

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
GEMİ İNŞAATI VE DENİZ BİLİMLERİ FAKÜLTESİ



GEMİ VE DENİZ TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ
BÖLÜMÜ

TEKNİK RAPOR

Rapor Tipi: Araştırma – Geliştirme Çalışması

Yazar(lar): Prof.Dr. Hakan AKYILDIZ

Onaylayan:

DÖNME HAREKETİ VERİLEN RİJİT
SİLİNDİRİK BİR TANKTA SIVI
ÇALKANTISININ DENEYSEL
İNCELENMESİ

DEN 2015 / 01

13.01.2015

ÖNSÖZ

Bu rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, Araştırma Fonunun desteklediği bilimsel bir projenin deneysel çalışmalarının bazı sonuçlarını göstermektedir. Sıvı çalkantısı, kara tankerlerinde, sıvı yük taşıyan gemilerin yük tanklarında ve deprem yüklerine maruz kalmış sıvı depolama tanklarında oluşabilir. Akışkan hareketinden dolayı ya da kazalar sonucunda, bu tür tanklarda yapısal hasarlar oluşabilir. Özellikle, gemi kazalarında ve petrol depolama kara tanklarında kazalar nedeniyle büyük çevre kirlilikleri ve ekonomik kayıplar ortaya çıkabilir. Kısmi doldurulmuş sıvı tanklarında serbest yüzey etkisi oluşacağı için çalkantı şeklinde büyük akışkan hareketleri oluşabilir ve bu akışkan hareketleri lineer olmayan bir problemdir. Oluşan çalkantı hareketi tank duvarlarına yapısal hasar verecek şekilde büyük kuvvetler uygular. Genel olarak, çalkantı hareketinin genliği tank hareketinin genliğine ve frekansına, içinde bulunan sıvının özelliklerine ve tankın geometrisine bağlıdır. Dolayısıyla, tank hareketinin frekansı tank içindeki sıvının doğal frekanslarından birine yaklaştıkça kuvvetli çalkantı hareketleri beklenmelidir. Bu projede, içinde sıvı bulunan silindirik bir tanktaki akışkan hareketleri ve bunun sonucunda oluşan basınç dağılımları deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, kısmi dolu, kapalı, perdeli ve perdesiz bir tank içindeki çalkantı hareketlerinin incelenebilmesi için bir deney düzeneği tasarlanmış ve çalkantı hareketlerinin etkileri araştırılmıştır.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.v
SEMBOLLER	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	4
3. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VETARTIŞMA.....	8
3.1 Şekil 2'deki Perde Düzenlemesinde T4 Basınç Noktasındaki Basınç Değişimleri.....	9
3.1.1 Şekil 2'deki perde düzenlemesinde T4 basınç noktasındaki maksimum basınçlar.....	13
3.2 Şekil 3'deki Perde Düzenlemesinde T4 Basınç Noktasındaki Basınç Değişimleri.....	18
3.2.1 Şekil 3'deki perde düzenlemesinde T4 basınç noktasındaki maksimum basınçlar.....	34
4. SONUÇLAR	37
KAYNAKLAR	39

SEMBOLLER

P	: Sıvı basıncı
θ	: Tankın dönme açısı
θ_0	: Tankın dönme genliği
ω_n	: Tankın doğal frekansı
ω_R	: Tanka verilen dönme hareketinin frekansı
h	: Tankın içindeki sıvının derinliği
g	: Yerçekimi ivmesi
D	: Silindirik tankın çapı
H	: Tankın yüksekliği
T_N	: Tankın doğal periyodu
T_R	: Tanka verilen dönme hareketinin periyodu

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1 : Test dizileri	19
--------------------------------------	----

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1a: Tank geometrisi ve basınç ölçerlerin konumu.....	5
Şekil 1b: Deney platformu.	5
Şekil 2: Perde düzenlemeleri (Birimler mm'dir).	6
Şekil 3: Perde düzenlemeleri. a) Taban perdesi; b) Gövde perdesi c) Taban ve Gövde Perdesi.	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 4: Perdesiz tanktaki basınç değişimleri.	9
Şekil 5: Perdeli tank düzenlemesinde basınç değişimleri (Şekil 2(a) için).	10
Şekil 6: Perdeli tank düzenlemesinde basınç değişimleri (Şekil 2(b) için)	10
Şekil 7: Perdeli tank düzenlemesinde basınç değişimleri (Şekil 2(c) için) ..	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 8: Perdeli tank düzenlemesinde basınç değişimleri (Şekil 2(d) için) ..	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 9: Perdesiz tankta T_1 , T_4 , T_7 noktalarındaki basınç değişimleri ...	11
Şekil 10: Perdeli tankta T_1 , T_4 , T_7 noktalarındaki basınç değişimleri (Şekil 2(a) için).	12
Şekil 11: Perdeli tankta T_1 , T_4 , T_7 noktalarındaki basınç değişimleri (Şekil 2(b) için).	12
Şekil 12: Perdeli tankta T_1 , T_4 , T_7 noktalarındaki basınç değişimleri (Şekil 2(c) için)	13
Şekil 13: Perdeli tankta T_1 , T_4 , T_7 noktalarındaki basınç değişimleri (Şekil 2(d) için)	13
Şekil 14: Perdesiz tankta maksimum basınç değişimler.....	14
Şekil 15: Perdeli tankta maksimum basınç değişimleri (Şekil 2(a) için).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 16: Perdeli tankta maksimum basınç değişimleri (Şekil 2(b) için)	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 17: Perdeli tankta maksimum basınç değişimleri (Şekil 2(c) için).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 18: Perdeli tankta maksimum basınç değişimleri (Şekil 2(d) için)	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 19: $\theta_0 = 4^\circ$ dönme açısındaki basınç değişimleri (Şekil 2(c) için).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 20: $\theta_0 = 8^\circ$ dönme açısındaki basınç değişimleri (Şekil 2(c) için).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 21: % 25 doluluk oranında su yüzeyinin değişimi (Şekil 2(c) için).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 22: % 50 doluluk oranında su yüzeyinin değişimi (Şekil 2(c) için).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 23: % 75 doluluk oranında su yüzeyinin değişimi (Şekil 2(c) için).....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Şekil 24: %25 doluluk oranı ve perdesiz durum için 4° ve 8° dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi	20
Şekil 25: %50 doluluk oranı ve perdesiz durum için 4° ve 8° dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.	21
Şekil 26: %75 doluluk oranı ve perdesiz durum için 4° ve 8° dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişim	21

Şekil 27: %25 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi	22
Şekil 28: %25 doluluk oranı, perdesiz ve düşey perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması	22
Şekil 29: %50 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi	23
Şekil 30: %50 doluluk oranı, perdesiz ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.....	24
Şekil 31: %75 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi	25
Şekil 32: %75 doluluk oranı, perdesiz ve düşey perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması	25
Şekil 33: %50 doluluk oranı ve gövde perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi	26
Şekil 34: %50 doluluk oranı, perdesiz ve gövde perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması	27
Şekil 35: %75 doluluk oranı ve gövde perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi	28
Şekil 36: %75 doluluk oranı, perdesiz ve gövde perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması	28
Şekil 37: %50 doluluk oranı, düşey ve gövde perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.....	29
Şekil 38: %50 doluluk oranı, perdesiz durum, düşey ve gövde perdeli durumlar için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.....	30
Şekil 39: %75 doluluk oranı, düşey ve gövde perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.....	31
Şekil 40: %75 doluluk oranı, perdesiz durum, düşey ve gövde perdeli durumlar için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.....	31
Şekil 41: %75 doluluk oranı ve perdesiz durum için 8^0 dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi	32
Şekil 42: %75 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 8^0 dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi	33
Şekil 43: %75 doluluk oranı ve gövde perdeli durum için 8^0 dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi	33
Şekil 44: %75 doluluk oranı, düşey ve gövde perdeli durumlar için 8^0 dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi.....	34
Şekil 45: Perdesiz durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.....	35
Şekil 46: Düşey perdeli durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.....	35
Şekil 47: Gövde perdeli durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.....	36
Şekil 48: Düşey ve gövde perdeli durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.....	36

DÖNME HAREKETİ VERİLEN RİJİT SİLİNDİRİK BİR TANKTA SIVI ÇALKANTISININ DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, değişik sıvı derinlikleri ve halka perdeler için, silindirik bir tank içindeki sıvı çalkantısından dolayı oluşan basınç ve serbest su yüzeyi değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, dönme etkisiyle silindirik tanklarda oluşan çalkantı problemini incelemek ve tankın içinde bulunan çeşitli noktalardaki dalga ve basınç değişimlerini üç boyutlu etkileri de dikkate alarak 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. Böylece, ele alınan perde düzenlemelerinin göreceli avantajları incelenmiş, tank doluluk oranı, dönme periyodu ve dönme açısı sistematik olarak değiştirilerek bunun hidrodinamik yükler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sıvı derinliği arttıkça sığ su etkisinin olduğu ve dalga enerjisinin hidrolik sıçrama ve dalga kırılması gibi nedenlerle azaldığı görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Deneysel Çalışma, Silindirik Tank, Sönümleyici Halka Perde, Çalkantı Yükleri, Basınç Dağılımı.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE LIQUID SLOSHING IN A CYLINDRICAL TANK UNDER THE ROLLING MOTION

SUMMARY

Pressure variations and free surface displacements of liquid from the mean static level in a rolling cylindrical tank with various fill levels and ring baffles under the excitation of roll motion have been carried out experimentally. The aims of this study are to investigate the sloshing problem and to measure wave and pressure distributions considering the 3-D effects. It is investigated that the relative effectiveness of various baffle arrangements and the hydrodynamic loads on a cylindrical tank by changing the filling ratio, the rolling period and the rolling angle systematically. It is seen that flow over a ring baffle exhibits a shallow water character which dissipates energy by forming a hydraulic jump and a breaking wave.

Keywords: Experimental Study, Cylindrical Tank, Ring Baffles, Sloshing Loads, Pressure Distribution.

1. GİRİŞ

Sıvı çalkantısı, deprem yükleri altındaki büyük sıvı depolama tankları, uçaklarda ve uzay araçlarındaki yakıt tankları, gemilerdeki sıvı tankları gibi çeşitli dinamik sistemlerde, insan hayatı, çevre kirliliği ve potansiyel ekonomik kayıplar açısından önemli bir mühendislik problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sistemlerin dinamik davranışları çoğunlukla serbest sıvı yüzeyinin dinamiğinden etkilenmektedir. Kısmi dolu tanklarda, eğer tank hareketinin periyodu tankın doğal periyoduna yaklaşırsa tankın içindeki sıvıda çalkantı hareketi beklenmelidir. Bu yüzden, çalkantı hareketinin başladığı zorlama periyodunun tespiti önemlidir.

Bilgisayar ve ölçme teknolojilerinin gelişmesine paralel olarak, tanklardaki sıvı çalkantı problemi konusundaki çalışmalar birçok araştırmacı tarafından yapılmaktadır. Bu çalışmalar, genellikle nümerik ve deneysel çalışmalar olarak, tank hareketinin frekansı ve genliği, sıvı derinliği, sıvının özellikleri ve tankın geometrisi dikkate alınarak sürdürülmektedir. Tank hareketine neden olan zorlama kuvvetinin şekline ve frekansına bağlı olarak, sıvının serbest yüzeyinin dinamik davranışı tankı etkilemeye başlar. Zorlama kuvveti, kısa zamanlı ani hareket şeklinde, sinüzoidal, periyodik ve rastgele olabilir. Tank hareketinin şekli ise bir eksen etrafında dönme, yatay hareket ya da bunların bileşiminden oluşabilir. Bu çerçevede, içinde kısmi dolu sıvı olan herhangi bir tanktaki çalkantı hareketi, oluşan yapısal yüklerin incelenmesi, simetrik ve simetrik olmayan su yüzeyi etkileri geniş olarak değişik kaynaklarda ele alınmıştır [1-3]. Bir tankın içindeki sıvının hareketi sonsuz sayıda doğal frekansa sahiptir; fakat tank hareketinin oluşturduğu en düşük birkaç mod bu doğal frekans için yeterlidir. Bununla birlikte doğrusal olmayan etkiler, doğal frekanstan biraz farklı frekanslarda ortaya çıkar ve hareketin genliğine bağlıdır. Dolayısıyla, tankın içinde oluşan sıvı çalkantısının doğrusal olmayan etkileri ve problemin karmaşıklığı araştırmacıları deneysel çalışmalara yöneltmiştir. Değişik frekans değerlerinde yapılan deneysel çalışmalar [4-8]'de 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 sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tank içinde yapılan perde

düzenlemelerinin çalkantı yüklerini azalttığı bilinmektedir. Bu yüzden, birçok araştırmacı değişik perde düzenlemeleri yaparak karmaşık olan çalkantı problemini hem deneysel hem de nümerik olarak incelemiştir. Bazı çalışmalarda, FEM ve BEM yöntemleri gibi nümerik yöntemler kullanılarak, perdeli ve perdesiz olmak üzere, silindirik ya da dikdörtgen tanklardaki doğrusal olmayan çalkantı yükleri incelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır [10-13].

Tank hareketlerine bağlı olarak meydana gelen serbest sıvı yüzeyi hareketleri, viskoz sınır tabakasından dolayı sönümlendirici kuvvetlerin etkisiyle değişmektedir. Genel olarak, sönümlendirme faktörü, sıvı yüksekliğine, sıvının kinematik özelliklerine ve tankın geometrisine bağlıdır. Bu çerçevede, tank doluluk seviyeleri, tank zorlama frekansları ve genlikleri değiştirilerek basınç değişimleri incelenmiş, geometrik ve fiziksel değişkenlerin serbest yüzey salınımları üzerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda, lineer olmayan bir problem olan çalkantı probleminin analitik ya da sayısal çözümleri her zaman kolay olmadığından bazı kabullerin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda, değişik yöntemlerle yapılan çözümlerin gerçek duruma göre sapma gösterdiği bilinmektedir. O halde, problemin çözümünde ve çalkantı etkilerinin araştırılmasında deneysel yaklaşımların da önemli bir yer tuttuğunu söyleyebiliriz. Bazı araştırmacılar, bu çerçevede deneysel çalışmaların önemini ve yukarıda belirtilen özellikleri vurgulamışlardır [4, 14] .

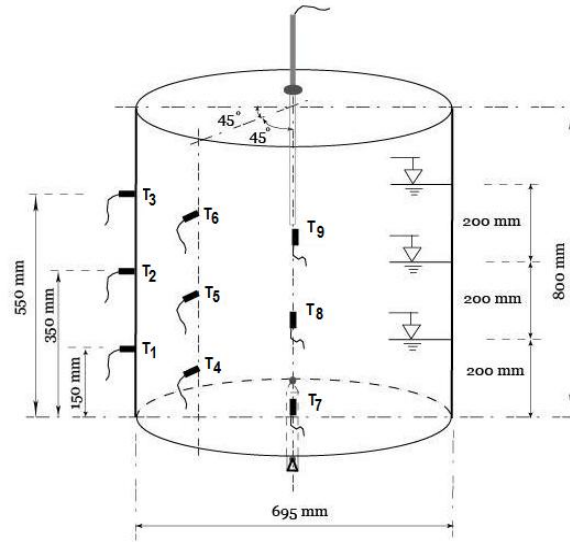
Younes v.d. [15], dikdörtgen tanklarda düşey perdelerden kaynaklanan hidrodinamik sönümü deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada tank içerisine konumlandırılan düşey perdeler değişik yüksekliklerde ve sayılarda ele alınmıştır. Ayrıca perde sayısı arttıkça sönüm oranının arttığı işaret edilmiştir. Eswaran v.d. [16] kısmi doldurulmuş kübik tanklarda kullanılan perdelerin çalkantı yüklerine etkisini nümerik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Silindirik tanklarda, çalkantı yüklerinin azaltılması için değişik perde düzenlemelerinin yapılmasının önemi birçok çalışmada vurgulanmıştır. Özellikle, serbest sıvı yüzeyine yakın konumlandırılan perdelerin çalkantı yüklerini daha etkili bir şekilde azalttığı görülmüştür. Ayrıca, lineer olmayan etkilerin doğal frekansa yakın frekanslarda ortaya çıktığı da anlaşılmıştır [17-18]. Silindirik tanklardaki çalkantı problemi ile ilgili bazı çalışmalar yine Biswal v.d. [19-21] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda, sıvının serbest yüzeyine yakın konumlandırılan perdelerin çalkantıyı etkili bir biçimde düşürdüğüne, çalkantının frekansının tankın doğal frekansına yakın olduğu durumlarda ise bu olgunun doğrusal olmadığına dikkat çekilmektedir. Gavriluk v.d. [22] doğal frekansların ve

modların hassas bir şekilde sayısal örneklerde önerilen metotlarla kolaylıkla belirlenebileceğini vurgulamışlardır. Zorlama frekansı, perde genişliği ve perdenin düşey konumu arasındaki etkileşimler değişik doluluk oranları için araştırılmıştır. Maleki ve Ziyaeifar [23,24], silindirik bir depolama tankında oluşan çalkantı yüklerini ve hidrodinamik sönümleme etkilerini incelemişlerdir. Bunun için, yatay halka perdeler ve düşey perde kullanılarak bir nümerik model geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yan v.d [25] çalkantı yüklerinden oluşan kuvvet ve momentleri deneysel olarak incelemişlerdir. Kuvvet ve momentlerin maksimum değerlerinin rezonans frekansına yakın frekanslarda meydana geldiği vurgulanmıştır. Silindirik tanklar için yapılan bazı çalışmalarda da benzer bulgular vurgulanmıştır [26-27]. Ayrıca, Xue ve Lin [28] ele aldığı üç boyutlu nümerik modelde, doğal frekansa yakın frekanslarda akışkan çalkantı problemini incelemişlerdir. Halka perdelerin kullanımının şiddetli sıvı çalkantısını azaltmada etkili bir yol olduğunu vurgulamışlardır.

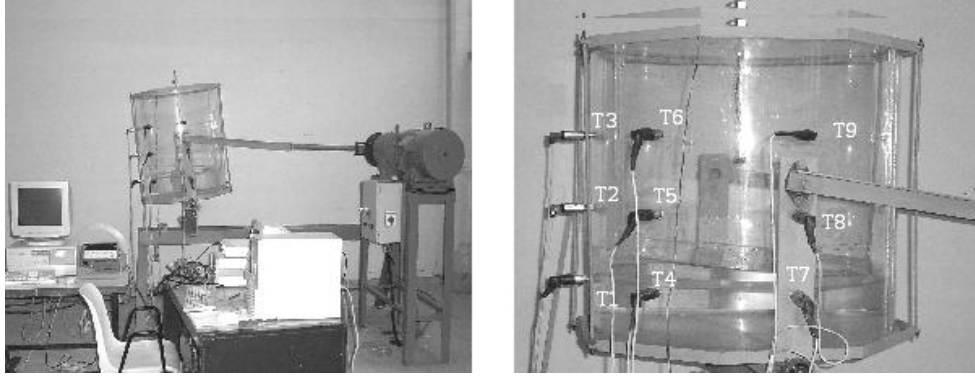
Bu çalışmada, tank hareketlerinden kaynaklanan çalkantı yüklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için bir deney düzeneği geliştirilmiş; değişik sıvı derinlikleri ve perde düzenlemeleri dikkate alınarak, oluşan dalga hareketleri ve basınç değişimleri incelenmiştir. Silindirik tanka, tankın doğal frekansı dikkate alınarak oluşturulan çeşitli frekans değerlerinde sadece dönme hareketi uygulanmıştır. Bu çalışmada, Akyildiz v.d. [4]'den farklı olarak ele alınan frekans değerleri, tankın doğal frekansının üstünde seçilmiştir. Böylece, dönme etkisiyle silindirik tanklarda oluşan çalkantı problemi bu frekanslar için incelenmiş ve tankın içinde bulunan çeşitli noktadaki dalga ve basınç değişimleri üç boyutlu etkiler de dikkate alınarak ölçülmüştür. Ayrıca, ele alınan perde düzenlemelerinin göreceli avantajları incelenmiş ve nümerik çalışmalar için güvenilir deneysel veriler elde edilmiştir. Yapılan deneylerde, tank doluluk oranı, dönme periyodu ve dönme açısı sistematik olarak değiştirilerek bunun hidrodinamik yükler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

İçinde sıvı bulunan keyfi şekilli bir tankta, herhangi bir dış kuvvet etkisi altında hareket ettiğinde, sıvı derinliğine ve dış kuvvetin frekansına bağlı olarak değişik serbest yüzey şekilleri oluşur. Sıvı çalkantısı, problemin lineer olmayan özelliğinden dolayı tankın tam doğal frekansında meydana gelmez; fakat bu değere çok yakın bir frekansta oluşabilir [1,4,7]. Sıvı çalkantısının oluştuğu doğal frekansa yakın frekanslar, değişik perde düzenlemelerinde, hareket genliklerinde, sıvı yoğunluklarında ve viskozitelerinde farklı bir değer alabilir. Ayrıca, çalkantının şiddeti ve oluşacak dinamik yükler tankın geometrisine, sıvı derinliğine ve tankın altı serbestlik derecesinde yaptığı hareketlere bağlıdır. Dolayısıyla, bu frekansların tespit edilmesi problemin doğru anlaşılması açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, deneylerde kullanılan silindirik tanka, merkezinden geçen enine eksen etrafında olmak üzere sadece dönme hareketi verilmiş ve çok sayıda fiziksel model araştırması yapılmıştır. Deneylerde, serbest yüzeyin değişimi ve toplam basınç değerleri (statik ve dinamik) belirlenen noktalarda, değişik zorlama frekansı değerleri için ölçülmüştür. Bu amaçla, 1,0 cm kalınlığında pleksiglas silindirik bir tank inşa edilmiştir. Tankın yüksekliği, $H=800$ mm ve çapı ise $D=695$ mm'dir. Dokuz adet basınçölçer çeşitli noktalardaki basınç değişimlerini ölçmek amacıyla tanka yerleştirilmiştir. Basınçölçerlerin yerleri Şekil 1'de ve perde düzenlemeleri ise Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Tank değişebilir iç yapı elemanları ile tasarlanmıştır. Bu iç yapı elemanları, genişliği 10 cm ve 5 cm, kalınlığı ise 1 cm olan silindirik gövde halka perdeleridir (Şekil 2). Taban perdesi için 7 cm yüksekliğinde 1 cm kalınlığında ve iç çap boyunda olan bir pleksiglas parça kullanılmış, gövde perdesi olarak da 5 cm genişliğinde ve yine 1 cm kalınlığında bir halka kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 1a. Tank geometrisi ve basınçölçerlerin konumu.

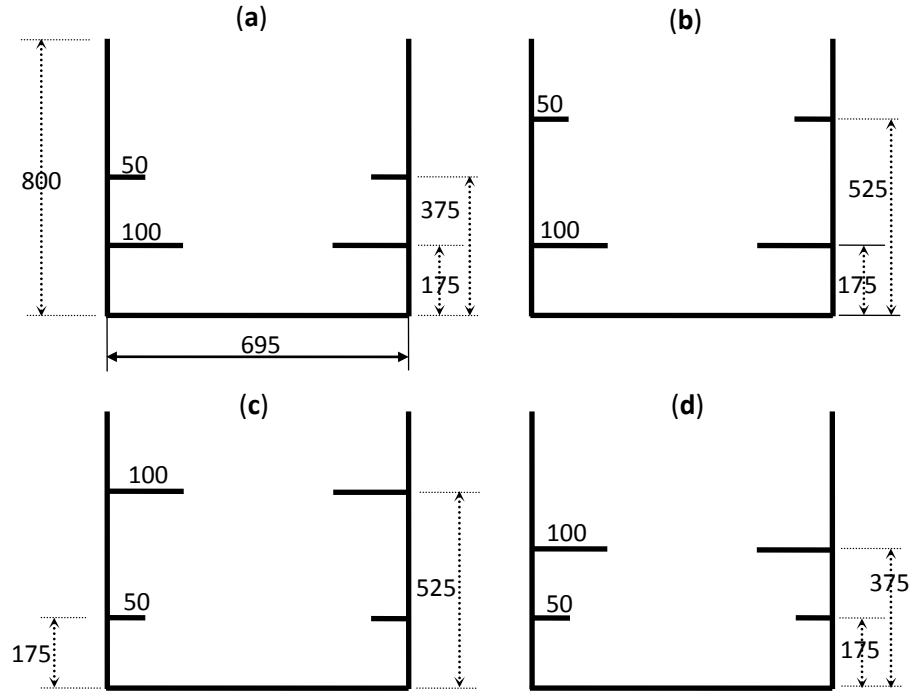


Şekil 1b. Deney platformu.

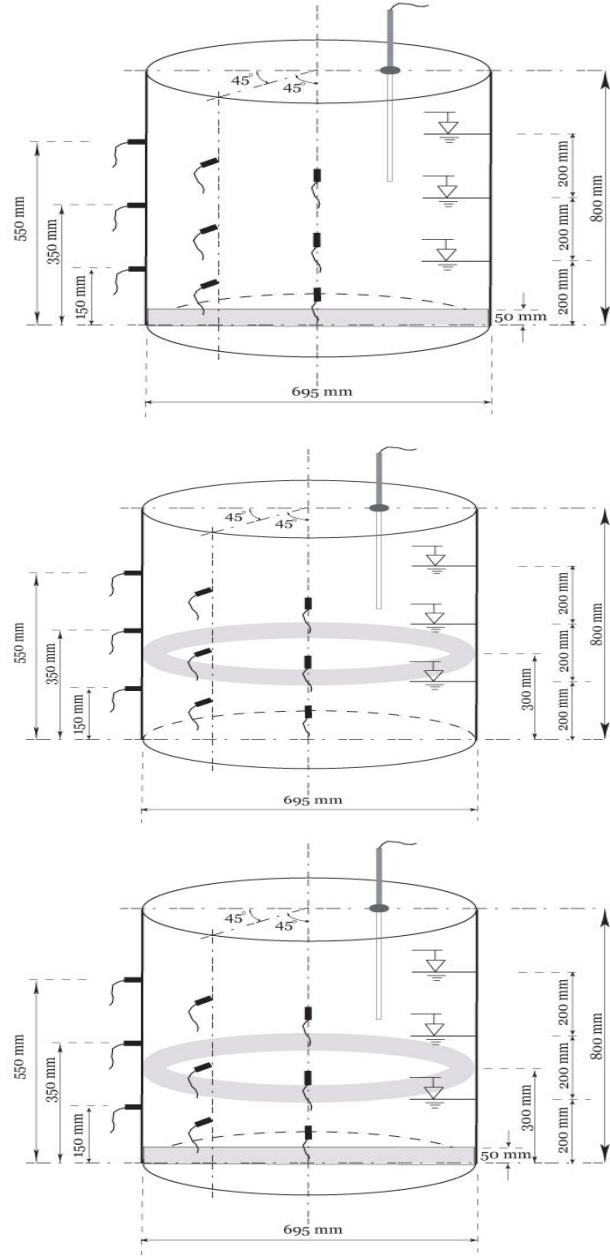
Deneilerin yapıldığı düzenek çalkantı deneyleri için özel tasarlanmıştır [4]. Deney düzeneğinde, taban iskeletine bağlı olan tank platformunun dönme hareketleri bir adet 15 kW'lık DC motor tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca, dalga probu için bir adet analog-dijital dönüştürücü karta sahip dalga monitörü ve basınç ölçerler için bir adet data logger (Agilent-Benchmark 34970 A) bulunmaktadır. Veriler yaklaşık olarak 2,5 Hz'lik bir frekansla alınmıştır.

Basınç değişimleri, Şekil 1a ve Şekil 1b'de gösterilen noktalarda "piezoresistive basınçölçerler" tarafından kaydedilmiştir. Bu tip basınçölçerler, 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 1). Ölçülen basınç değişimleri ve dalga yükseklikleri eş zamanlı olarak kayıt edilmiştir. Deneylerde, 15 farklı tank düzenlemesi için 135 test gerçekleştirilmiştir. Her bir deney dizisi için, birkaç adet

frekans değeri ile çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca, deney düzeneğinin güvenilirliğini ortaya koymak amacıyla rastgele seçilen testler tekrarlanmıştır. Deneylerde her bir test için, tank her zaman dik bir pozisyonda olmak üzere önceden belirlenmiş frekans ve dönme açısı ile hareketine başlatılmıştır. Dönme açısı, tankın simetri eksenini etrafında yaptığı hareketin yatayla oluşturduğu açıdır. Kayıt iki dakika boyunca alınmış ve 'data logger' ile veriler kaydedilmiştir.



Şekil 2. Perde düzenlemeleri (birimler mm'dir).



Şekil 3. Perde düzenlemeleri. a) Taban perdesi; b) Gövde perdesi c) Taban ve Gövde perdesi.

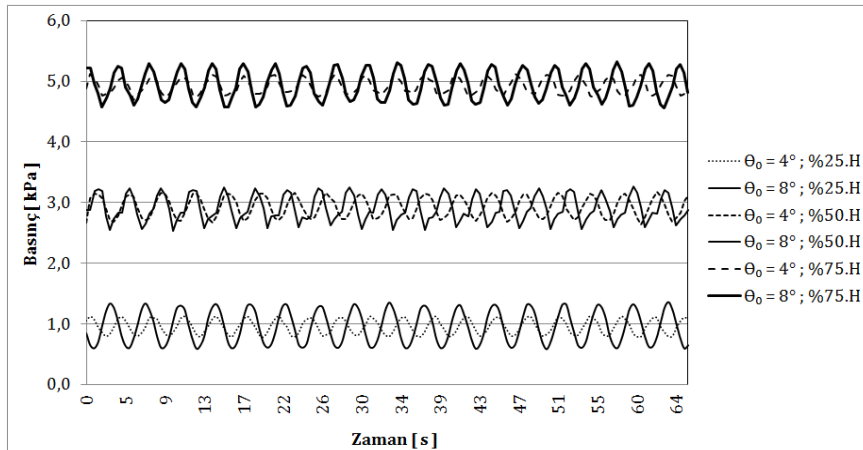
3. DENEYLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Silindirik tankın dönme hareketinde, doluluk oranı ve zorlama frekansına bağlı olarak tankın içinde değişik dalgalar oluşur. Sıg suda, rezonans frekansından çok daha düşük dönme frekanslarında daha çok duran dalgalar oluşurken, frekans ve derinlik arttıkça, duran dalgalar yerini önce, dalga boyu kısa ilerleyen dalgalara sonra simetrik olmayan çalkantı dalgalarına bırakmaktadır. Çalkantı durumunda iki tip dinamik basınç oluşur: Ani değişen ve yavaş bir şekilde değişen basınçlar. Ani değişen basınçlar, sıvı ve katı yüzey arasında çarpmadan dolayı oluşan ve çok hızlı gerçekleşen basınç değişimleridir. Ani değişen basınçlar daha noktasaldır ve oldukça yüksek basınç değerlerine ulaşabilirler. Bunlar genellikle hidrolik sıçramalar ve ilerleyen dalgalar ile iç içedir. Yavaş değişen basınçlar ise sıvı hareketinden dolayı oluşan sıradan dinamik basınçlardır. Bunlar, duran ya da düşük genlikli ilerleyen dalgalardan oluşan basınçlardır. Ani çarpma sonucunda oluşan basınçlar serbest yüzeye yakın bir yerde ya da tank yüzeyinin ani değişen birleşim yerlerinde oluşabilir. Zorlama hareketi harmonik olsa bile bu basınçların değişimi ne harmonik ne de periyodiktir. Ayrıca, sönümleme etkisinden dolayı zorlamanın genliğine daha az duyarlıdır. Çalkantının etkisi ve bunun sonucunda oluşan dinamik basınç yükleri tankın geometrisine, doluluk oranına, tank hareketinin genliğine ve şekline bağlıdır. Dönme hareketinde, sıvı derinliği arttıkça hidrolik sıçramalar azalır. Hidrolik sıçramaların oluştuğu frekans aralığı da tank hareketinin tipine ve dönme ekseninin yerine göre değişecektir [1,2,4].

Deneylerde, verilen deney düzeneği için zorlama frekansları 0.834 - 2,0 r/s aralığında ele alınmıştır. Seçilen tüm frekanslarda deneyler yapılmış, serbest yüzey değişimleri ve basınç değerleri kaydedilmiştir. Bu makalede, tüm frekanslarda ve basınç noktalarında, ilgili dalga ve basınç değerlerini vermek mümkün olmadığından, Akyildiz v.d. [4]' de sunulmuş deney sonuçlarından farklı olarak, tankın doğal frekansının üstünde seçilmiş bir frekans değeri (2,0 r/s) ve T4 basınç noktası için sonuçlar sunulmuştur. Temel amaç, çalkantının oluşmasının beklendiği doğal frekansa yakın frekanslardan farklı olarak doğal frekanstan uzaklaştıkça sıvı hareketinin davranışını incelemektir.

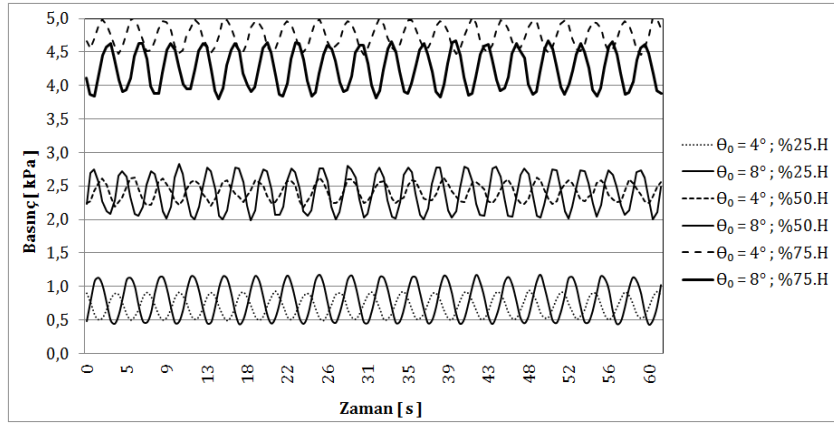
3.1. Şekil 2'deki Perde Düzenlemesinde T4 Basınç Noktasındaki Basınç Değişimleri

Tank yüksekliğinin % 25, %50 ve % 75'i oranındaki sıvı derinlikleri için ve perdesiz bir tankta; dönme açısı arttıkça (4^0 ve 8^0) basınç değerlerinin Şekil 4'te görüldüğü gibi arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, tankın geometrisine bağlı olarak oluşan üç boyutlu etkiler sonucunda akışkan hareketi şiddetlenmektedir. Dolayısıyla, sıvı derinliği azaldıkça, serbest yüzeye yakın olan basınç noktalarından elde edilen değerler de önemli ölçülerde salınım göstermektedirler. Sonuç olarak, derinlik arttıkça, serbest yüzeyin düşey hareket hızının ve oluşan akışkan enerji oranının azalması sonucunda ortaya çıkan sönümleme etkileri çalkantı hareketinin azalmasına sebep olmaktadır. Buna ek olarak, tankın dönme açısının ve dış kuvvetin frekansının, çalkantı hareketinin lineer olmayan davranışını doğrudan etkilediği anlaşılmıştır.

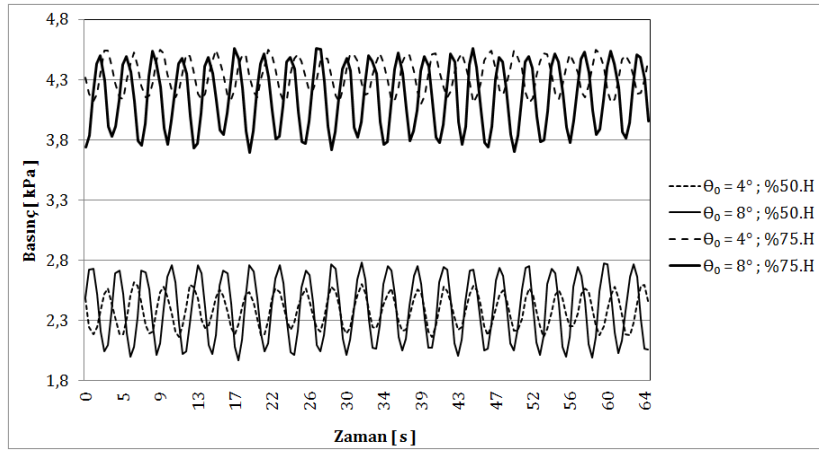


Şekil 4. Perdesiz tanktaki basınç değişimleri.

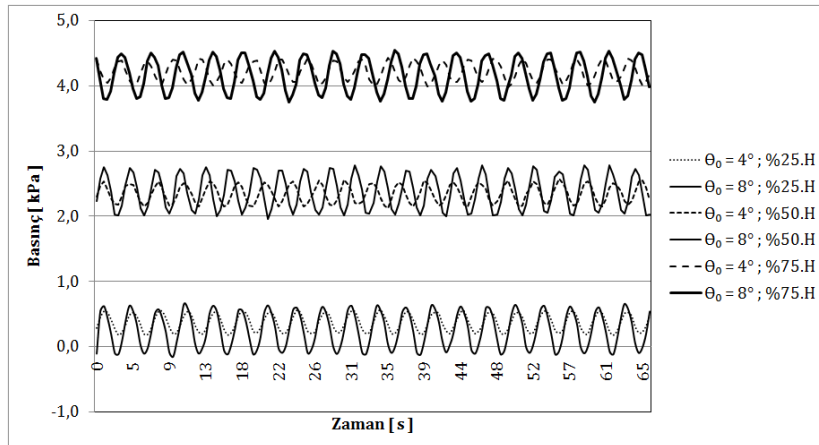
Kullanılan perde düzenlemelerinde, özellikle genişliği daha az olan perdenin etkisi, düşük sıvı derinliklerinde, devrilme momentini azaltmak suretiyle artmaktadır. Bu durum, derinlik arttıkça, basınç değerlerinin dalgalanma oranının ve viskoz sönüm etkilerinin azalmasına neden olmaktadır. Ele alınan perde düzenlemelerinin, perdesiz tank ile karşılaştırıldığında, maksimum basınç değerlerini azalttığı görülmüştür. Ayrıca, 4^0 ve 8^0 dönme açıları dikkate alındığında, maksimum basınç miktarlarının derinlik arttıkça yükseldiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 5, 6, 7 ve 8'de gösterilmiştir.



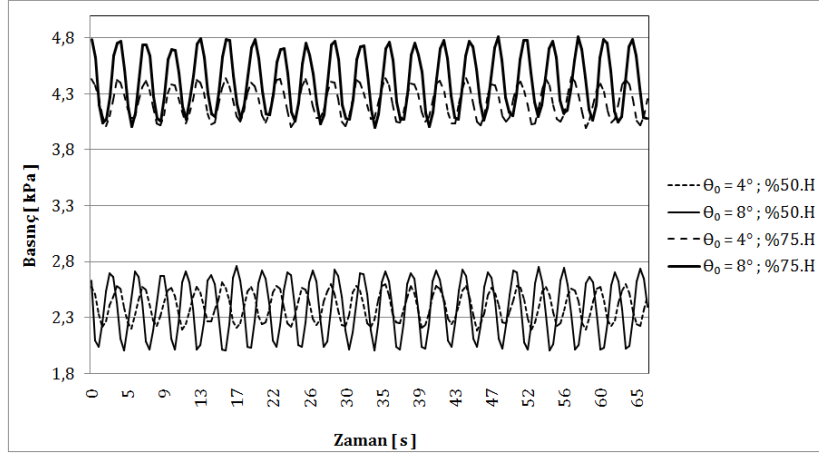
Şekil 5. Perdeli tank düzenlemesinde basınç değişimleri (Şekil 2(a) için).



Şekil 6. Perdeli tank düzenlemesinde basınç değişimleri (Şekil 2(b) için).



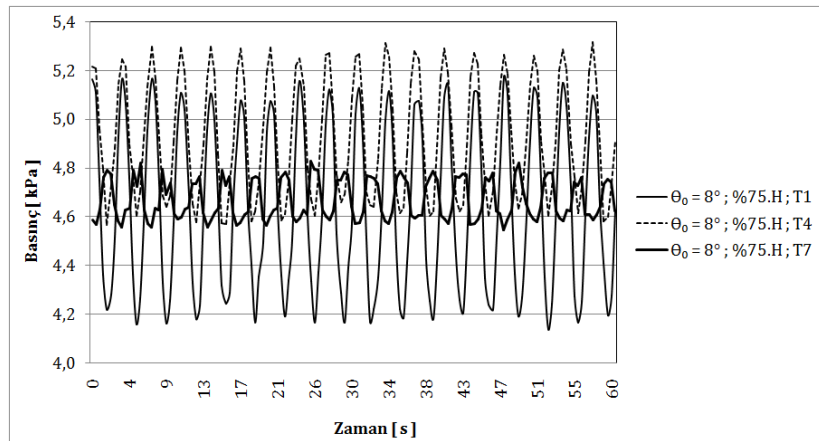
Şekil 7. Perdeli tank düzenlemesinde basınç değişimleri (Şekil 2(c) için).



Şekil 8. Perdeli tank düzenlemesinde basınç değişimleri (Şekil 2(d) için).

Tank yüksekliğinin % 25, %50 ve % 75'i oranındaki sıvı derinliklerinde perdesiz tank ile karşılaştırıldığında maksimum basınç değerlerinin azaldığı görülmüştür. Deneylerde kullanılan halka perdeler, tanka verilen dönme hareketi altında, serbest yüzeyde oluşan çalkantı dalgalarının genel karakteristiklerini değiştirerek ilerleyen dalga formuna dönüştürdüğü sonucuna varılmıştır. Bu yüzden, serbest yüzeyde oluşan çalkantı dalgalarının enerjisi halka perdelerin etkisiyle dağılmakta ve azalmaktadır. Bu durum çalkantı yüklerinin azalmasına neden olmaktadır.

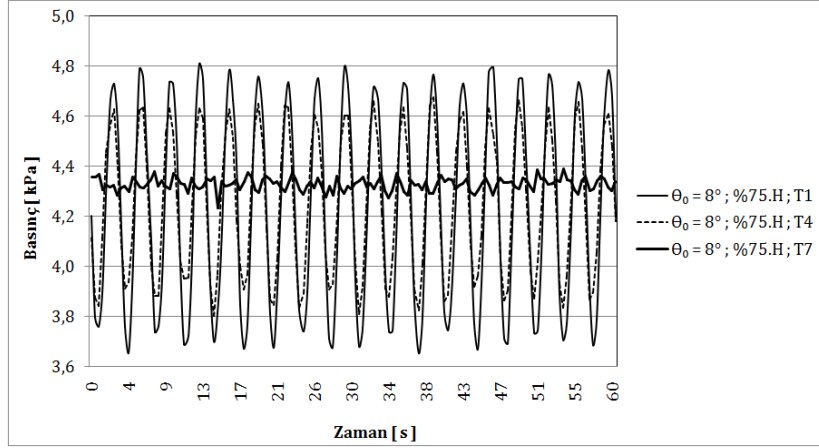
% 75 doluluk oranında, perdesiz tankta; 8^0 dönme açısında ve 2,0 r/s zorlama frekansı için T4 basınç noktasındaki maksimum basınç değerleri T1 ve T7 basınç noktalarındaki basınç değerlerinden fazla olmuştur (Şekil 9).



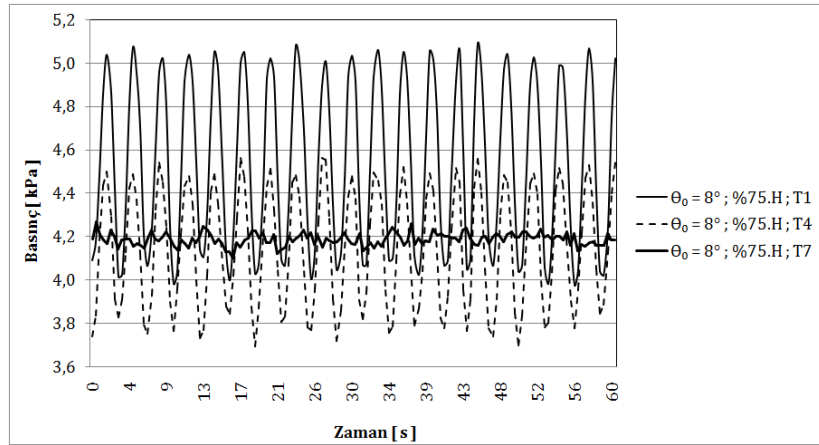
Şekil 9. Perdesiz tankta T₁, T₄, T₇ noktalarındaki basınç değişimleri.

Dönme açısı ve sıvı derinliği arttıkça, perdesiz tank ile karşılaştırıldığında, maksimum basınç değerlerinin arttığı görülmüştür. Şekil 10'da görüldüğü gibi

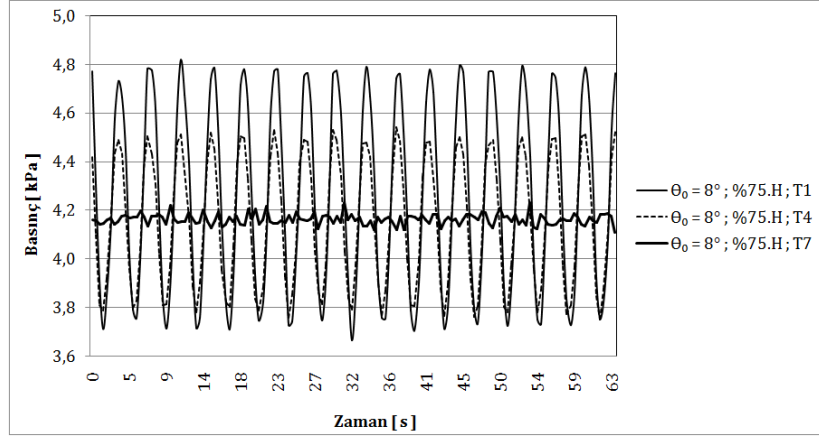
basınç değerlerinin salınımı da azalmaktadır (ayrıca bakınız Şekil 11, 12 ve 13). 8° dönme açısında, maksimum basınç değerlerinin daha büyük olduğu fakat perdesiz tanka göre ise daha düşük olduğu görülmüştür.



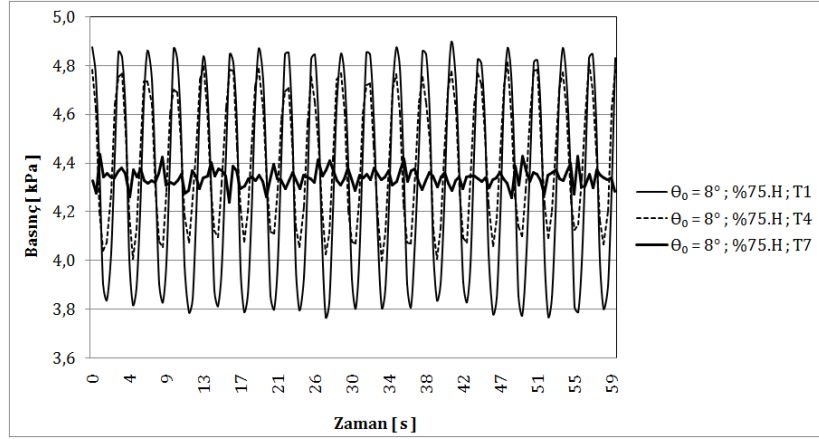
Şekil 10. Perdeli tankta T_1 , T_4 , T_7 noktalarındaki basınç değişimleri (Şekil 2(a) için).



Şekil 11. Perdeli tankta T_1 , T_4 , T_7 noktalarındaki basınç değişimleri (Şekil 2(b) için).



Şekil 12. Perdeli tankta T₁, T₄, T₇ noktalarındaki basınç değişimleri (Şekil 2(c) için).

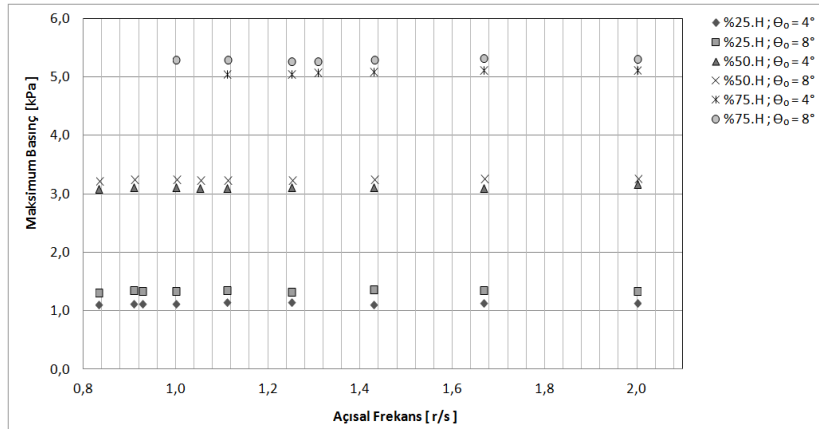


Şekil 13. Perdeli tankta T₁, T₄, T₇ noktalarındaki basınç değişimleri (Şekil 2(d) için).

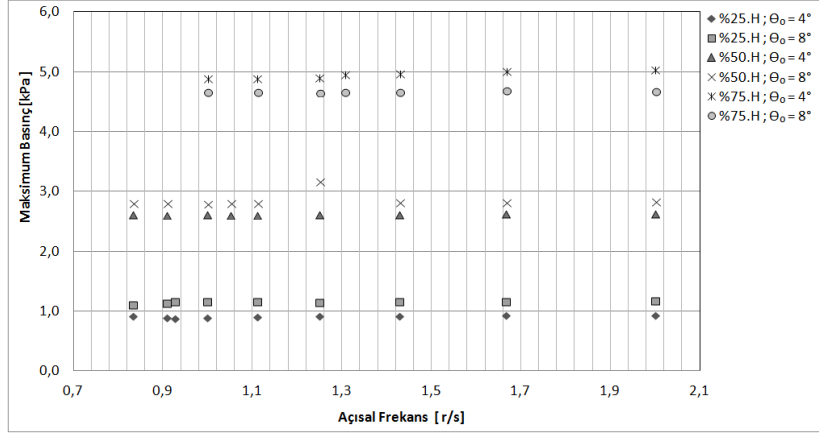
3.1.1. Şekil 2'deki perde düzenlemesinde T4 basınç noktasındaki maksimum basınçlar

Deneylerde, basınç dağılımını elde etmek için, tankın değişik yerlerine konumlandırılmış dokuz adet basınçölçer kullanılmıştır (Şekil 1). Her bir deney seti için iki dakika süreli basınç değeri zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Bu makalede, 4° ve 8° dönme açıları ve 2,0 r/s açısal frekans için sunulan sonuçlar, tamamı verilemeyeceğinden sadece T4 basınç noktası için düzenlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, tanka dönme hareketi verilerek ve 0.834-2,0 r/s açısal frekans değerleri için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen maksimum basınç değerleri aşağıda verilmiştir:

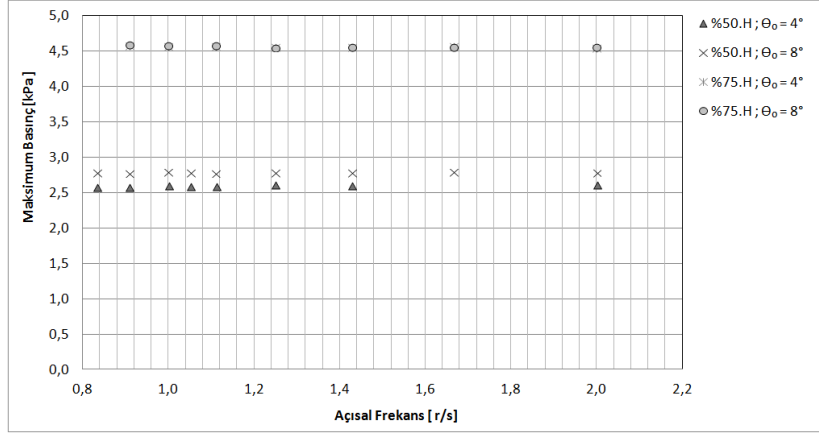
1. Perdesiz tank için maksimum basınçların değişimi Şekil 14’de verilmiştir. Değişim aralığı, $\theta_0 = 4^\circ$ ’de, 1.126-5.127 kPa ve $\theta_0 = 8^\circ$ ’de ise 1.359-5.316 kPa olmuştur.
2. Şekil 2(a)’da gösterilen halka perdeli tank için maksimum basınçların değişimi Şekil 15’de verilmiştir. Değişim aralığı, $\theta_0 = 4^\circ$ ’de, 0.939-5.025 kPa ve $\theta_0 = 8^\circ$ ’de ise 1.178–4.675 kPa olmuştur.
3. Şekil 2(b)’de gösterilen halka perdeli tank için maksimum basınçların değişimi Şekil 16’de verilmiştir. Değişim aralığı, $\theta_0 = 4^\circ$ ’de, 0.750-4.548 kPa ve $\theta_0 = 8^\circ$ ’de ise 0.755–4.562 kPa olmuştur.
4. Şekil 2(c)’de gösterilen halka perdeli tank için maksimum basınçların değişimi Şekil 17’de verilmiştir. Değişim aralığı, $\theta_0 = 4^\circ$ ’de, 0.566-4.427 kPa ve $\theta_0 = 8^\circ$ ’de ise 0.647–4.543 kPa olmuştur.
5. Şekil 2(d)’de gösterilen halka perdeli tank için maksimum basınçların değişimi Şekil 18’de verilmiştir. Değişim aralığı, $\theta_0 = 4^\circ$ ’de, 0.450-4.449 kPa ve $\theta_0 = 8^\circ$ ’de ise 0.486–4.814 kPa olmuştur.



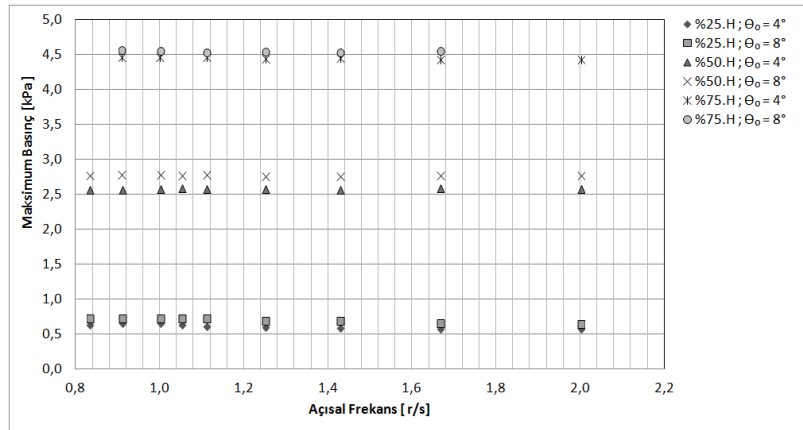
Şekil 14. Perdesiz tankta maksimum basınç değişimleri.



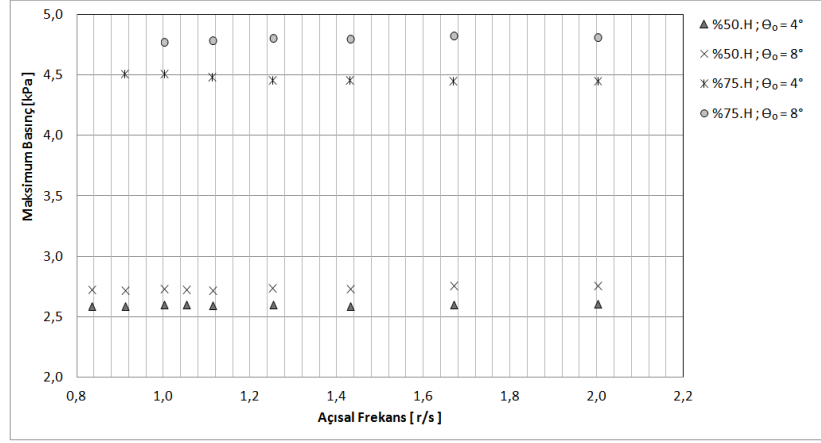
Şekil 15. Perdeli tankta maksimum basınç değişimleri (Şekil 2(a) için)



Şekil 16. Perdeli tankta maksimum basınç değişimleri (Şekil 2(b) için)

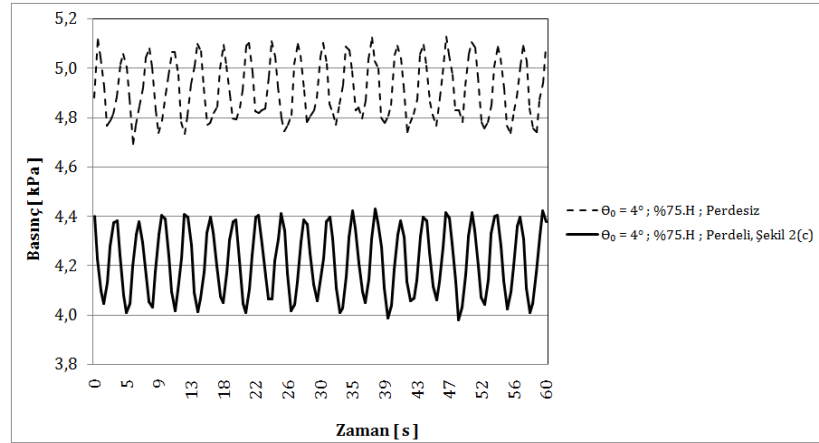


Şekil 17. Perdeli tankta maksimum basınç değişimleri (Şekil 2(c) için)

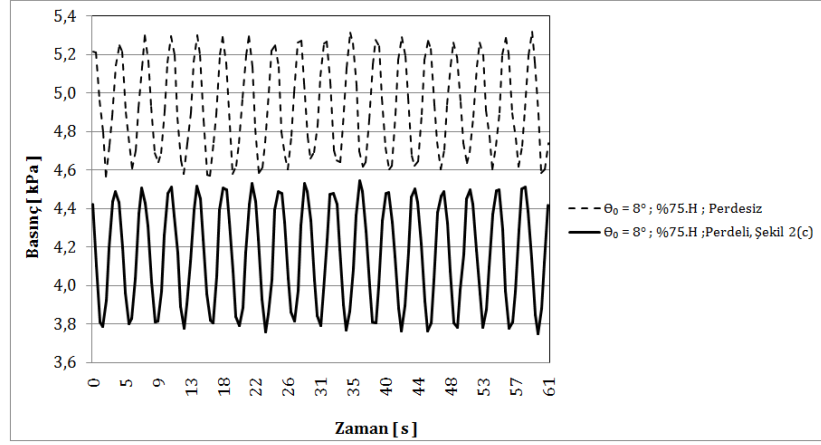


Şekil 18. Perdeli tankta maksimum basınç değişimleri (Şekil 2(d) için)

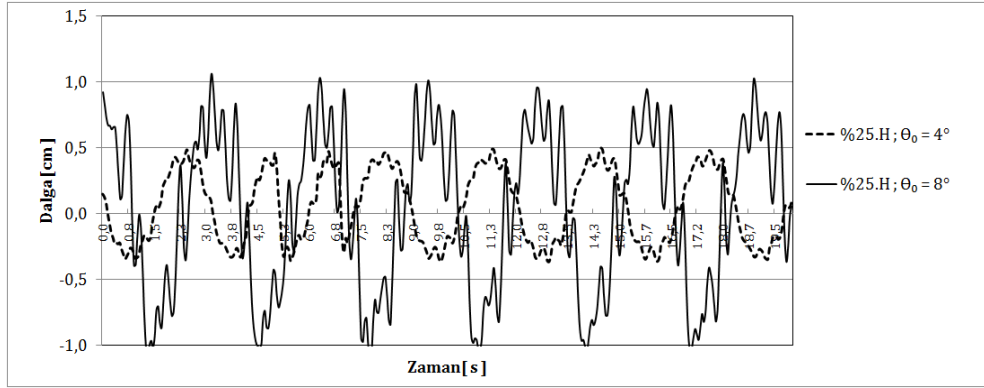
Sonuç olarak, % 25, % 50 ve % 75 doluluk oranları için ele alınan perde düzenlemelerinde, T4 basınç noktasındaki basınç değerlerinin azaltılması için en etkili durum Şekil 2(c)'de verilen düzenleme olmuştur. Dolayısıyla, örnek olarak sadece % 75 doluluk oranında bu perde düzenlemesi için basınç değerleri Şekil 19 ve Şekil 20'de, % 25, % 50 ve % 75 doluluk oranlarındaki serbest yüzey değişimleri ise Şekil 21, Şekil 22 ve Şekil 23'te sunulmuştur.



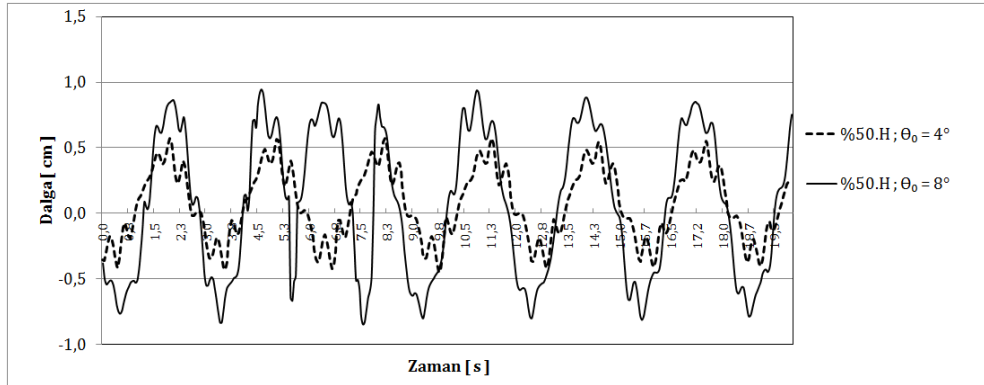
Şekil 19. $\theta_0 = 4^\circ$ dönme açısındaki basınç değişimleri (Şekil 2(c) için).



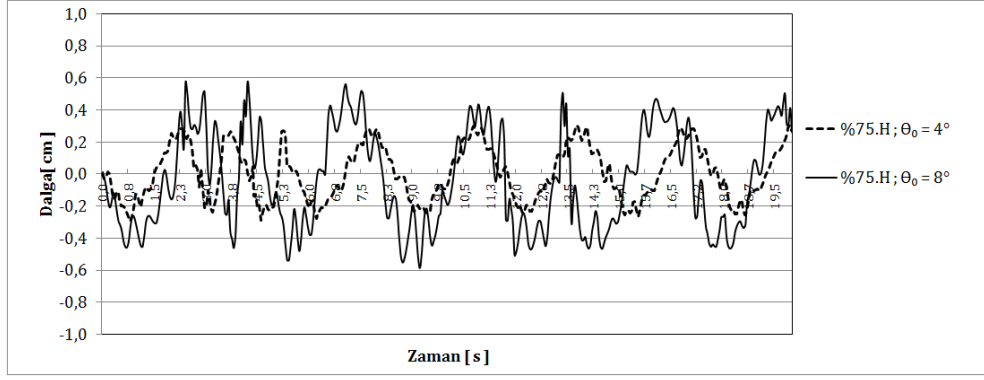
Şekil 20. $\theta_0 = 8^\circ$ dönme açısındaki basınç değişimleri (Şekil 2(c) için).



Şekil 21. % 25 doluluk oranında su yüzeyinin değişimi (Şekil 2(c) için).



Şekil 22. % 50 doluluk oranında su yüzeyinin değişimi (Şekil 2(c) için).



Şekil 23. % 75 doluluk oranında su yüzeyinin değişimi (Şekil 2(c) için).

3.2. Şekil 3'deki Perde Düzenlemesinde T4 Basınç Noktasındaki Basınç Değişimleri

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 [13].

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

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

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 basınçölçerlerin 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 ($h=H^{\circ}\%$)	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.

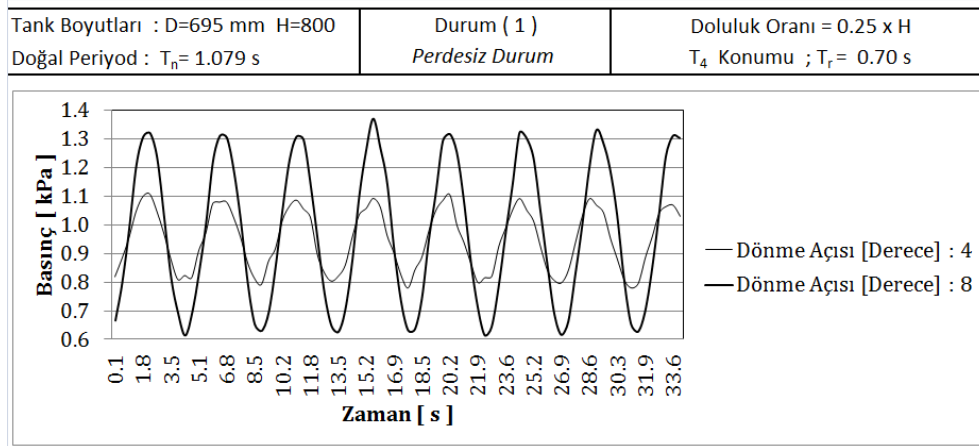
Her bir test sırasında, tank her zaman dik bir pozisyonda önceden belirlenmiş periyod ve dönme açısı ile hareketine başlatılmıştır. Deneyler iki dakika boyunca yapılmış ve ‘data logger’ ile veriler kaydedilmiştir.

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 4^0 ’den 8^0 ’ye çıkartıldığında basınçta artış gözlenmiştir ve zorlama periyodunun artışı da yine basınç artışı olarak tepki vermiştir. Serbest yüzeye yakın basınçölçerlerden 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 alınırsa maksimum basınç değerleri T4 konumunda elde edilmiştir (Şekil 1).

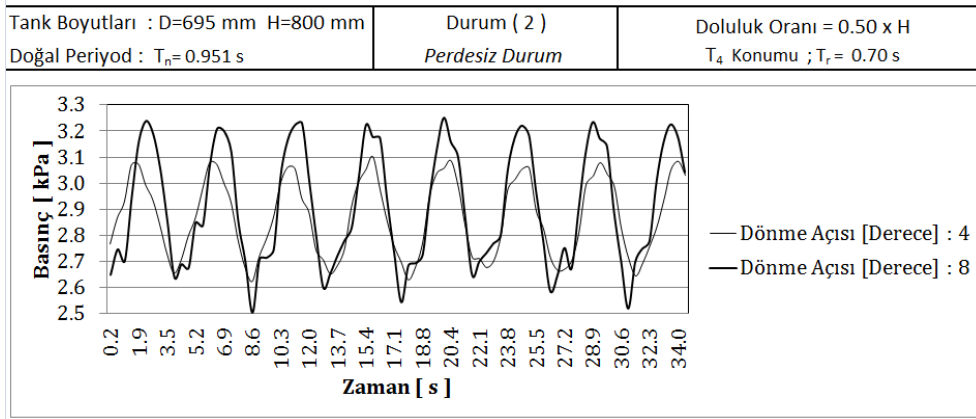
Zorlama genliği arttıkça, sıvı hareketi, hidrolik sıçrama ve dalga kırılması gibi sıvı hareketlerine bağlı olarak şiddetlenir. Sıvı hareketinin şiddetlenmesi üç boyutlu etkilere ve tankın geometrisine bağlıdır (Şekil 24).



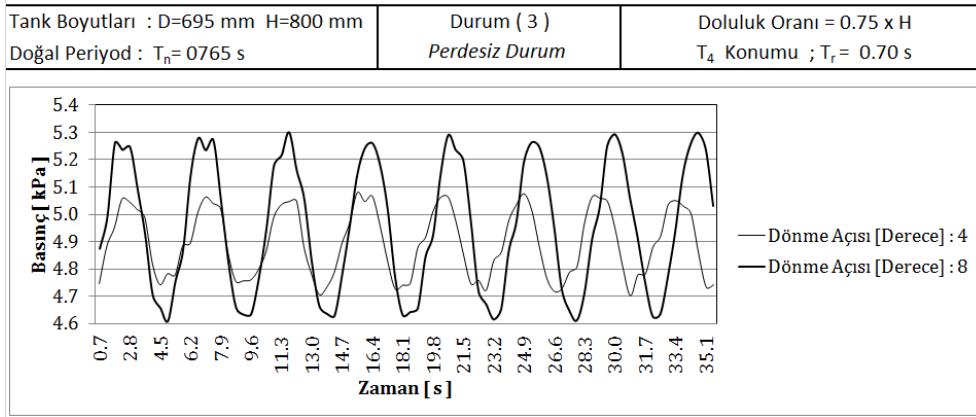
Şekil 24. %25 doluluk oranı ve perdesiz durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

Durum 2 için, %50 doluluk oranına sahip perdesiz bir tankta, 4^0 ve 8^0 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 25).

Durum 3 için, %75 doluluk oranına sahip perdesiz bir tankta, 4^0 ve 8^0 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 26’da verilmiştir.



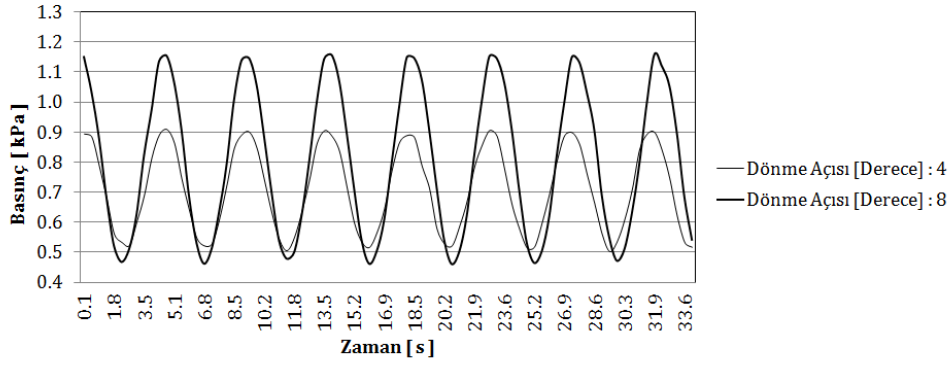
Şekil 25. %50 doluluk oranı ve perdesiz durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.



Şekil 26. %75 doluluk oranı ve perdesiz durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

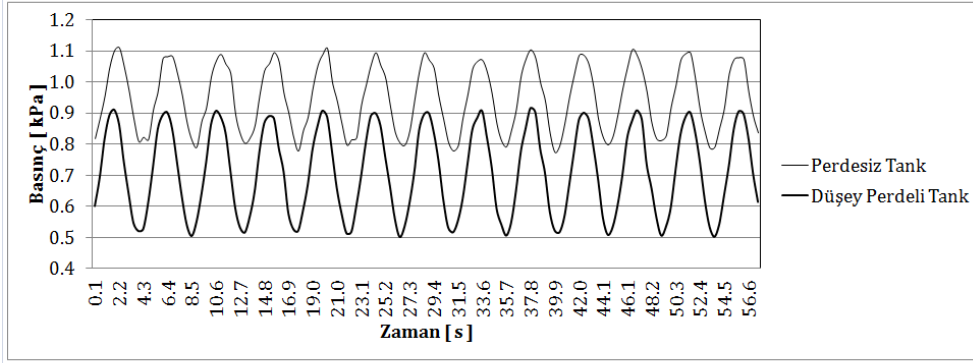
Durum 4 için, %25 doluluk oranına sahip tabanda düşey bir perde olan tankta; maksimum basınç değerleri hala T_4 konumundan elde edilmektedir (Şekil 1). Düşey perdenin etkisi en çok sıg su durumunda göze çarpmaktadır ve özellikle devrilme moment etkisinin önemli oranda azaldığı görülmüştür. Tankın içine yerleştirilen düşey perde ve buradaki akımın bir 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. T_4 konumunda, basınç değerleri perdesiz durum ile karşılaştırılarak sırası ile Şekil 27 ve Şekil 28’de verilmiştir.

Tank Boyutları : D=695 mm H=800 mm Doğal Periyod : $T_n = 1.079$ s	Durum (4) Düşey Perdeli Tank	Doluluk Oranı = 0.25 x H T_4 Konumu ; $T_r = 0.70$ s
---	-----------------------------------	---

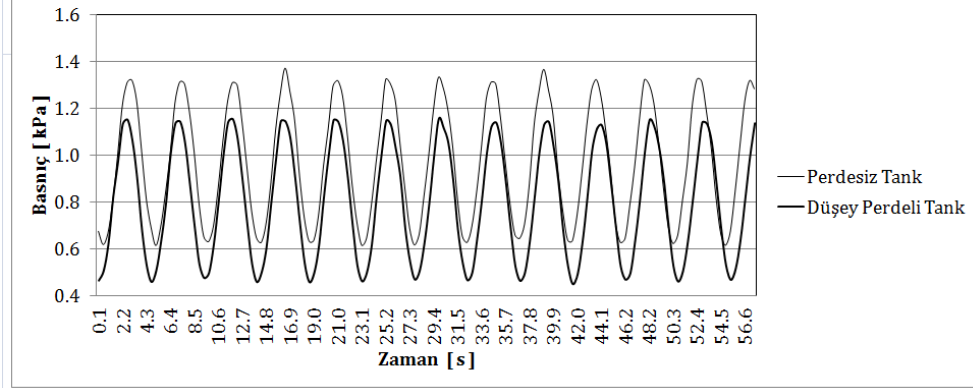


Şekil 27. %25 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

Tank Boyutları : D=695 mm H=800 mm Doğal Periyod : $T_n = 1.079$ s	Dönme Açısı : 4^0	Doluluk Oranı = 0.25 x H T_4 Konumu ; $T_r = 0.70$ s
---	---------------------	---



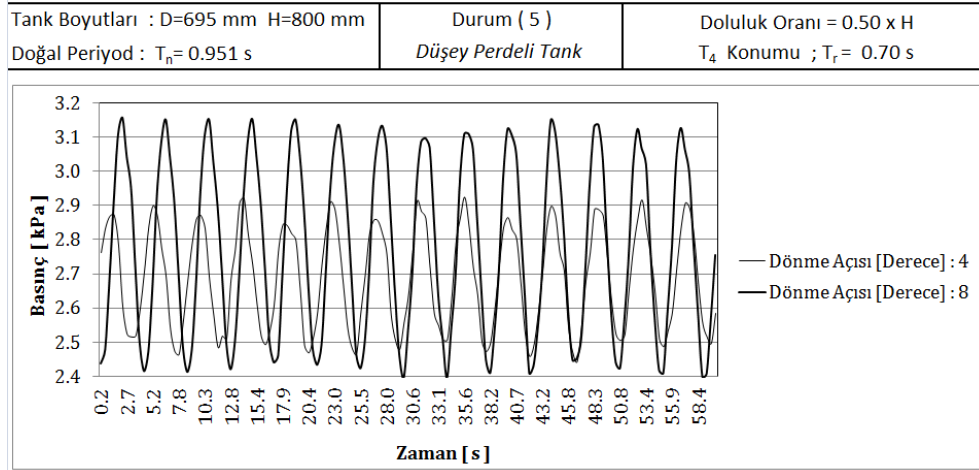
Tank Boyutları : D=695 mm H=800 mm Doğal Periyod : $T_n = 1.079$ s	Dönme Açısı : 8^0	Doluluk Oranı = 0.25 x H T_4 Konumu ; $T_r = 0.70$ s
---	---------------------	---



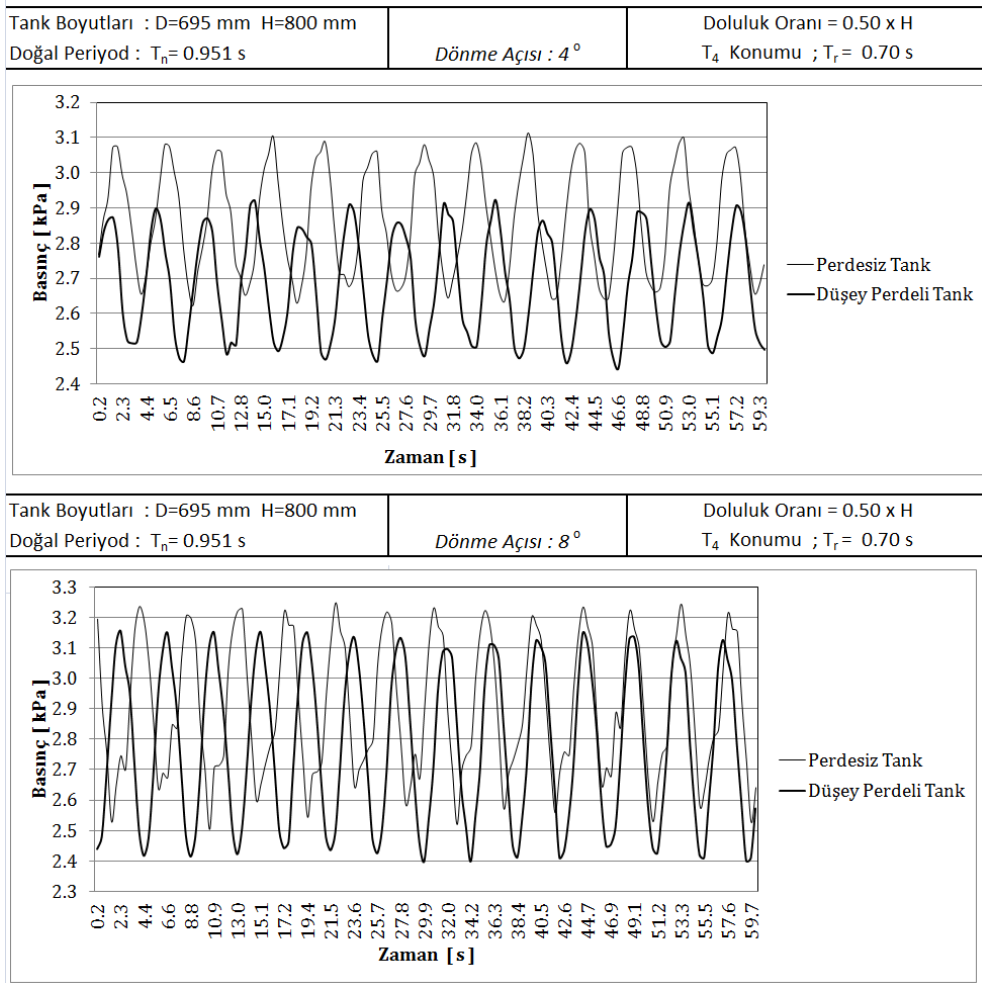
Şekil 28. %25 doluluk oranı, perdesiz ve düşey perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.

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 periyod aralığı göz önüne alınarak perdesiz durumla karşılaştırıldığında T2 konumundan daha büyük basınç değerleri vermektedir (Şekil 29 ve 30).



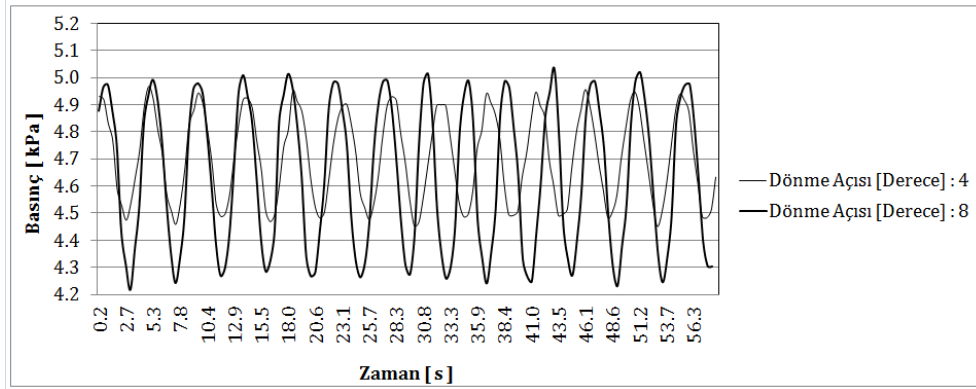
Şekil 29. %50 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.



Şekil 30. %50 doluluk oranı, perdesiz ve düşey perdeli durum için 4° ve 8° dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

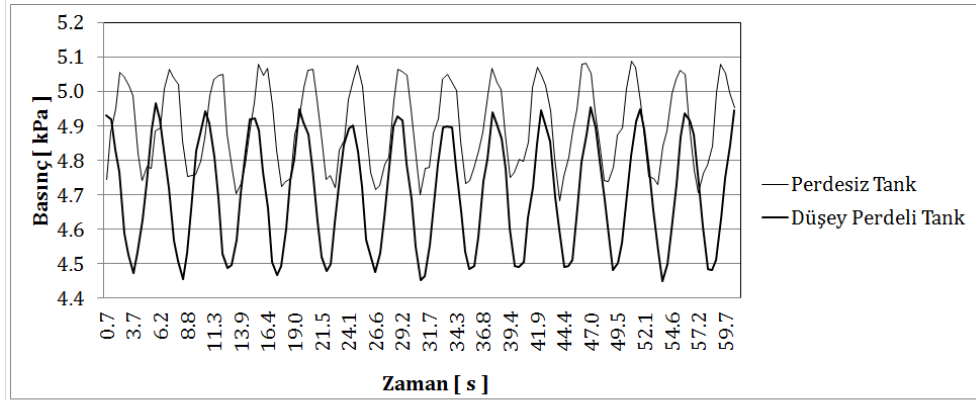
Durum 6 için, %75 doluluk oranına sahip tabanda düşey bir perde olan tankta; basınç dalgalanmaları ve viskoz sönümlenme etkisi daha da azalmaktadır. Maksimum basınçlar %50 ve %25 doluluk oranlarından daha fazladır. Ek olarak, 4° 'lik dönme açısı için T_4 , T_5 ve T_3 konumlarındaki maksimum basınç değerleri doğal periyoda kadar diğer basınçölçerlerden fazladır. Doğal periyod üzerindeki periyotlar ve periyot değerleri göz önüne alınarak 8° 'lik dönme açısı için T_3 , T_6 ve T_9 konumlarında yaklaşık olarak aynı değerleri vermektedirler. T_4 konumuna ait verilerin perdesiz durumla kıyaslanması sırası ile Şekil 31 ve 32'de verilmiştir.

Tank Boyutları : D=695 mm H=800 mm Doğal Periyod : $T_n = 0.765$ s	Durum (6) <i>Düşey Perdeli Tank</i>	Doluluk Oranı = $0.75 \times H$ T_4 Konumu ; $T_r = 0.70$ s
---	--	--

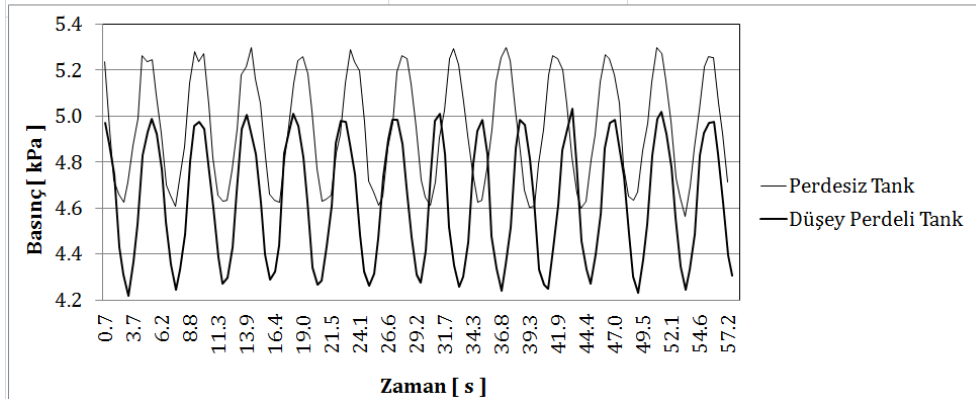


Şekil 31. %75 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 4° ve 8° dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

Tank Boyutları : D=695 mm H=800 mm Doğal Periyod : $T_n = 0.765$ s	<i>Dönme Açısı : 4°</i>	Doluluk Oranı = $0.75 \times H$ T_4 Konumu ; $T_r = 0.70$ s
---	---	--

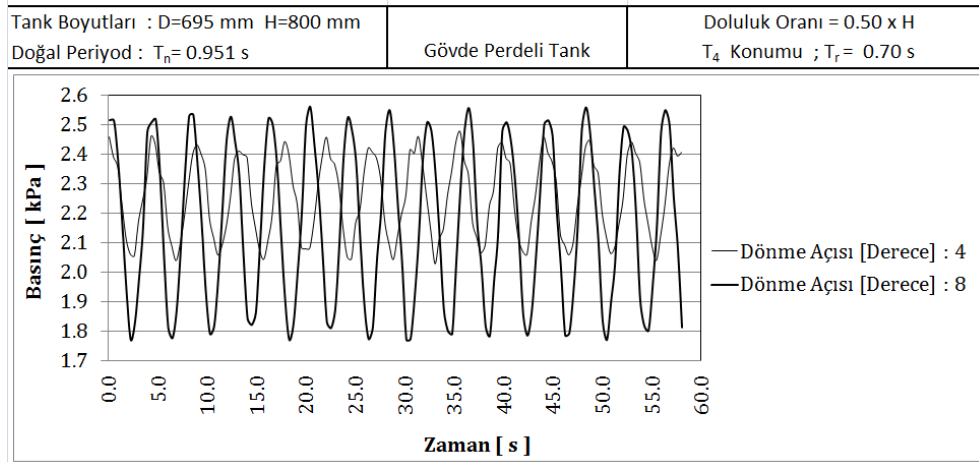


Tank Boyutları : D=695 mm H=800 mm Doğal Periyod : $T_n = 0.765$ s	<i>Dönme Açısı : 8°</i>	Doluluk Oranı = $0.75 \times H$ T_4 Konumu ; $T_r = 0.70$ s
---	---	--



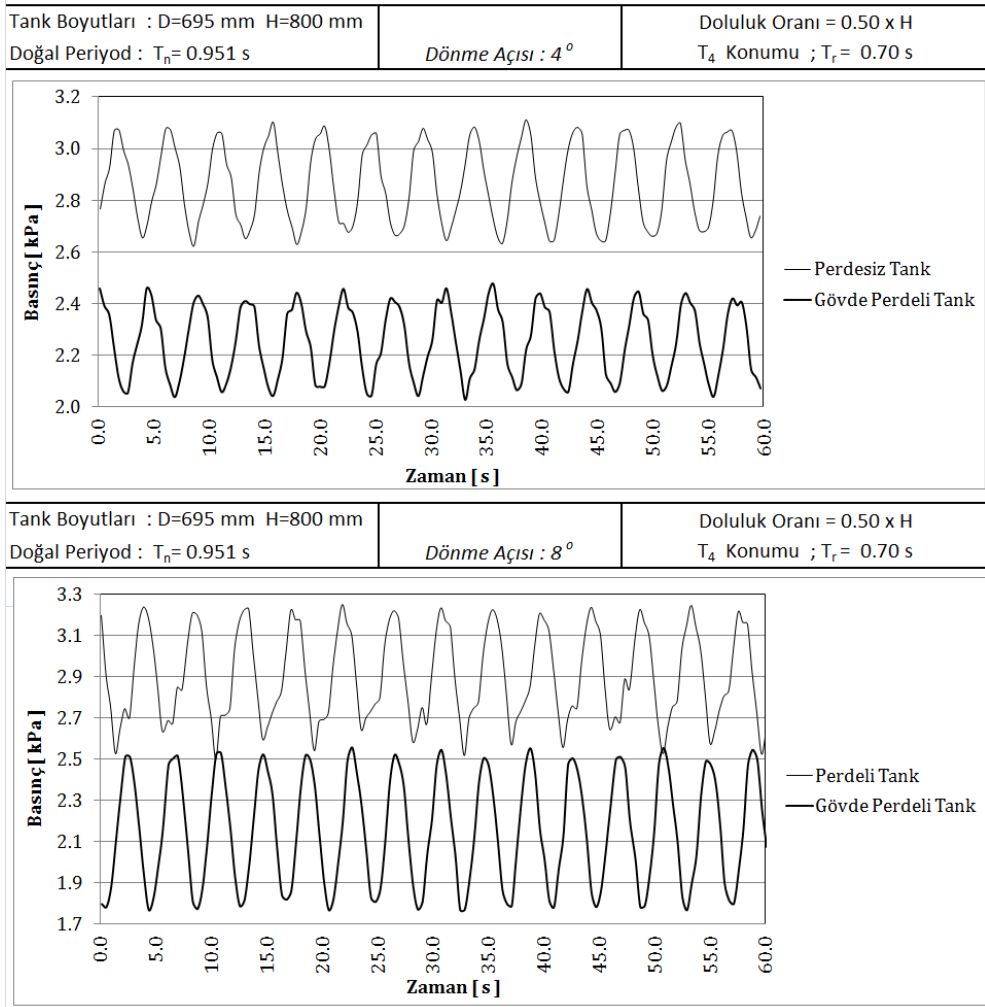
Şekil 32. %75 doluluk oranı, perdesiz ve düşey perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.

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 sıg su özelliği göstermektedir. Zorlamanın genliği artıkça, 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 33'te, T4 konumundaki basınç değerleri görülmektedir.



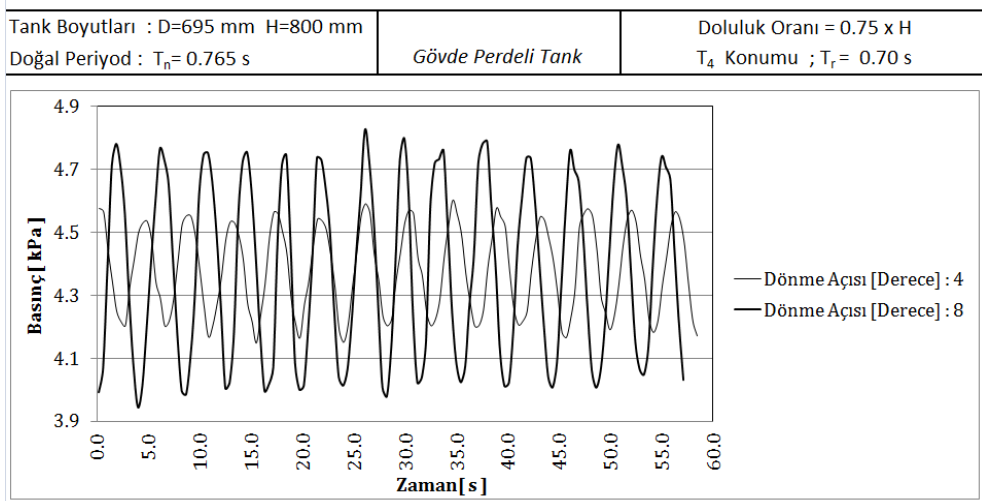
Şekil 33. %50 doluluk oranı ve gövde perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

Bu durumda, T4 konumundaki basınç değerlerinin perdesiz durumla karşılaştırılması Şekil 34'te verilmiştir. Gövde perdeli durumun daha etkili olduğu ve maksimum basınçları düşürdüğü söylenebilir.

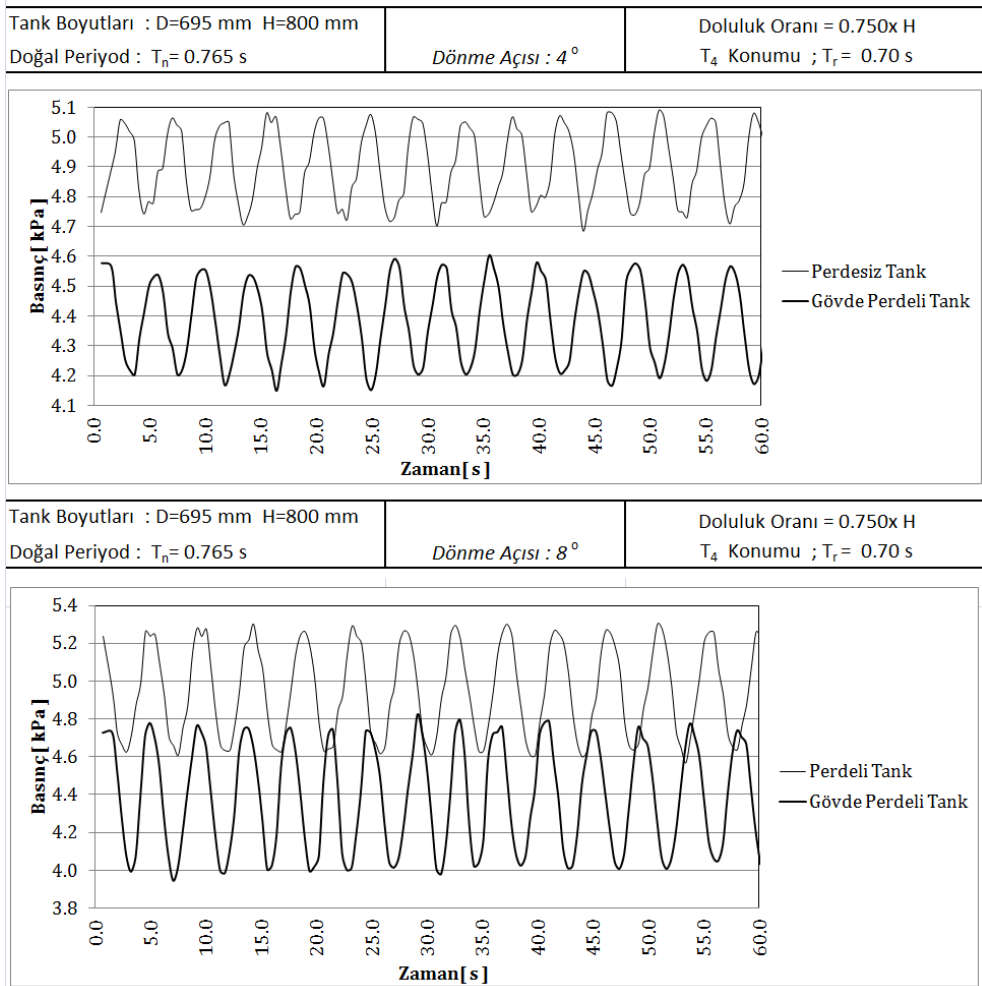


Şekil 34. %50 doluluk oranı, perdesiz ve gövde perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.

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 sıg su etkisi yaratmakta ve çalkantı dalgasının ilerleyen dalga olma özelliğini arttırmaktadır. Bunun sonucu olarak da daha yüksek çarpma basınçları oluşabilmektedir (Şekil 35 ve 36).

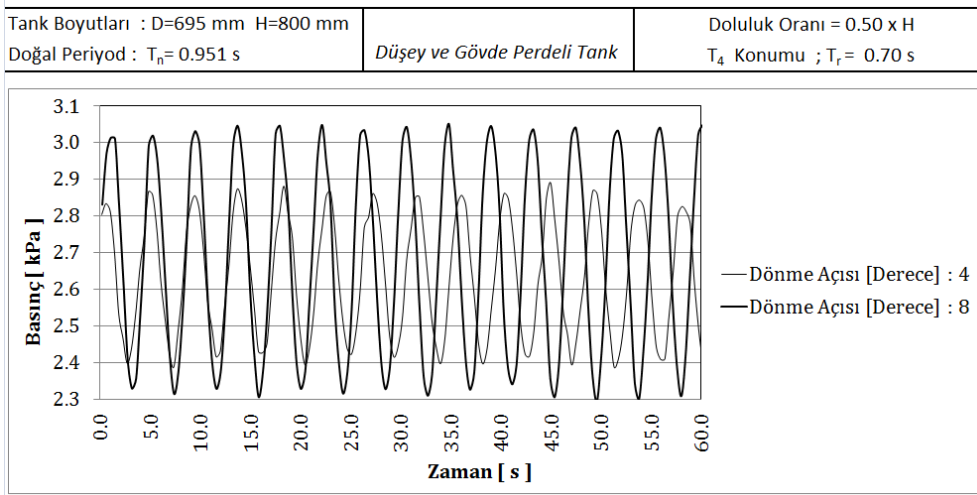


Şekil 35. %75 doluluk oranı ve gövde perdeli durum için 4° ve 8° dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

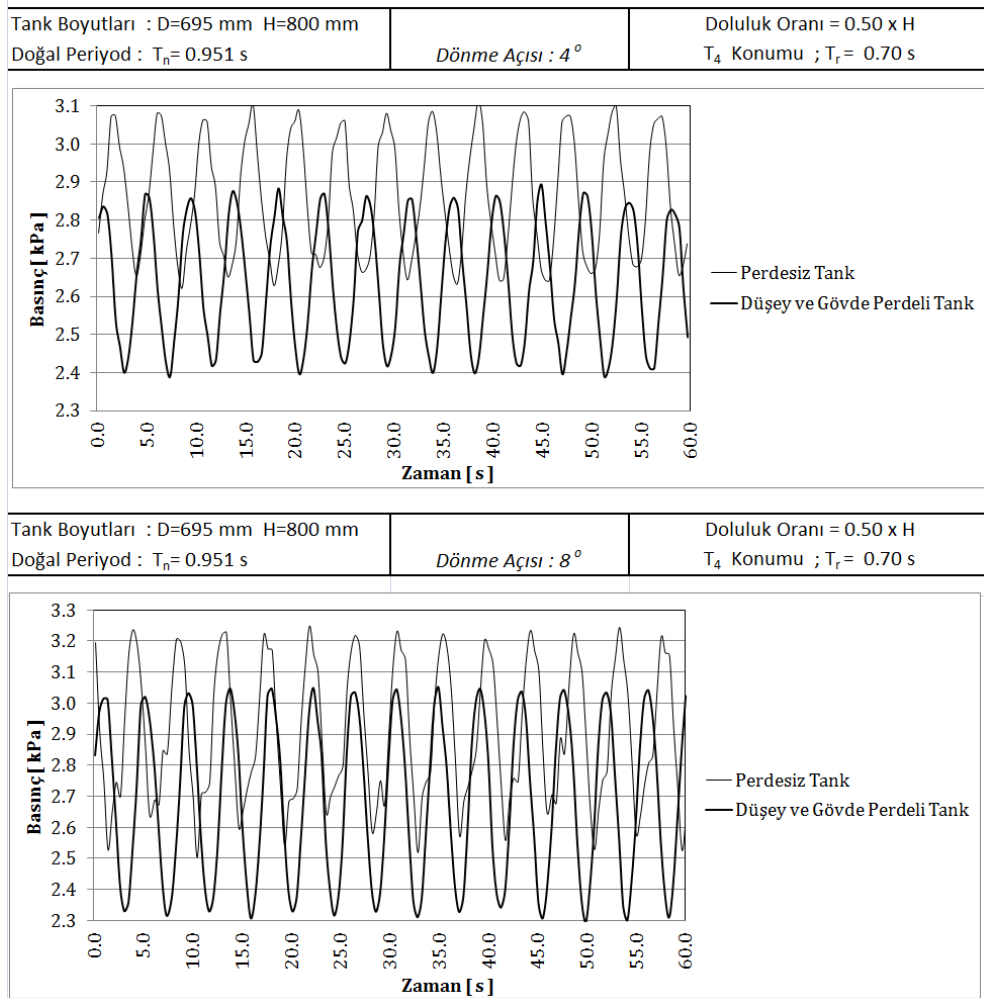


Şekil 36. %75 doluluk oranı, perdesiz ve gövde perdeli durum için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.

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 37 ve 38).

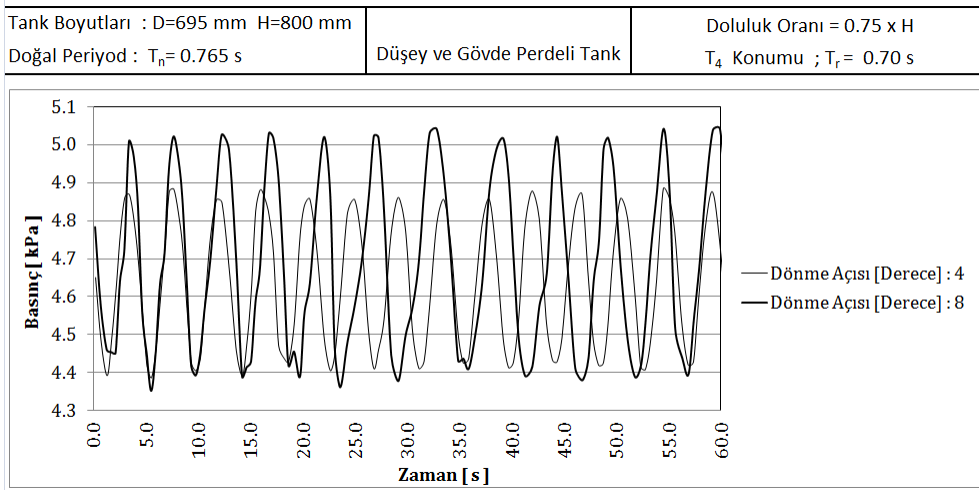


Şekil 37. %50 doluluk oranı, düşey ve gövde perdeli durum için 4^0 ve 8^0 dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.

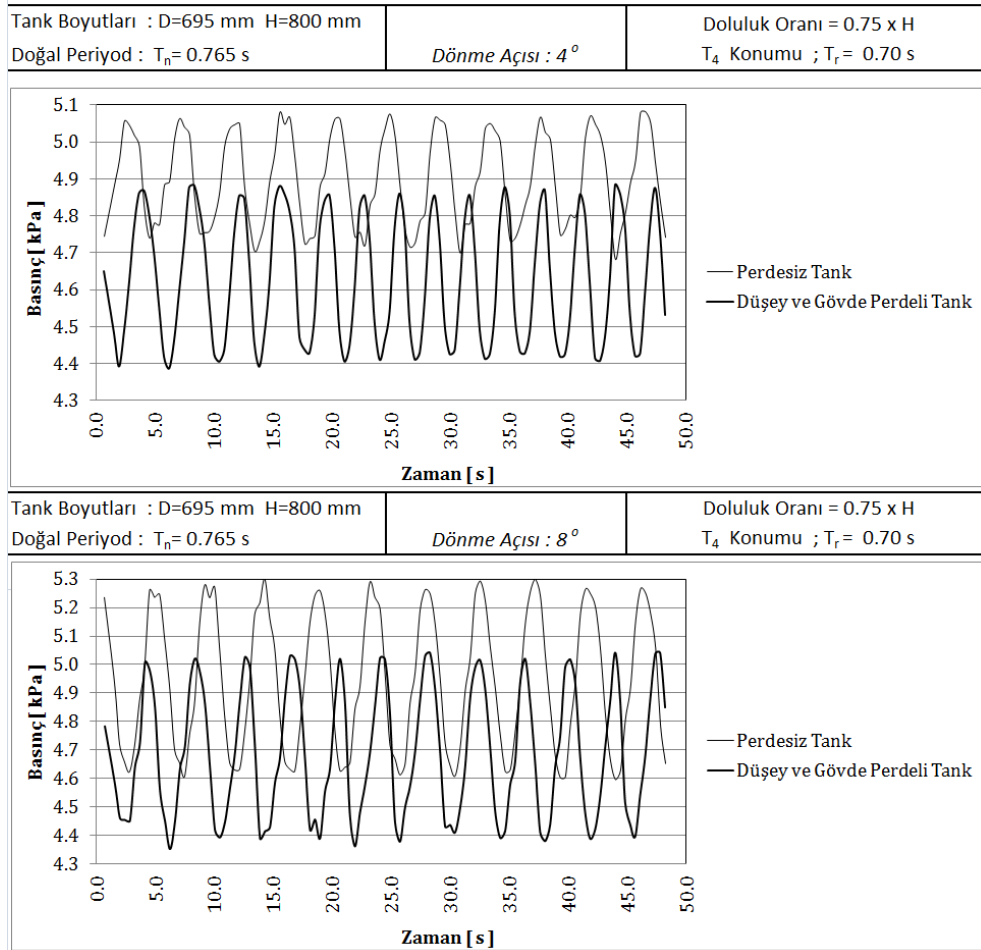


Şekil 38. %50 doluluk oranı, perdesiz durum, düşey ve gövde perdeli durumlar için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması.

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 sıg su etkisi göstermekte çalkantı dalgasının ilerleyen dalga olma karakteristiğini arttırmaktadır. Bu olay, zorlama genliği ve periyodu arttıkça yüksek çarpma basınçları oluşturabilmektedir (Şekil 39 ve 40).

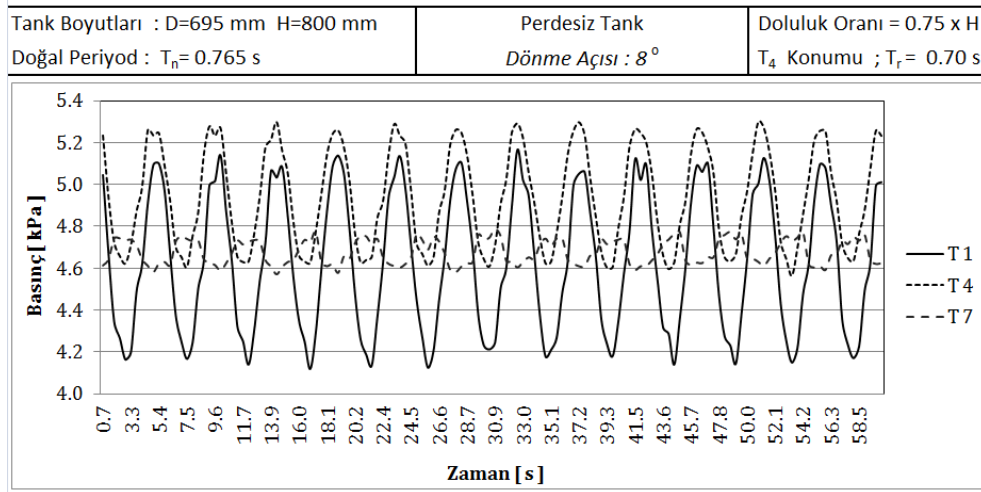


Şekil 39. %75 doluluk oranı, düşey ve gövde perdeli durum için 4⁰ ve 8⁰ dönme açılarına göre basınç değerlerinin değişimi.



Şekil 40. %75 doluluk oranı, perdesiz durum, düşey ve gövde perdeli durumlar için basınç değerlerinin değişiminin karşılaştırılması

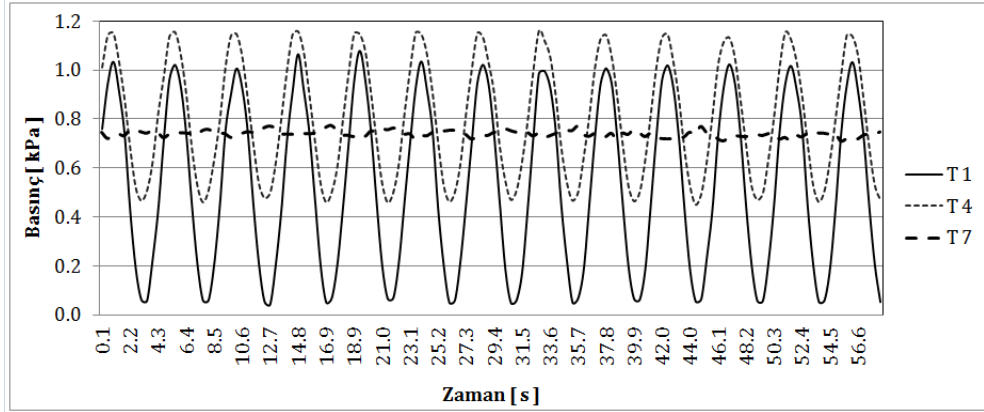
Durum 11 için, %75 doluluk oranına sahip perdesiz bir tankta; 8^0 'lik dönme açısı için T4 konumundaki maksimum basınç miktarı T1 ve T7 konumlarından daha fazladır. Dönme açısının, çalkantı olayının lineer olmayan yapısını, artan doluluk oranıyla doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Zorlama genliği arttıkça, sıvı hareketi, tank geometrisi ve üç boyutlu etkilerden dolayı şiddetlenir (Şekil 41).



Şekil 41. %75 doluluk oranı ve perdesiz durum için 8^0 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 enerjiyi dağıttığı anlaşılmıştır. Diğer taraftan, basınç dalgalanmaları ve viskoz sönümlenme etkisi doluluk oranının artmasıyla azalmıştır (Şekil 42).

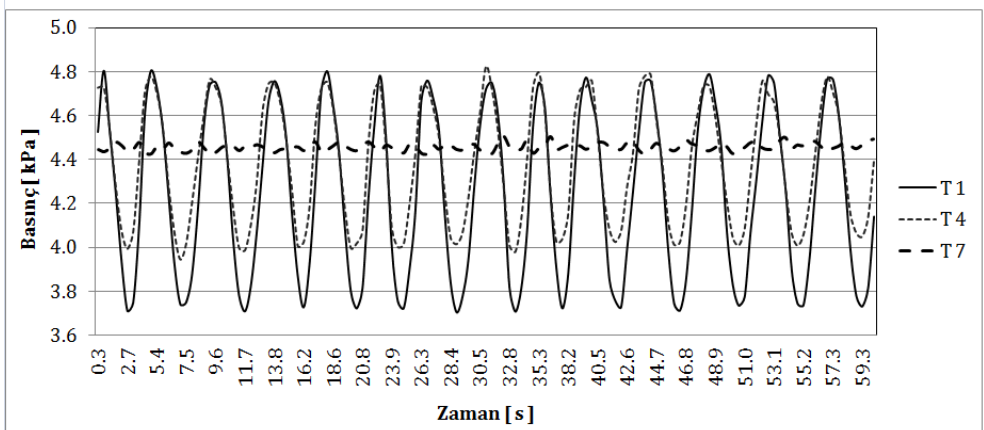
Tank Boyutları : D=695 mm H=800 mm	Düşey Perdeli Tank	Doluluk Oranı = 0.75 x H
Doğal Periyod : $T_n = 0.765$ s	Dönme Açısı : 8°	T_4 Konumu ; $T_r = 0.70$ s



Şekil 42. %75 doluluk oranı ve düşey perdeli durum için 8° dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi.

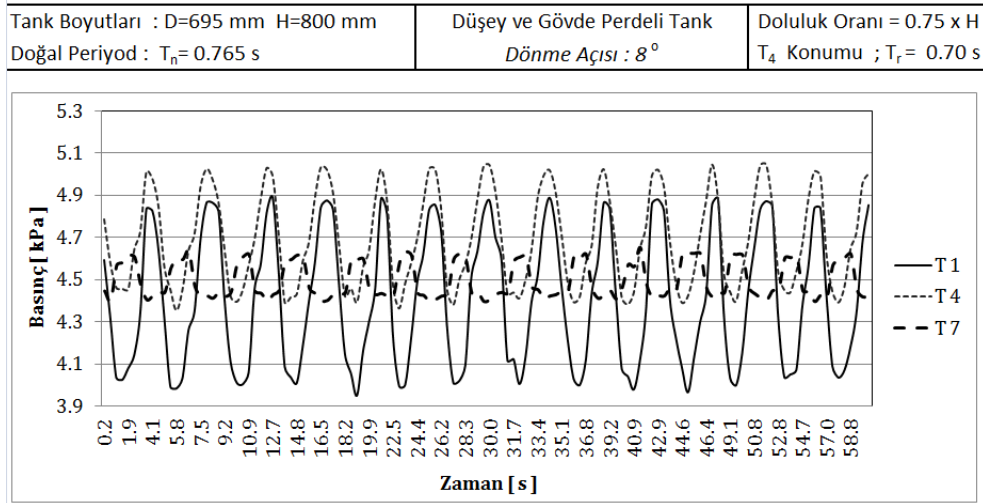
Durum 13 için, %75 doluluk oranına sahip gövde perdeli tankta; 8° 'lik dönme açısı için T_1 ve T_4 konumlarındaki maksimum basınç değerleri hemen hemen aynı değerlerdir. Yatay bir gövde perdesi üzerindeki akım, yüksek çarpma basıncı ile sonuçlanabilecek sıg su karakteristiği sergilemektedir. 8° 'lik dönme açısı için maksimum basınçların değeri düşey perdeli durumdakinden daha büyüktür; fakat perdesiz tanka göre daha azdır (Şekil 43).

Tank Boyutları : D=695 mm H=800 mm	Gövde Perdeli Tank	Doluluk Oranı = 0.75 x H
Doğal Periyod : $T_n = 0.765$ s	Dönme Açısı : 8°	T_4 Konumu ; $T_r = 0.70$ s



Şekil 43. %75 doluluk oranı ve gövde perdeli durum için 8° dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi.

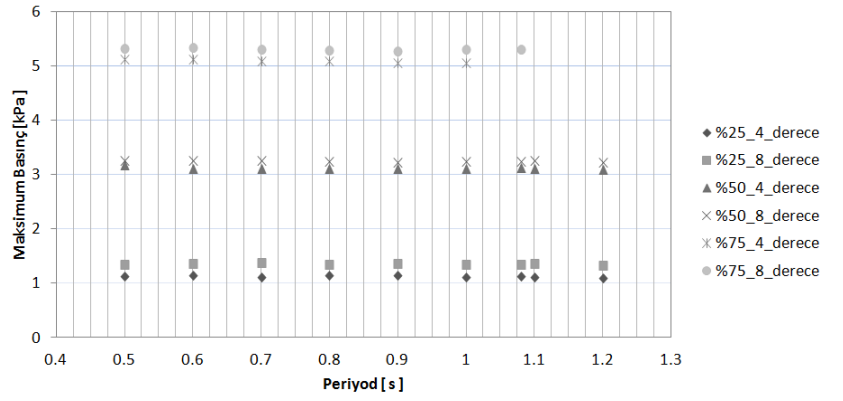
Durum 14 için, %75 doluluk oranına sahip gövde ve düşey taban perdeleri birlikte olan tankta; perdesiz durumla karşılaştırıldığında doluluk oranı ve dönme açısı arttığında maksimum basınç değerleri azalmaktadır. Düşey perde etkisinin doluluk oranı arttıkça daha az etkili olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 44).



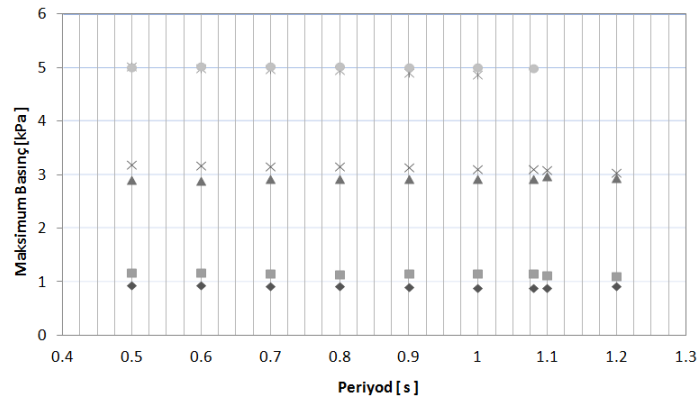
Şekil 44. %75 doluluk oranı, düşey ve gövde perdeli durumlar için 8° dönme açısında T_1 , T_4 ve T_7 konumlarında basınç değerlerinin değişimi.

3.2.1. Şekil 3’deki perde düzenlemesinde T_4 basınç noktasındaki maksimum basınçlar

Şekil 45’te, perdesiz durumda, %25, %50 ve %75 doluluk oranlarında T_4 ’teki maksimum basınç değerleri verilmiştir. Doluluk oranı arttıkça basınç değerlerinin arttığı görülmektedir. Şekil 46’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.

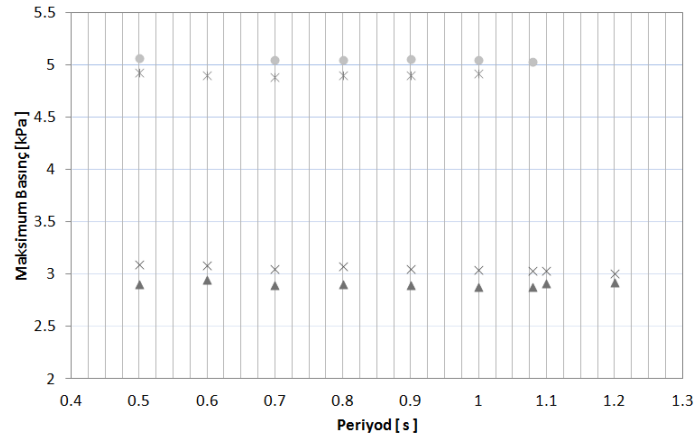


Şekil 45. Perdesiz durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.



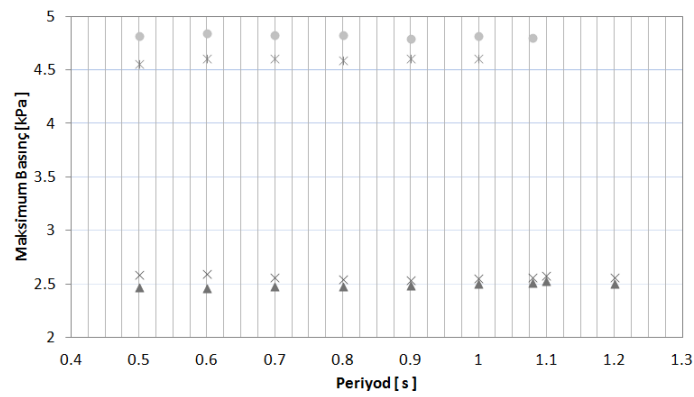
Şekil 46. Düşey perdeli durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.

Şekil 45'teki maksimum basınç değerleri, Şekil 47'de verilen gövde perdeli durumla karşılaştırıldığında, maksimum basınçtaki azalma değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, %50 doluluk oranı ve 4^0 için maksimum basınç değeri % 25 oranında, 8^0 için maksimum basınç değeri % 27 oranında azalmıştır. Doluluk oranı arttıkça maksimum değerdeki azalmanın bu durumda da düştüğü görülmüştür. %75 doluluk oranı ve 4^0 için maksimum basınç değeri % 11 oranında, 8^0 için maksimum basınç değeri ise % 10 oranında azalmıştır.



Şekil 47. Gövde perdeli durum için maksimum basınç değerlerinin değişimi.

Şekil 45'teki maksimum basınç değerleri, Şekil 48'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 48. 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 çalışmada, değişik sıvı derinlikleri ve perdeler için, silindirik bir tank içindeki sıvı çalkantısından dolayı oluşan basınç ve serbest su yüzeyi değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, dönme etkisiyle silindirik tanklarda oluşan çalkantı problemini incelemek ve tankın içinde bulunan çeşitli noktalardaki dalga ve basınç değişimlerini üç boyutlu etkileri de dikkate alarak ölçmektir. Deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Hidrolik Laboratuvarı'nda yapılmış ve ele alınan silindirik tank içindeki sıvı çalkantısıyla ilgili deneysel çalışmaların bazı sonuçları sunulmuştur.

Yapılan deneylerde, tank doluluk oranı, dönme periyodu ve dönme açısı sistematik olarak değiştirilerek bunun hidrodinamik yükler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sıvı derinliği arttıkça sığ su etkisinin olduğu ve dalga enerjisinin hidrolik sıçrama ve dalga kırılması gibi nedenlerle azaldığı görülmüştür. Ayrıca, bu perdelerin, oluşan dalgaların ilerleyen dalga formuna dönüşmesini sağlayarak çalkantı yüklerinin ve dinamik basınçların azalmasına neden olduğu anlaşılmıştır. Bunun yanı sıra, düşük periyotlarda, incelenen doğrultuda tank duvarlarına sıvı çarpmasından dolayı oluşan yüklerin de arttığı tespit edilmiştir.

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 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. Şekil 2'deki Perde düzenlemeleri göz önüne alındığında, Şekil 2(c)'deki perde düzenlemesinin basınç değerlerini düşürmekte daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 3'teki perde düzenlemeleri göz önüne alındığında ise, 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.

KAYNAKLAR

- [1] **Faltinsen, O.M. ve Timokha, A.N.** 2009. Sloshing. Cambridge University Press, New York. USA.
- [2] **İbrahim, R. A., Pilipchuk, V. N., Ikeda, T.** 2001. Recent Advances in Liquid Sloshing Dynamics. *Applied Mechanical Review*, **54(2)**, 133-199.
- [3] **İbrahim, R.A.** 2005. Liquid sloshing dynamics. Theory and Applications. Cambridge University Press.
- [4] **Akyıldız, H., Ünal, N.E., Bağcı, T.** 2012. Rigid silindirik bir tankta sıvı çalkantısının deneysel incelenmesi. *Teknik Dergi*, **23(4)**.
- [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, A.M.** 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] **Akyıldız, H., Ünal, N. E.** 2005. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing. *Ocean Engineering*, **32**,1503-1516.
- [8] **Panigrahy, P.K., Saha, U.K., Maity, D.** 2009. Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks. *Ocean Engineering*, **36(3-4)**, 213-222.
- [9] **Pal, P., Bhattacharyya, S.K.** 2010. Sloshing in partially filled liquid containers – Numerical and experimental study for 2-D problems. *Journal of Sound and Vibration*, **329**, 4466-4485.
- [10] **Biswal, K.C., Bhattacharyya S.K., Sinha P.K.** 2006. Non-linear Sloshing in Partially Liquid Filled Containers with Baffles. *Int. Journal on Numerical Methods in Engineering*, **68(3)**,317-337.
- [11] **Bhattacharyya, S.K.** 2006. Suppression of liquid sloshing using baffles. Dept. Civil Eng., Indian Institute of Technology.
- [12] **Akyıldız, H., Ünal, N. E.** 2006. Sloshing in a three dimensional rectangular tank: Numerical simulation and experimental validation. *Ocean Engineering*, **33(16)**, 2135-2149.
- [13] **Sames, P.C., Marcouly D., Schellin E.T.** 2002. Sloshing in rectangular and cylindrical tanks. *Journal of Ship Research*, **46(3)**, 186-200.
- [14] **El Damatty, A.A., Saafan, M.S., Sweedan, A.M.I.** 2005. Experimental Study Conducted on a Liquid-Filled Combined Conical Tank Model. *Journal of Thin Walled Structures*, **43**,1398-1417.
- [15] **Younes, M.F., Younes, Y.K., El-Madah, M., Ibrahim, I.M., El-Dannanh, E.H.** 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.

- [16] **Eswaran, M., Saha, U.K., Maity, D.** 2009. Effect of the baffle on a partially filled cubic tank: Numerical simulation and experimental validation. *Computer and Structures*, **87**, 198-205.
- [17] **Pal, N.C., Bhattacharyya, S.K., Sinha, P.K.** 2001. Experimental investigation of Slosh dynamics of liquid-filled containers. *Experimental Mechanics*, **41(1)**, 63-69.
- [18] **Pal, N.C., Bhattacharyya, S.K., Sinha, P.K.** 2003. Non-Linear Coupled Slosh Dynamics of Liquid-Filled Laminated Composite Containers: a Two Dimensional Finite Element Approach. *Journal of Sound and Vibration*, **261(1)**, 729-749.
- [19] **Biswal, K.C., Bhattacharyya S.K., Sinha P.K.** 2002. Coupled Dynamic Response of Liquid Filled Composite Cylindrical Tanks with Baffles. ASME, 5th Symposium on FSI, AE&FIV+N, 17-22.
- [20] **Biswal, K.C., Bhattacharyya S.K., Sinha P.K.** 2003. Free Vibration Analysis of Liquid Filled Tank with Baffles. *Journal of Sound of Vibration*, **259(1)**, 177-192.
- [21] **Biswal, K.C., Bhattacharyya S.K., Sinha P.K.** 2004. Dynamic Response Analysis of a Liquid-filled Cylindrical Tank with Annular Baffle. *Journal of Sound and Vibration*, **274(1-2)**, 13-37.
- [22] **Gavrilyuk, I., Lukovsky, I., Trotsenko, Y., Timokha, A.** 2006. Sloshing in a Vertical Cylindrical Tank with an Annular Baffle. Part1. Linear Fundamental Solutions. *Journal of Engineering Mathematics*, **54**, 71-88.
- [23] **Maleki, A., Ziyaeifar, M.** 2008. Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles. *Journal of Sound and Vibration*, **311(1-2)**, 372-385.
- [24] **Maleki, A., Ziyaeifar, M.** 2007. Damping enhancement of seismic isolated cylindrical liquid storage tanks using baffles. *Engineering Structures*, **29(12)**, 3227-3240.
- [25] **Yan, G., Rakheja, S., Siddiqui, K.** 2009. Experimental Study of Liquid Slosh Dynamics in a Partially-Filled Tank. *Journal of Fluids Engineering*, **131(7)**.
- [26] **Attari, N.K.A., Rofooei, F.R.** 2008. On lateral response of structures containing a cylindrical liquid tank under the effect of fluid/structure resonances. *Journal of Sound and Vibration*, **318**, 1154-1179.
- [27] **Ikeda, T., Ibrahim, R.A.** 2005. Nonlinear random responses of a structure parametrically coupled with liquid sloshing in a cylindrical tank. *Journal of Sound and Vibration*, **284(1-2)**, 75-102.
- [28] **Xue, M.-A, Lin, P.** 2011. Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing. *Computers&Fluids*, **52**, 116-129.

NOTLAR

[illegible]

[illegible]