



## Silindir ve Kürelerin Suya Girişlerinde Esnekliğin ve Katı Yüzey Özelliklerinin Dövünme Yüklerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Fatih Cüneyt KORKMAZ, Bülent GÜZEL

Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Türkiye  
fkorkmaz@yildiz.edu.tr, ORCID ID: orcid.org/0000-0001-9250-5265  
bguzel@yildiz.edu.tr, ORCID ID: orcid.org/0000-0001-6915-4209

### Öz

*Bu çalışmada gemilerdeki dövünme yükleri, dövünme esnasında gerçekleşen enerji transferi gözönünde bulundurularak, deneysel olarak incelenmiştir. Suya giren cisimlerin serbest su yüzeyinde oluşturduğu deformasyonlar incelenmiş ve çarpma kuvvetleri gerinim ölçerler vasıtasıyla farklı giriş hızlarında ölçülmüştür. Deneyler, suya giriş esnasında yüzeylerinin serbest su yüzeyi ile yaptığı giriş açısının her bir derinlik aşamasında farklılık gösterdiği silindir ve küre ile gerçekleştirilmiştir. Serbest düşme deneyleri, araştırılan geometrinin belirli yükseklikten suya girişi sağlanarak üzerine gelen çarpma kuvvetlerini ölçmek ve deforme olan suya transfer edilen enerjinin bu kuvvetlerle olan ilişkisini incelemek üzere kurgulanmıştır. Boyutsuz bir değer olan dövünme katsayısının ( $C_s$ ) deneyler neticesinde elde edilen değerleri, analitik ve nümerik yöntemlerle elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.*

*Yüzeyi tırtıklı bir silindirin suya giriş esnasında su yüzeyini farklı bir şekilde deforme ettiği ve bu farklılığın dövünme kuvvetini de etkilediği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda farklı elastisite modülüne sahip malzemelerle üretilen silindirler kullanılarak elastisitenin dövünme üzerine etkisi araştırılmış ve elastisitenin dövünme kuvvetlerinin etkisini azalttığı gösterilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Çarpma Kuvveti, Dövünme, Suya Giriş.

## Experimental Investigation of the Effects of Flexibility and Surface Properties on Slamming Loads in Water Entry of Cylinders and Spheres

### Abstract

*This study investigates the slamming impacts experimentally considering the energy transfer from solid to fluid during slamming. Deformations on free water surface by solid objects entering water were observed and impact forces were measured via strain gauges at different entrance velocities. Experiments were conducted by using cylinders and spheres whose surfaces' entrance angles into the water change at different depth levels. Free fall tests were designed to measure impact forces of the investigated shapes by immersing them into the water from a definite height and to investigate the relation of the energy transferred to the water with this force. The slamming coefficient,  $C_s$  is calculated from experimental results and then compared with analytical and numerical results.*

*It is observed that the cylinder with ridged surface deforms the free water surface differently and this difference affects the slamming force as well. The effect of flexibility is also studied by using cylinders of different elasticity and it is shown that flexibility decreases the effect of slamming forces.*

**Keywords:** Impact Force, Slamming, Water Entry.

## 1. Giriş

Dövünme, genellikle ağır deniz koşullarında, teknenin baş kısmı ve karinası sudan ayrılp yeniden su yüzeyine çarptığında çoğunlukla baş ya da başa yakın bölgeler gibi su yüzeyi ile yüzer gövde arasındaki göreceli hızın büyük olduğu yerlerde meydana gelen, birkaç milisaniye içerisinde birkaç yüz kPa değerlerine kadar ulaşabilen yüksek basınç yüküdür [1]. Bu basınç yükü suyun içerisine dalmış olan cismin yüzeyi boyunca dağılmakta ve katı-sıvı etkileşiminin ilk yaşandığı ve jet akışının gerçekleştiği yerde maksimuma ulaşmaktadır. Bu yükler borda, kiriş ve perdeler gibi gemi yapısal elemanlarını etkilediği gibi, neden olduğu titreşim anten, direk ve elektronik aksamalarda da hasara yol açabilmektedir [2]. Gemiye etki eden zayıf dövünme kuvvetleri bile gemi gövdesinde kırbaçlama etkisi oluşturur. Özellikle geminin baş ve kış kısımlarında oluşan bu etki burulma momentini önemli ölçüde artırır. Beraberinde gemi malzemelerinde yorulmalara ve mikron mertebede çatlaklara neden olur. Bu etkiler zamanla büyüyerek düşük genlikli çarpmalarda bile gemi gövdesinde yırtılmalara sebep olabilir. Willis ve diğerleri [3] dövünme kaynaklı hasarlara maruz kalmış 400'den fazla Amerikan gemisini inceledikleri çalışmalarında, bu gemilerin toplam tamir masraflarının altı milyar doların üzerinde olduğunu tespit etmişlerdir.

Dövünme alanındaki teorik çalışmaların öncüsü Von Karman'dır. Von Karman [4], deniz uçaklarının suya inişleri esnasında maruz kaldıkları hidrodinamik etkileri incelediği çalışmasında problemi üç boyuttan iki boyutlu bir kesite indirgeyerek çözüm yolunda önemli bir adım atmış ve momentum teoremi ile ek-kütleyi temel alan bir teorik model geliştirmiştir. Sonrasında Wagner [5], problemi su yüzeyine düşen düz bir plaka boyutuna indirgeyerek ve yükselen suyu da hesaba katarak Von Karman'ın teorik modelini modifiye

etmiştir. Çok sonraları Zhao ve Faltinsen [6] ile Mei [7] açıkörur gönderim metodunu kullanarak ve daha lineer bir yaklaşım uygulayarak Wagner'in çalışmalarını önemli ölçüde geliştirmişlerdir.

Dövünme yüklerinin tespiti amacıyla gerçek anlamdaki ilk düşme testi Chuang [8] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bir kesitin suya düşmesi şeklinde tasarlanan deneyde sırasıyla, 1, 3, 6, 10 ve 15 derecelik kalkıntı açılarında kesitler test edilmiş, dip bölgesinden başlayarak çeşitli aralıklarda yerleştirilen sensörlerle çarpma esnasında oluşan basınç ölçülmüştür. Deney sonucunda 1 dereceden 3 dereceye kadar olan kalkıntı açılarında çarpma esnasında su yüzeyiyle kesit arasında sıkışan havanın hesap katılması gerektiği saptanmıştır. Engle [9] bir dizi düşme testi yaparak kesitte meydana gelen dövünme yüklerini deneysel olarak tespit etmiş ve deneysel verileri çeşitli teorik modellerle karşılaştırmıştır. Çalışması sonucunda 10 derecelik açıya sahip kesitte meydana gelen maksimum basınç katsayısının tespitinde Chuang'ın yönteminin daha iyi sonuç verdiğini, Wagner'in sonuçlarının ise yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Dövünme yüklerinin gemi yapısı üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi için gözlemlenmesi gereken önemli bileşenden biri maksimum basınç katsayısıdır. Yettou ve diğ. [10] yürüttükleri deneysel çalışmalarında farklı düşme yükseklikleri, kalkıntı açıları ve kesit kütlelerinin kesit üzerindeki basınç dağılımına etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda kesit kütlesi ve düşme yüksekliğinin basınç katsayısı üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığını, basınç katsayısını etkileyen en önemli etkenin kalkıntı açısı olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak kesit kütlesi ve düşme yüksekliğinin basınç katsayısına bir etkisi olmamasına rağmen, kesitin suya giriş sonrasındaki hızını etkilediğini iddia etmişlerdir. Lewis ve diğ. [11] de 25 derece kalkıntı açılı iki boyutlu bir kesit modelinin

dövünme yüklerini deneysel olarak incelemiş, deneyler esnasında kesitin serbest düşüşünü yüksek hızlı kamerayla kaydederek düşüşün serbest su yüzeyinde yarattığı değişimi gözlemlemişlerdir. Katı cisimlerin suya girişi sırasında serbest su yüzeyinde meydana gelen su yükselmesi, yığıntılar, jet akışı ve su sıçramasını içeren bozulma nümerik modellerde ve analitik incelemelerde nonlineariteden kaynaklı karmaşıklıklardan dolayı göz ardı edilmektedir. Cointe ve Armand [12] ve Panciroli ve diğ. [13] suya transfer edilen enerjinin büyük bir kısmının su yükselmesine ve jet akışına transfer edildiğini asimptotik analiz ve PIV ölçümleriyle göstermişlerdir.

Literatürde az da olsa malzemenin esnekliğinin dövünme yüklerine etkisini inceleyen çalışmalar mevcuttur. Peseux ve diğ. [14] farklı kalınlık ve kalkıntı açılarındaki iki boyutlu modellerle gerçekleştirdikleri deneylerde hem rijit hem de deforme olabilen malzemeleri test etmişler, elde ettikleri deneysel verileri sonlu elemanlar yöntemi kullanarak buldukları sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Van Nuffel [15] yaptıkları çalışmada içi boş elastik bir silindirle düşme testleri yaptıktan sonra aynı silindirin içini beton ile doldurarak aynı testleri tekrarlamış ve yapıdaki esnekliğin dövünme kuvvetini sönmlediğini dolayısıyla dövünme yüklerinin rijit haldeki gelen yüklerden çok daha az ölçüldüğünü belirtmiştir. Faltinsen [16] küçük kalkıntı açılarında hidroelastisitenin önemini göstermiştir. Bereznitski [17] 2D beam üzerine nümerik bir çalışma yürütmüş ve hidroelastisitenin etkisinin çok kısa süreli çarpmalarda ve sifıra yakın kalkıntı açılarında önemli olduğunu göstermiştir. Daha sonra Faltinsen [18], Cooper [19], Panciroli ve diğ. [20] rijid olmayan paneller ve deforme olabilen kamalarla düşme testleri yaparak hidroelastisiteyi araştırmışlardır. Panciroli [21] elastik bir silindirle düşme testleri gerçekleştirmiş ve çarpmanın etkisiyle test

silindirinin elipse dönüştüğünü ve toplam deformasyonun birinci mod şekle göre gerçekleştiğini göstermiştir.

Sonuç olarak, dövünme gemilerde ve off-shore yapılarda hasarlara neden olabilmekte, tedbir amaçlı gönüllü hız kesmelere sebebiyet verdiği için ulaşım zamanlarını uzatmakta, yakıt sarfiyatı ve egzoz emisyon miktarlarını artırmaktadır. Bu nedenle güvenli bir yapısal dizayn ve optimum bir seyir için bu yüklerin önceden tespit edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla ve gemilerde yaşanan dövünme yüklerini azaltmaya yönelik olarak, sakin su koşullarında, bir tekne kesitinde meydana gelen dövünme yüklerini deneysel olarak araştırmak için kapsamlı bir deney çalışması yürütülmüş, iki ve üç boyutlu farklı geometrik nesnelere üzerine gelen toplam yükler ve diğer suya giriş karakteristikleri analiz edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar benzer deneylerin bilgisayar ortamında modellenerek elde edilmiş sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada değişken kalkıntı açısı karakteristiğine sahip gemi bulbına benzerliğinden dolayı silindir ve küre şekilli cisimlerle çalışılmış ve bu tür cisimlerin suya girişleri enerji transferi açısından incelenmiştir.

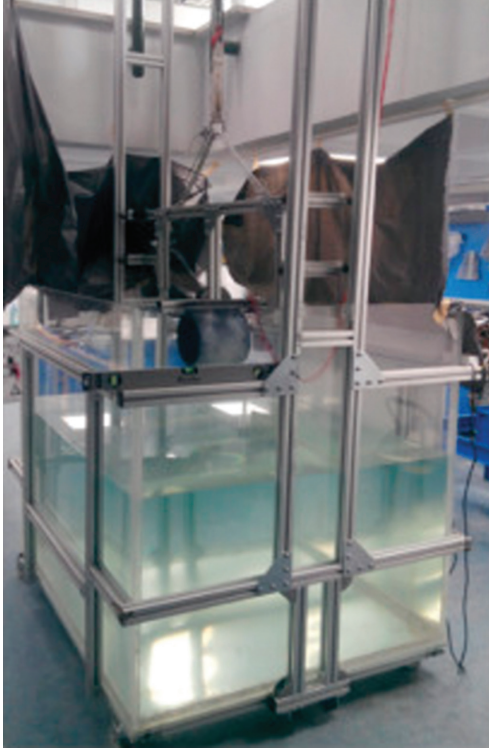
## 2. Deney Düzenegi ve Metodoloji

Günümüzde gemilerdeki dövünme yüklerinin hesaplanmasında kullanılan farklı sayısal modeller bulunsa da bu modeller yardımıyla geminin maruz kaldığı dövünme yükünü net olarak tespit etmek hala mümkün olamamaktadır. Dövünme yüklerinin meydana gelişinin kompleks bir hidrodinamik hadise olması, yüksek nonlinearite içermesi ayrıca problem içerisinde serbest yüzey etkisinin bulunması analitik yada nümerik metotlarla dövünme hesabının yapılmasını güçleştirici faktörlerdir.

İnşa edilen Türk Gemi İnşa sektörüne katkı sunacağı öngörülen deney düzenegi;

test edilecek gemi form kesitlerinin belirli hızlarda suya girişinin sağlanması için 1 m x 1.7 m x 1.2 m boyutlarında 10 mm kalınlığında akrilik camdan yapılmış bir su tankı, taşıyıcı araba ve düşme mekanizması içermektedir (Şekil 1). Tankın dört tarafının da akrilik olması suya giriş karakteristiklerinin gözlemlenmesine olanak vermektedir. Tank deneyler esnasında yaklaşık 80 cm derinlikte su ile doldurulmaktadır. Literatürden bilindiği üzere bu derinlikte sıg su etkisi olmamakta ve tanktan su kaybı yaşanmadan ölçüm alma ve gözlem yapma imkanı bulunmaktadır. Düşme deneyleri esnasında taşıyıcı araba kaynaklı herhangi bir sallantı yaşanmaması ve titreşim oluşmaması için deney düzeneği dört ayağından, en üstünden ve en altından betona sabitlenmiştir.

Deneysel düzende alüminyum konstrüksiyondan teşkil bir taşıyıcı



Şekil 1. Su Tankı ve Çerçevesi

yapı üzerinde belirli bir yükseklikte tutulan nesnelere su dolu tank içerisine bırakılmaktadır. Deney düzeneğiyle 4 metreye kadar çeşitli yüksekliklerden taşıyıcı araba vasıtasıyla üzerine bağlı olan test nesnelere farklı mesafelerden suya girişleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu da 9 m/s'lik giriş hızına kadar deney yapmayı mümkün kılmaktadır.

Suya girişte test nesnelere etki eden toplam kuvvet değerleri gerinim ölçerler vasıtasıyla ölçülmüştür. Bu amaçla Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd. marka WFLA-6-11-3L model su geçirmez gerinim ölçerler kullanılmış, veri transferi de National Instrument 9235 marka DAQ ile sağlanmıştır. Bütün deneylerde 10 kHz'lik bir örnekleme frekansında gerinim değerleri ölçülmüştür. Phantom Miro ex4 marka hızlı kamera kullanılarak 1400 fps hızında videolar çekilmiş ve jet akışı, su yükselmesi, pile up (yığıntı) ve cisim ardında oluşan kavimler yüksek çözünürlükteki resimler üzerinden analiz edilmiştir. Bu şekilde gemi kesitinin suyla teması anında su yüzeyinde meydana getirdiği hidrodinamik etkiler gözlemlenebilmiştir.

Literatürde az sayıda araştırma suya girişi sağlanan cisimlerin esneklikleri üzerine deneysel çalışma mevcuttur. Biri UPVC diğeri alüminyumdan olmak üzere farklı elastisiteye sahip iki silindir deneysel çalışmalarda karşılaştırılmıştır. Kullanılan silindirlerin rijidlik seviyeleri,  $FS=EI/(R_m)^3$  ilişkisi ile; E, malzeme elastisitesi, I, atalet momenti ve  $R_m$ , ortalama yarıçap, hesaplanmıştır. Alüminyum silindirin bu değerlendirmeye göre UPVC silindire göre yaklaşık dört kat daha rijid olduğu tespit edilmiştir.

### 3. Deney Sonuçları

Yürütülen deney serileri ile farklı geometride, esneklik değerlerinde ve yüzey özellikleri durumunda dövünme sırasında cisme gelen kuvvetlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Özellikle

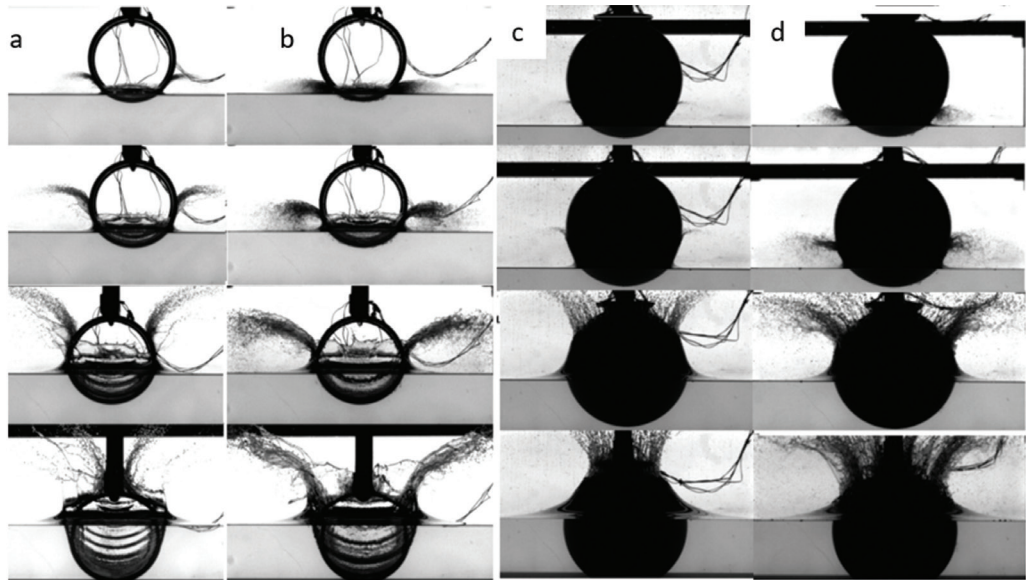
yüzey karakteristiğinin etkisi ile ilgili olarak literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Silindir modeller UPVC ve alüminyum olmak üzere iki farklı malzemeden, küre modeli ise akrilikten üretilmiştir. Tablo 1'de test edilen cisimlerin geometrik ve kütleli özellikleri gösterilmiştir. Bu tür geometrilerin suya girişi değişken açılı giriş olarak gruplandırılır ve cismin yüzeyi ile su yüzeyi her derinlik aşamasında farklı açı değeri göstermektedir. Silindir ve küre şeklindeki cisimlerin suya girişteki ilk temaslarında açı en küçük değeri (0 derece) gösterirken, suya girdikçe bu açı değeri artarak değişkenlik gösterir.

Bu tür modeller geometrik açıdan bulbul karakteristiği gösterdiği için genellikle hull altı dövünme çalışmalarında tercih edilmektedir.

Katı cisimler suya giriş yaptığı andan itibaren sahip oldukları enerjinin bir kısmını suya aktarırlar. Serbest su yüzeyiyle ilk temas halinde çarpışma spray olarak tabir edilen küçük bir su kütesini pülverize olarak dışarıya doğru iter, bu durumda cismin düşey hızı çok fazla değişmemektedir. Cisim penetrasyona devam ettikçe daha fazla kinetik enerjisini su kütesine transfer ettiğinden düşey hızı azalmakta ve cismin kenarlarından daha fazla miktarda su yukarıya doğru yükselmektedir.

**Tablo 1.** Test Nesnelerinin Geometrisi ve Ağırlıkları

	Silindir (S1)	Silindir (S2)	Silindir (S3)	Küre (K1)
<b>Kütle (taşıyıcı ile)</b>	16 kg	11 kg	15 kg	12 kg
<b>Çap</b>	22 cm	12 cm	15 cm	30 cm
<b>Kalınlık</b>	1 cm	0.2 cm	0.6 cm	0.4 cm
<b>Malzeme</b>	UPVC	Alüminyum	Alüminyum	Akrilik

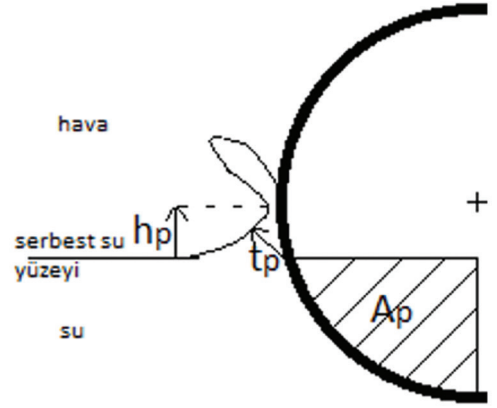


**Şekil 2.** Farklı Yüksekliklerden Düşürülen Cisimlerin Suya Giriş Aşamaları

Silindir (S1) a) 15 cm'den 11, 22, 42 ve 78 ms ve b) 50 cm'den 6, 14, 26 ve 48 ms, Küre (K1) c) 15 cm'den 18, 26, 65 ve 95 ms ve d) 50 cm'den 9, 15, 40 ve 58 ms

Bu yükselme pileup olarak adlandırılır ve tam su hattında jet akışı oluşmaya başlar. Tam bu anda cisim büyük bir reaksiyon kuvvetiyle karşılaşır ki buna dövünme kuvveti denir. Dövünme kuvveti ve yükselen suyun karakteristikleri cismin giriş hızına ve şekline bağlıdır. Şekil 2’de 15 cm ve 50 cm’den bırakılan silindir ve kürenin serbest düşme testleri sırasında elde edilen farklı aşamalarda suya giriş anları görülmektedir. 15 cm’den bırakılan cisimlerin hızları ve kinetik enerjileri düşük olduğu için cisim suyu çok fazla dışarıya doğru itmemekte, bu sebeple arkasında kavite oluşturamadan enerjisinin az bir kısmı ile az miktarda suyu sıçratmaktadır. Deforme olan su yüzeyi oluşan yığıntılarla (pileup) birlikte cismin üzerine kapanmaktadır. Cisim daha yüksek enerjiye sahip olduğunda ise, yani cisim ile serbest su yüzeyi arasındaki yükseklik arttırıldığında (50 cm) yüzeyle etkileşim halindeki su belirli bir mesafe cismin yüzeyini takip ettikten sonra stabilitesi bozulduğu için yüzeyden ayrılmakta ve suya transfer edilen enerji daha yüksek olduğundan dolayı daha büyük kütlede yığıntılar cisimden dışarıya doğru uzaklaşmakta ve cismin arkasında kavite oluşmasına neden olmaktadır. Suya giren cisim transfer ettiği enerjisinin yarısını yükselen suya (jet flow) verirken kalan yarısını da yığıntılardaki (pileup) su kütlelerine vermektedir (Cointe ve Armand [12]). Panciroli ve diğ. [13] ise yaptığı PIV ölçümlerinden deforme olana suya giden enerjinin %60-80 oranlarında daha fazla olduğunu gözlemlemiştir. Yani serbest su yüzeyindeki değişimler ile suya giren cisimlerin enerjilerinin aktarımı arasında doğrudan bir ilişki olduğu gözlemlenmektedir. Aktarılan enerji miktarlarını yükselen su kütlelerinin hacmi üzerinden boyutsuz olarak karşılaştırmak için sabit kalkıntı açılı (kama) geometriler için tanımlanmış boyutsuz bir katsayı olarak iletme faktörü literatürde mevcuttur.

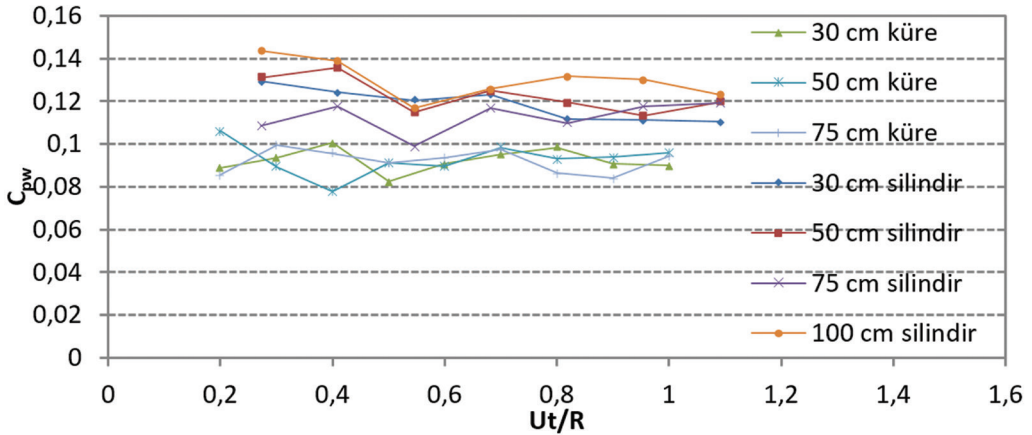
Benzer şekilde değişken açılı cisimlerin suya giriş sırasında oluşturduğu deforme olup



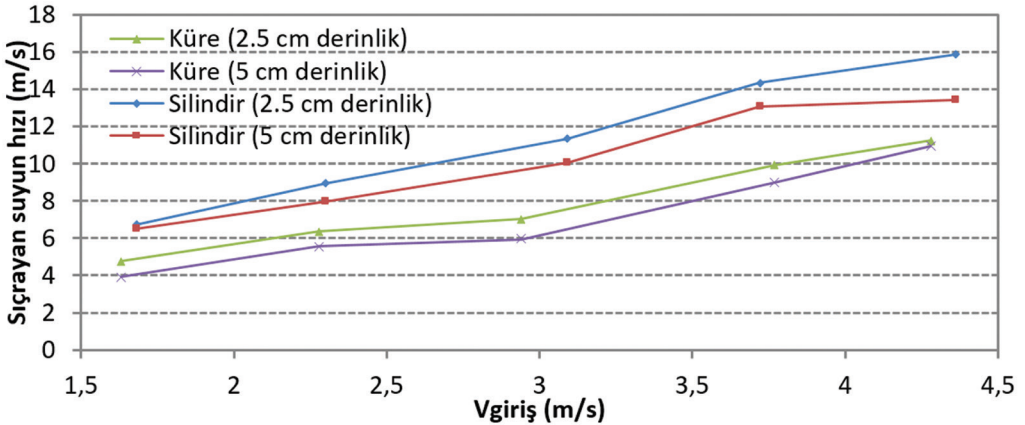
Şekil 3. Pileup (Yığıntı) Katsayısının Hesabında Kullanılan Parametreler

yükselen su miktarlarını karşılaştırmak için Korkmaz&Güzel [22] tarafından  $C_{pw} = (h_p * t_p) / A_p$  olarak boyutsuz bir pileup katsayısı tanımlanmıştır (Şekil 3). Bu katsayı cismin hemen etrafında deforme olup yükselen su kütlelerinin iki boyutlu düzlemdeki kalınlık ( $t_p$ ) ve yükseklik ( $h_p$ ) çarpımının, silindir deplasmanının yarısına olan oranından oluşur. Böylece suya farklı hız ve geometride giren cisimlerin ne kadarlık bir su kütlelerini deforme edip ne kadar uzağa itebildikleri, dolayısıyla ne kadarlık bir enerji transferi gerçekleştiği karşılaştırılabilmektedir.

Şekil 4’te silindir ve küre için ölçülen  $C_{pw}$  değerleri boyutsuz batma derinliğine ( $Ut/R$ ) göre gösterilmiştir. Silindirin pile-up katsayısı farklı giriş hızlarında derinlik arttıkça 0.12 civarında sabit bir değer gösterirken küreninki 0.09 mertebelerinde yine sabit bir değer göstermektedir.  $C_{pw}$  katsayısının tanımından ve Şekil 4’ten pileup içerisindeki su kütlelerinin cismin deplasmanı ile lineer olarak doğru orantılı olduğu söylenebilir. Bu da gösterir ki, aynı cismin farklı hızlarda girişlerinde oluşan yığıntıların cismin suya giren alanına oranı birbirine yakındır. Farklı yüksekliklerden suya giriş yapan cisimlerin özellikle başlangıç safhalarındaki katsayı farklılığı enerjinin sadece yığıntılarla değil aynı zamanda jet akışı ve sıçrayan suyla birlikte uzaklaşan su kütleleriyle de enerji



Şekil 4. Silindir (S1) ve Kürenin (K1) Farklı Yüksekliklerden Suyu Girişlerinde Oluşturdukları Pileup (Yığıntı) Katsayısı Değerleri



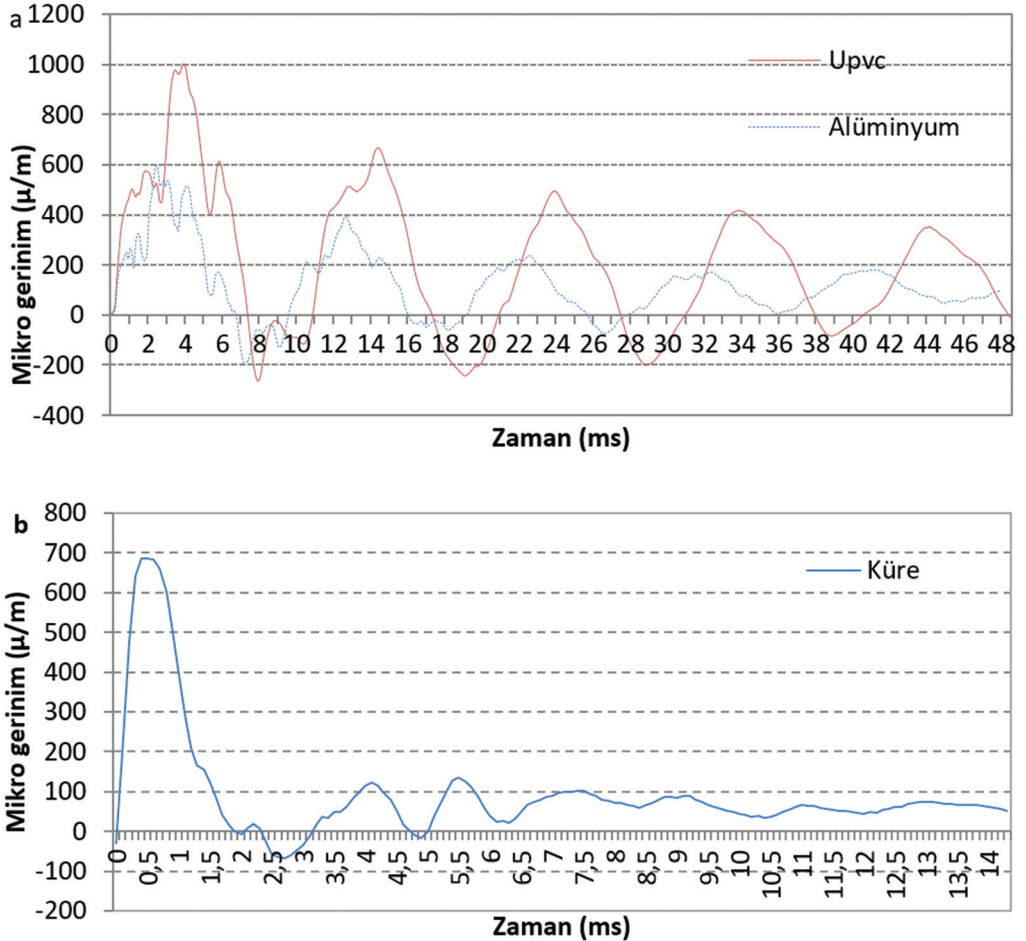
Şekil 5. Cisimlerin Suyu Girişi Sırasında Sıçrayan Suların Hızları

transferinden dolayı kaynaklanmaktadır. Yükseklik arttıkça cismin sahip olduğu enerji de cisme gelen çarpma kuvvetleri de artmaktadır. Suyu giriş sırasında daha yüksekten düşürülen cismin sahip olduğu yüksek kinetik enerji çarpma esnasında daha fazla miktarda ve daha yüksek hızda su sıçraması meydana getirmektedir. Şekil 5'te giriş hızına göre cismin iki farklı derinlik anına denk gelen ortalama sıçrayan su hızları gösterilmiştir. Beklenildiği gibi giriş hızı arttıkça sıçrayan suyun hızı da artmaktadır. Silindirde enerji transferi iki eksende sıçrayan suya aktarılırken, kürede bu olay üç eksende gerçekleşmektedir.

Test cisimlerinin suya girişleri esnasında maruz kaldıkları çarpma kuvvetlerini ölçmek için gerinim ölçer pullar kullanılmıştır. Genel olarak gerinim ölçerler elastik deformasyonu ölçerler. Bu deformasyon çarpma kuvvetiyle doğru orantılıdır ve çarpma yönünde maksimumdur. Bu yüzden çevresel gerinim çarpma kuvvetine bir analogi sağlamaktadır. Bu amaçla farklı elastisiteye sahip iki silindirin ve kürenin alt kısımlarının iç yüzeylerine çevresel yönde gerinim ölçerler yapıştırılmış ve dövünme sırasında maruz kalınan toplam kuvvetler ölçülmüştür. Şekil 6'da cisimlerin yaklaşık 4,36 m/s hızla suya girişleri esnasında ölçülen gerinim değerleri yalnız

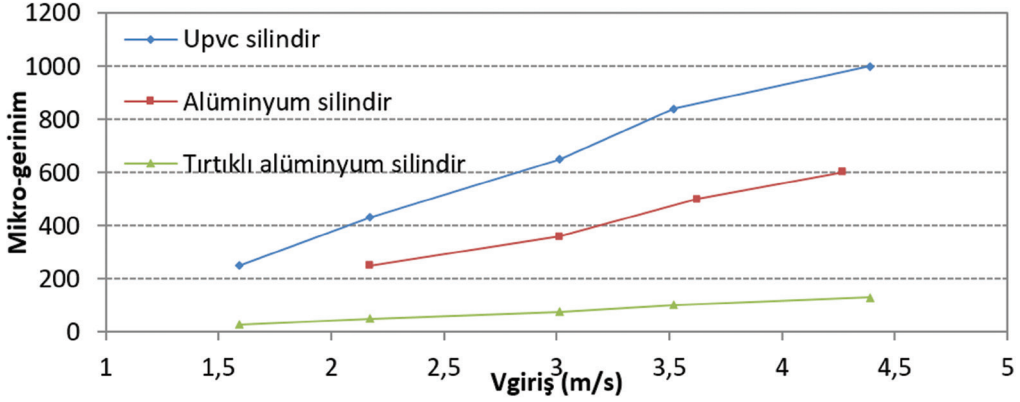
olarak gösterilmiştir. Gerinim değerlerinde gözlemlenen osilasyon cisimlerin esnekliklerinden kaynaklanmaktadır. Taşıyıcıyla birlikte silindirlerin doğal frekansı birbirlerine yakın olduğu için osilasyonların frekansı da benzerlik teşkil etmektedir. UPVC silindir suya girdikten yaklaşık 4 mili saniye sonra gerinim değeri tepe noktasına ulaşırken, alüminyum silindirde bu 2,2 mili saniye civarlarında gerçekleşmektedir. UPVC silindirinin merkezi ilk çarpma anından serbest su yüzeyi seviyesine ulaşmaya kadar üç osilasyon gözlemlenmekte ve peak gerinim değeri 1000'den 498'e inerken alüminyum

silindirde iki osilasyon gözlemlenmekte ve peak gerinim değeri 600'den 400'e inmektedir. Peak değere ulaşma süreleri ve silindir merkezlerinin su yüzeyine ulaşma süreleri oranlandığında birbirine yakın değerler çıkmakta bu da geometriden bağımsız olarak peak değerinin aynı açılmalı olarak uzunluğa denk geldiğini göstermektedir. Yani nispeten daha rijid olan alüminyum silindirde daha az sönümlenme meydana gelmektedir. Kürede ise daha rijid olan yapıyla maksimum kuvvet 0,5 mili saniyede tepe noktasına ulaşmakta ve çok daha az osilasyon yaparak sönümlenmektedir.



Şekil 6. a) UPVC ve Alüminyum Silindirlerin b) Akrilik Kürenin 1 m'den Suya Girişlerinde Ölçülen Yalın Gerinim Değerleri





Şekil 7. Silindirlerin Farklı Giriş Hızlarında Ölçülen Maksimum Gerinim Değerleri

Dövünme sırasındaki çarpma kuvvetlerini elde edebilmek için cisimlere monte edilen gerinim ölçerler düşme testleri sırasında ölçülen maksimum gerinim değerini vermektedir. Bu sebeple maksimum gerinim (maksimum çarpma kuvveti) giriş hızıyla doğru orantılıdır. Şekil 7'de bu ilişki üç farklı silindir (S1, S2, S3) için gösterilmiştir. Burada yüzeyi tırtıklı ve et kalınlığı daha fazla olan dolayısıyla daha rijid olan bir silindirin sonuçları da gösterilmiştir. Daha sonra statik sıkıştırma testleri yürütülerek cisimlere belirli yükler uygulanmış ve gerinim-kuvvet değişimi belirlenmiştir. Statik olarak elde edilen gerinim-kuvvet ilişkisi dövünme esnasında ölçülen gerinim değerlerini toplam çarpma kuvvetine dönüştürmek için kullanılmıştır.

Suya giren herhangi bir cisme etki eden çarpma kuvvetinin mevcut teorilere göre yapılan analitik hesabında giriş, cismin şekli bağımsız düz bir levha girişi olarak modellenmiş ve levha üzerindeki basınç dağılımının integrasyonu ile toplam kuvvet elde edilmiştir. Von Karman'ın yaklaşımında silindirin suya girişi sırasında çarpma kuvvetinin hesabı için düz plağın yarı genişlik,  $b(t)$  üzerindeki basınç dağılımının integrasyonu vasıtasıyla (Şekil 8) birim uzunluk başına etki eden kuvvet [15]:

$$F_l = \int_{-b(t)}^{b(t)} p_l(x, t) dx \quad (1)$$

olarak elde edilmiştir. Von Karman'ın yaklaşımında suyun deformasyonu hesaba katılmayıp  $x_{max}$  derinlik değeri,  $Ut$  ile elde edilmiştir.

$$x_{max} = \pm \sqrt{-4U^2t^2 + 2RUt} \quad (2)$$

Burada  $U$ , cismin hızını,  $t$ , geçen süreyi ifade etmektedir ve  $R$  silindir yarıçapıdır.

Bu durumda kuvvet değeri:

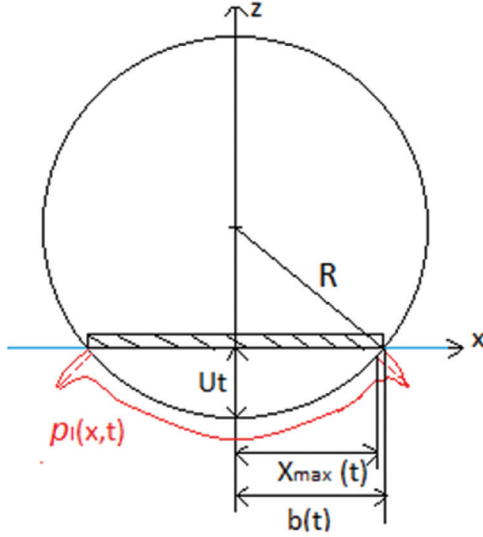
$$\begin{aligned} F_l &= \int_{-b(t)}^{b(t)} p_l(x, t) dx \\ &= \rho R U^2 \left[ 2 \arctan \left( \frac{\sqrt{1 - 2 \frac{Ut}{R}}}{\sqrt{2 \frac{Ut}{R}}} \right) + 2 \sqrt{2 \frac{Ut}{R} \left( 1 - 2 \frac{Ut}{R} \right)} \right. \\ &\quad \left. - 2 \sqrt{2 \operatorname{arctanh} \frac{Ut}{R} \left( 1 - 2 \frac{Ut}{R} \right)} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

olarak elde edilmiştir [15].

$$\text{Dövünme katsayısı; } C_s = \frac{F_l}{\rho R L V_{giriş}^2}$$

birim kuvvetin  $F_l$ , suyun yoğunluğu,  $\rho$ , silindirin yarıçapı,  $R$ , silindirin uzunluğu,  $L$  ve giriş hızının karesinin,  $V_{giriş}^2$  çarpımları sonucunda çıkan sonuca bölümü ile bulunur.

Von Karmanın yaklaşımı ile dövünme katsayısı,  $\lim_{t \rightarrow 0} C_s \text{ Von Karman} = \pi$  olarak elde edilir. Dövünme katsayısı silindirin ilk temasından sonra maksimum değere ulaştıktan sonra ilerleyen aşamalarda azalarak devam eder.



Şekil 8. Silindirin Suya Girişinde Von Karman'ın Yaklaşımı [15]

Wagner'in yaklaşımında ise suyun deformasyonu da hesaba katılır ve  $x_{max}$  değeri;

$$x_{max} = \pm 2\sqrt{-U^2t^2 + RUt} \quad (4)$$

olarak elde edilir. Değişen temas alanı neticesinde dövünme katsayısı;

$$C_s = \frac{F_l}{\rho R L V_{giriş}^2} = \lim_{t \rightarrow 0} C_s \text{ Wagner} = 2\pi \quad (5)$$

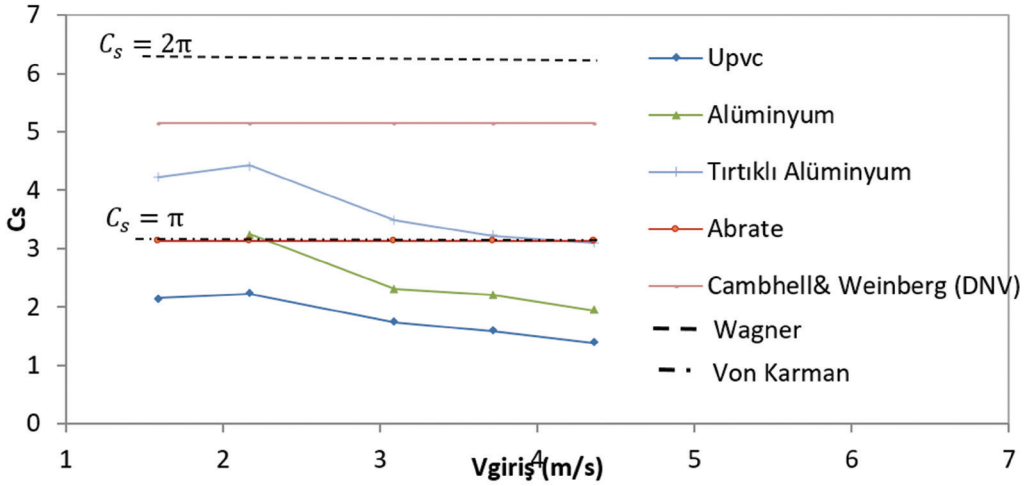
olarak ve yine başlangıçta maksimum ancak bu sefer Von Karman'ın değerinin iki katı olarak elde edilir [23].

Deneyler sırasında elde edilen maksimum çarpma (dövünme) kuvvetlerinin teoriyle karşılaştırılması dövünme katsayısı,  $C_s$  üzerinden Şekil 9'da gösterilmiştir. Daha elastik olan UPVC silindirde daha düşük dövünme değerleri elde edilirken daha rijid olan alüminyum

silindirlerde nispeten daha yüksek dövünme katsayısı değerlerine ulaşılmıştır. Bununla birlikte Şekil 7'de görüleceği üzere üç farklı silindirde de çarpma kuvveti giriş hızının artmasıyla artmaktadır. Ancak artış oranı üçünde de farklıdır. Momentum teorisine göre ise rijid cisimler için çarpma kuvveti,  $F_l$  ile giriş hızının karesi,  $V_{giriş}^2$  doğru orantılıdır [4, 5]. Yani  $V_{giriş}^2$  arttıkça  $F_l$  de aynı oranda artar, bu yüzden rijid cisimler için  $C_s$ , dövünme katsayısı giriş hızına göre değişmez. Wagner'in [5] çözümünde bu katsayı bütün giriş hızlarında  $2\pi$  iken, Von Karman'ın [4] çözümünde  $\pi$ 'dir. Rijid kabulü yapılan benzer analitik ve nümerik çalışmalarda da  $C_s$  değeri sabittir (Şekil 9). Esnek malzemelerde ise çarpma sırasında enerjinin bir kısmı absorbe edildiği için giriş hızı arttıkça çarpma kuvveti esnekliğe bağlı olarak daha az oranda artmaktadır. Şekil 7'de üç farklı esnekliğe sahip silindirin farklı hız-kuvvet (deformasyon) ilişkisi görülmektedir. Örneğin test edilen en düşük hızla en yüksek hız arasında 2.76 kat fark varken ( $V_{giriş}^2=7.6$ ) (rijid cisim kabulünde kuvvetin de 7.6 kat artması gerekirken) tırtıklı alüminyum silindirde max gerinim 4.6 kat artmakta iken nispeten daha esnek olan UPVC silindirde ise 4 kat artış gözlemlenmektedir. Buna göre esnek malzemelerde  $C_s$  değeri, teorinin aksine, artan hızla birlikte azalmaktadır (Şekil 9).

#### 4. Tırtıklı Yüzeyle Cisimlerin Suya Girişi

Serbest su yüzeyinde oluşan deformasyonun şekli ve miktarı giren cismin ne kadarlık bir kinetik enerjiye sahip olduğuna ve sahip olduğu bu enerjinin ne kadarlık bir kısmını suya transfer edebildiğine göre değişir. Eğer cisim ilk çarpma anından itibaren su içerisinde batıp ilerledikçe serbest su yüzeyindeki deformasyon az oluyorsa cisim enerjisini ayrılan su kütlesine fazla aktaramıyor ve enerjinin büyük kısmı kendi üzerinde kalıyor demektir. Bu durumda enerjinin ve momentumun korunumu gereği cisim

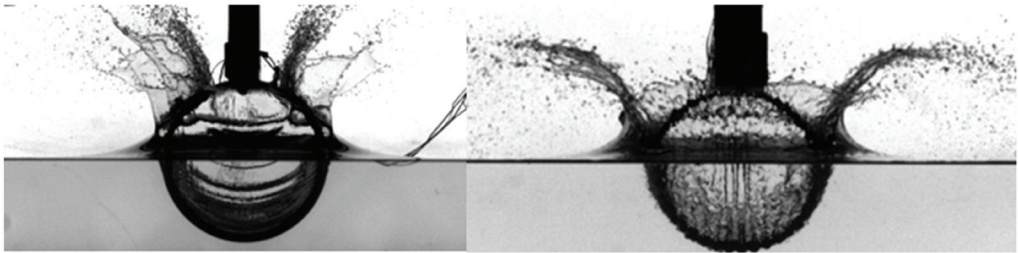


Şekil 9. Silindirlerin Farklı Giriş Hızlarında Hesaplanan Maksimum Dövünme Katsayıları

üzerinde ciddi çarpma yükleri meydana gelmektedir. Serbest su yüzeyinde meydana getireceği deformasyonu araştırmaya yönelik dış yüzeyi tırtıklı bir silindirin suya girişi de çalışılmıştır. Silindir yüzeyinin tırtıklı olması çarpma sırasında tırtıklar arasında hava sıkışmasına neden olmakta ve ıslak temas alanını azaltmaktadır. Şekil 10'da 15 cm'den serbest bırakılan tırtıklı ve pürüzsüz yüzeyli silindirlerin suya girişleri esnasında benzer aşamalardaki anlık fotoğrafları karşılaştırılmıştır. Resimlerden görüleceği üzere tırtıklı silindirin suya giriş esnasında oluşturduğu yığıntı ve sıçrattığı su miktarları daha fazla olmakta, yani başlangıçta hemen hemen aynı kinetik enerjiye sahip olmalarına rağmen cisimler suya girişlerinden itibaren farklı miktarlarda enerjilerini deforme olan suya aktarmaktadırlar. Dahası tırtıklı

silindirin arkasında kavite oluşurken pürüzsüz yüzeyli silindirin arkasında kavite oluşmamakta ve jet akışı silindirin yüzeyinden ayrılmadan yüzeyi takip ederek tepe noktasında kapanmaktadır. Kısaca pürüzsüz yüzeye nazaran tırtıklı silindirin daha az ıslak yüzeye sahip olması enerji transferi miktarının artmasına neden olmuştur.

Gemilerde dövünme ve sıvı çalkantısı kaynaklı kuvvetlerin etkisinin azaltılması gemi seyir performansını olumlu yönde etkileyeceğinden bu etkileri azaltmaya yönelik bazı çalışmalar yürütülmektedir. Örneğin Akyıldız&Ünal [24] tanktaki sıvı çalkantısını deneysel olarak çalışmışlar ve tank iç yüzeylerinde uyguladıkları perdeler sayesinde çalkantı esaslı basınç değerlerinde düşme olduğunu tespit etmişlerdir. Bu bağlamda tırtıklı yüzeylerin



Şekil 10. Pürüzsüz (Sol) ve Tırtıklı Silindirin 15 cm Yükseklikten Suyu Girişi

de çarpma kuvvetlerinin etkisini azaltması bu alanda pratik uygulamalara imkan vermektedir.

## 5. Sonuç

Bu çalışmada silindir ve küre şeklindeki cisimlerin suya girişleri çalışılmış ve çarpma kuvvetleri değişen geometri ve giriş hızlarına göre tespit edilmiştir. Gövde esnekliğinin suya giriş anında çarpma kuvvetlerini (dövünme) azalttığı gözlemlenmiştir. Suya giren cisimlerin hidrodinamiği kinetik enerji transferi açısından incelenmiş, deforme ettikleri su miktarları karşılaştırılmış ve aynı zamanda ıslak yüzey alanını azaltıcı uygulamalar denenerek tırtıklı yüzeye sahip silindirlerin suya girişi ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, suya giriş anında daha fazla kinetik enerji transferi gerçekleştiğinde cisimlerin daha az çarpma etkilerine (dövünme) maruz kaldığı tespit edilmiştir. Bu tür uygulamalar gemilerde gerçekleştirildiğinde daha az bölgesel hasarlar meydana gelecek, yorulma hasarları azalacak, daha konforlu seyahatler daha hızlı ve daha az yakıt harcanarak gerçekleştirilebilecektir.

## Teşekkür

Bu araştırma finansal olarak Yıldız Teknik Üniversitesi BAP koordinatörlüğü tarafından (Proje no: 2013-10-01-KAP03) desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Faltinsen, O. M. (1990). Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge University Press, Cambridge.
- [2] Faltinsen, O. M. (2005). Hydrodynamics of high-speed marine vehicles. Cambridge University Press, New York.
- [3] Willis, M.E., Dalzell, R.G., Kline, R.G., Maclean, W.M., Townsend, H.S., Ochi, M.K., Ochi, M.D. (1994). Technical and Research Bulletin 2-30: Notes on Ship Slamming, Panel HS-2, Impact Loading and Response, The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [4] Von Karman (1929). The impact on sea plane floats during landing, Tech. Report 321, NACA.
- [5] Wagner, H. (1932). Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces, translation of "Über stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten", Zeitschrift für Angewandte Mathematik Und Mechanik. 12(1): 193-215.
- [6] Zhao, R. and Faltinsen, O.M. (1993). Water Entry of Two-dimensional Bodies, Journal of Fluid Mechanics, 246(1):593-612.
- [7] Mei, X., Liu, Y., Yue, D.K.P. (1999). On the water impact of general two-dimensional sections, Journal of Applied Ocean Research, 21(1):1-15.
- [8] Chuang, S. (1967). Experiments on Slamming of Wedge- Shaped Bodies, J. of Ship Research, 11: 190-198.
- [9] Engle, A., Lewis, R. (2003). A comparison of hydrodynamic impacts prediction methods with two dimensional drop test data, Marine Structures, 16: 175-182.
- [10] Yettou, E. M., AD, A., Champoux, Y. (2006). Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge, Fluid Dynamics Research, 38(1):47-66.
- [11] Lewis S. G., Dominic A Hudson, Stephen R Turnock and Dominic J T. (2010). Impact of a free falling wedge with water: Synchronized visualization, pressure and acceleration measurement, Fluid Dyn. Res. 42(3): 035509(30pp).
- [12] Cointe, R. and Armand, J.L., (1987). Hydrodynamic impact analysis of a cylinder, J. Offshore Mech. Arct. Eng. 109(3): 237-243.

- [13] Panciroli, R., Shams, A., Porfiri, M., (2015). Experiments on the water entry of curved wedges: High speed imaging and particle image velocimetry, *Ocean Engineering*, 94(1):213-222.
- [14] Peseux, B., Gornet, L., Donguy, B. (2003). Hydrodynamic impact: Numerical and experimental investigations, *Journal of Fluids and Structures*, 21(1): 277-303.
- [15] Van Nuffel, D. (2014). Experimental Study of the Slamming Induced Pressures, Forces and Deformations of Quasi-Rigid and Deformable Bodies during Vertical Water Entry, Ph.D. Thesis, Ghent University, Belgium.
- [16] Faltinsen, O.M., (1997). The effect of hydroelasticity on ship slamming, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 355: 575-591.
- [17] Bereznitski, A. (2001). Slamming: The role of hydroelasticity, *Int. Shipbuild. Prog.*, 48(4): 333-351.
- [18] Faltinsen, O.M., (2000). Hydroelastic Slamming, *J. Marine Science Technology*, 49-65.
- [19] Cooper, M., McCue, L., (2011). Experimental study on deformation of flexible wedge upon water entry, 9th Symposium on High Speed Marine Vehicles, May, Naples, Italy.
- [20] Panciroli, R., Abrate, S., Minak, G., Zucchelli, A., (2012). Hydroelasticity in water-entry problems: Comparison between experimental and SPH results, *Composite Structures*, 94: 532-539.
- [21] Panciroli, R., Ubertini, S., Minak, G., Jannelli, E., (2015). Experiments on the dynamics of flexible cylindrical shells impacting on a water surface, *Experimental Mechanics*, 55, 1537-1550.
- [22] Korkmaz F. C. and Guzel B. (2017). Water entry of cylinders and spheres under hydrophobic effects; Case for advancing deadrise angles. *Ocean Engineering* 129(1): 240-252.
- [23] Abrate, S., (2013). "Hull slamming". *Appl. Mech. Rev.* 64(6):1-35.
- [24] Akyildiz H. and Unal E. (2014). Dönme Hareketi Verilen Rijit Silindirik Bir Tankta Sıvı Çalkantısının Deneysel İncelenmesi. *Journal of ETA Maritime Science* 2(2): 131-142.