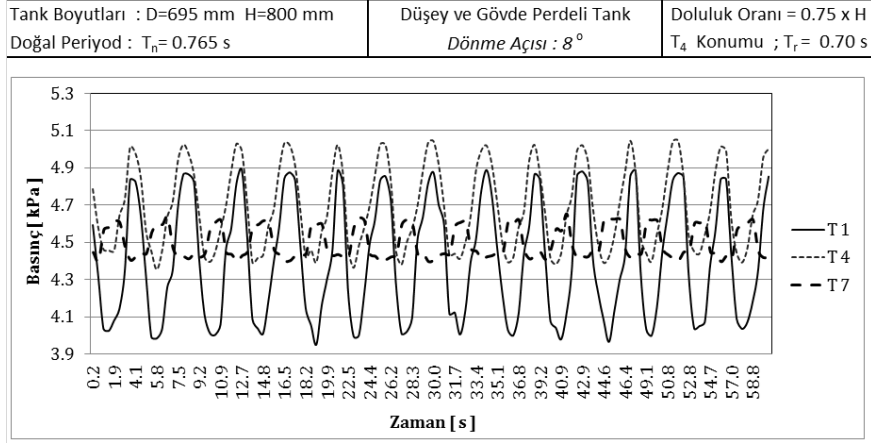


Şekil 22 %75 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 8° dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi.



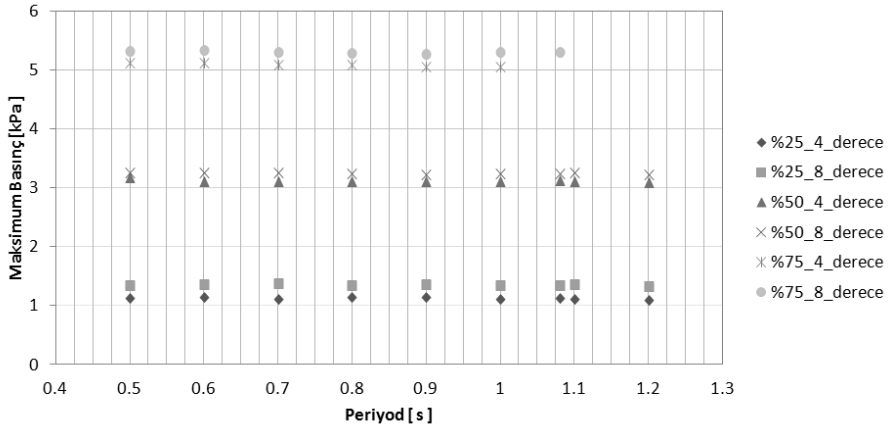
Şekil 23 %75 doluluk oranı ve gövde perdeli durum için 8° dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi

Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi

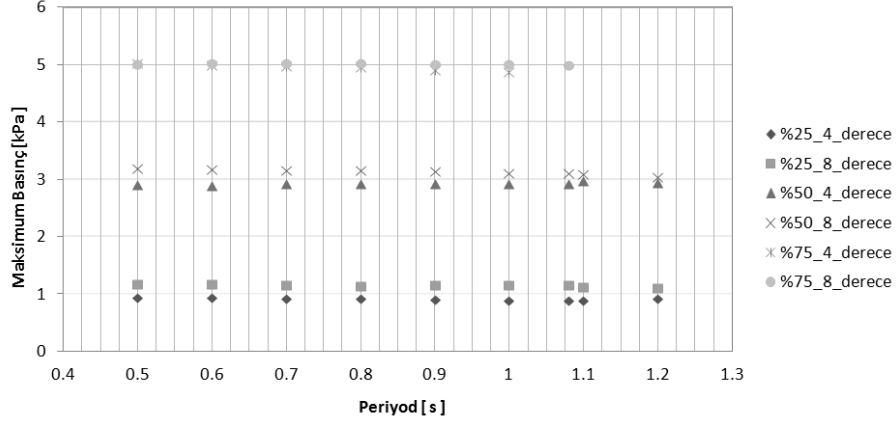


Şekil 24 %75 doluluk oranı, düşey ve gövde perdeli durumlar için 8° dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi

Şekil 25'de, perdesiz durumda, %25, %50 ve %75 doluluk oranlarında T_4 'deki maksimum basınç değerleri verilmiştir. Doluluk oranı arttıkça basınç değerlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 26'da düşey perdeli durumla karşılaştırıldığında, %25 doluluk oranı ve 4° için maksimum basınç değerinin % 20 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde, %25 doluluk oranı ve 8° için maksimum basınç değeri % 18 oranında azalmıştır. Doluluk oranı arttıkça maksimum değerdeki azalmanın düştüğü görülmüştür. Bu durumda, %50 doluluk oranı ve 4° için maksimum basınç değeri % 6.5 oranında, 8° için maksimum basınç değeri ise % 2.8 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, %75 doluluk oranı ve 4° için maksimum basınç değeri % 2.4 oranında, 8° için maksimum basınç değeri ise % 5.3 oranında azalmıştır.

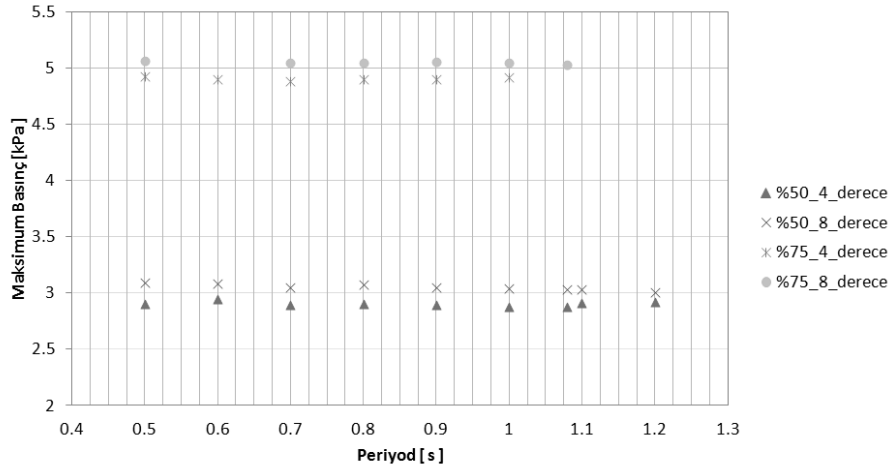


Şekil 25 Perdesiz durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.



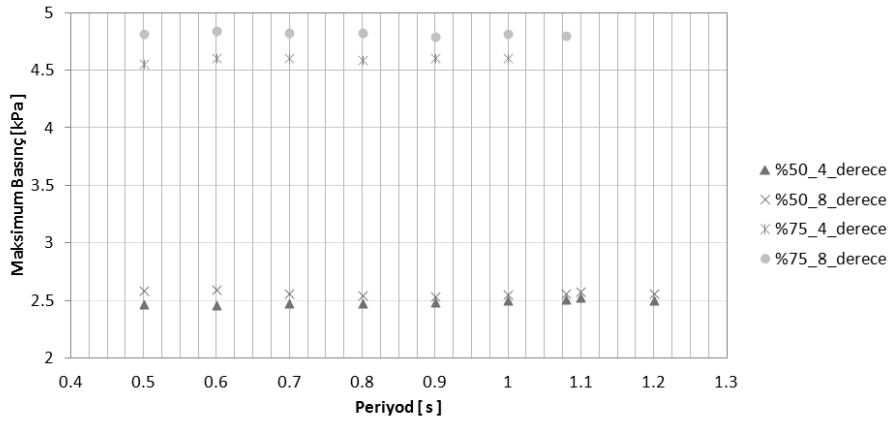
Şekil 26 Düşey perdeli durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.

Şekil 25'deki maksimum basınç değerleri, Şekil 27'de verilen gövde perdeli durumla karşılaştırıldığında, maksimum basınçtaki azalma değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, %50 doluluk oranı ve 4° için maksimum basınç değeri % 25 oranında, 8° için maksimum basınç değeri % 27 oranında azalmıştır. Doluluk oranı arttıkça maksimum değerdeki azalmanın bu durumda da düştüğü görülmüştür. %75 doluluk oranı ve 4° için maksimum basınç değeri % 11 oranında, 8° için maksimum basınç değeri ise % 10 oranında azalmıştır.



Şekil 27 Gövde perdeli durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi

Şekil 25'deki maksimum basınç değerleri, Şekil 28'de verilen düşey ve gövde perdeli durumla karşılaştırıldığında, maksimum basınçtaki azalma değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Bu durumda, %50 doluluk oranı ve 4^0 için maksimum basınç değeri % 8 oranında, 8^0 için maksimum basınç değeri % 7 oranında azalmıştır. Doluluk oranı arttıkça maksimum değerdeki azalmanın bu durumda da düştüğü görülmüştür. %75 doluluk oranı ve 4^0 için maksimum basınç değeri % 5 oranında, 8^0 için de maksimum basınç değeri % 5 oranında azalmıştır. Sonuç olarak, gövde perdeli durumun maksimum basınçların azalmasında daha etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 28 Düşey ve gövde perdeli durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.

4. SONUÇLAR

Son yıllarda, büyük yapılar içinde oluşan sıvı çalkantısıyla ilgili sayısal hesaplamalarda önemli gelişmeler sağlanmıştır. Diğer taraftan, bu sayısal hesaplamaları doğrulayacak güvenilir deneysel çalışmalar yetersiz kalmıştır. Bu makalede, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda yürütülen silindirik bir tank içindeki sıvı çalkantısıyla ilgili deneysel çalışmaların bazı sonuçları sunulmuştur. Tanklardaki serbest su yüzeyi, çeşitli araçlarda sıvı çalkantısı, stabilize ve yapısal hasar gibi bazı problemler oluşturması açısından büyük öneme sahiptir. Çeşitli doluluk oranlarında ve perde durumlarında bir model ölçeğindeki silindirik bir tanktaki çalkantı deneysel olarak incelenmiştir. Zorlama parametreleri, çalkantı yüklerinin hassasiyetini incelemek için sistematik bir şekilde değiştirilmiştir ve basınç-zaman grafikleri çizilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kullanılan perde düzenlemelerinin sıvı hareketini belirgin bir biçimde azalttığı görülmüştür.

Perdesiz durumda, T4 konumundaki basınç değişimlerine baktığımızda, basınç değeri her %25'lik doluluk oranı artışı için doğrusal olarak artmıştır. Basınç değişimleri ve doluluk oranındaki değişim arasında doğrusal bir ilişkinin var olduğu ve bunun atalet kuvvetlerinin etkisini temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

Deneysel çalışmalar detaylı bir şekilde incelendiğinde, en önemli parametrelerin dönme periyodu ve açısı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, perde düzenlemeleri göz önüne alındığında, düşey perde durumunun ve gövde perdeli durumun basınç değerlerini düşürmekte daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Gövde perdeli durumun ise tüm doluluk oranlarında diğer durumlara göre daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Semboller

d	silindirik tankın çapı
g	yerçekimi ivmesi
h	sıvının derinliği
H	tankın yüksekliği
Θ_0	dönme açısı
T_N	doğal periyot
T_R	salınım periyodu

Bilgilendirme

Bu makale, ikinci yazarın danışmanlığında yürütülen ve üçüncü yazarın yaptığı yüksek lisans tezinin bir kısmını baz alarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] İbrahim RA, Pilipchuk VN, Ikeda T (2001) Recent Advances in Liquid Sloshing Dynamics. Applied Mechanical Review 54(2):133-199.
- [2] Faltinsen OM and Timokha AN (2009) Sloshing. Cambridge University Press New York, USA.
- [3] Akyıldız H, Ünal NE (2005) Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing. Ocean Engineering 32:1503-1516.
- [4] Akyıldız H, Ünal NE (2006) Sloshing in a three dimensional rectangular tank: Numerical simulation and experimental validation. Ocean Engineering 33(16):2135-2149.
- [5] Bağcı T, (2007) Examining Pressure Changing In Cylindrical Tanks Caused By Sloshing. M.S. thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey (in Turkish).
- [6] Bayer AM (2007) Design Of Annular Baffles For Suppressing The Sloshing Pressure In Cylindrical Storage Tanks, M.S. thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey (in Turkish).

- [7] Sames PC, Marcouly D, Schellin ET (2002) Sloshing in rectangular and cylindrical tanks. *Journal of Ship Research* 46(3):186-200.
- [8] İbrahim RA (2005) *Liquid sloshing dynamics. Theory and Applications*. Cambridge University Press.
- [9] Pal P, Bhattacharyya SK (2010). Sloshing in partially filled liquid containers – Numerical and experimental study for 2-D problems. *Journal of Sound and Vibration* 329, 4466-4485.
- [10] Younes MF, Younes YK, El-Madah M, Ibrahim IM, El-Dannanh EH (2007). An experimental investigation of hydrodynamic damping due to the vertical baffle arrangements in an rectangular tank. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 221, 115-123.
- [11] Eswaran M., Saha UK, Maity D.(2009). Effect of the baffle on a partially filled cubic tank: Numerical simulation and experimental validation. *Computer and Structures* 87, 198-205.
- [12] El Damatty AA, Saafan MS, Sweedan AMI (2005) Experimental Study Conducted on a Liquid-Filled Combined Conical Tank Model. *Journal of Thin Walled Structures* 43:1398-1417.
- [13] Panigrahy PK, Saha UK, Maity D (2009) Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks. *Ocean Engineering* 36(3-4):213-222.
- [14] Biswal KC, Bhattacharyya SK, Siha PK (2002) Coupled Dynamic Response of Liquid Filled Composite Cylindrical Tanks with Baffles. *ASME, 5th Symposium on FSI, AE&FIV+N*, 17-22.
- [15] Biswal KC, Bhattacharyya SK, Siha PK (2003) Free Vibration Analysis of Liquid Filled Tank with Baffles. *Journal of Sound of Vibration*, 259CI, 177-192.
- [16] Biswal KC, Bhattacharyya SK, Sinha PK (2004) Dynamic Response Analysis of a Liquid-filled Cylindrical Tank with Annular Baffle. *Journal of Sound and Vibration* 274:13-37.
- [17] Biswal KC, Bhattacharyya SK, Siha PK (2006) Non-linear Sloshing in Partially Liquid Filled Containers with Baffles. *Int. Journal on Numerical Methods in Engineering* 68(3):317-337.
- [18] Bhattacharyya SK (2006) Suppression of liquid sloshing using baffles. Dept. Civil Eng., Indian Institute of Technology.
- [19] Gavriluk I, Lukovsky I, Trotsenko Y, Timokha A (2006) Sloshing in a Vertical Cylindrical Tank with an Annular Baffle. Part1. Linear Fundamental Solutions. *J. Eng.Mathematics* 54:71-88.