

# Dairesel Silindirlerin Girdap Kaynaklı Titreşimlerine Serbest Su Yüzeyi Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

Aytekin Duranay

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

aytekin.duranay@ikc.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9551-3508

## ÖZET

Girdap kaynaklı titreşimler (GKT), çeşitli yapı tiplerinde, açık deniz yapılarından durağan ve yüzen platformlara kadar, lineer olmayan bir akış-yapı etkileşimi fenomeni olarak karşımıza çıkmakta ve bu durum genellikle yapısal hasara ve istikrarsızlığa neden olmaktadır. Ancak, son yıllarda yapılan bazı GKT çalışmaları, fenomeni doğrudan yenilenebilir enerji üretimi için kullanmaya ya da çeşitli şekillerde yararlanmak amacıyla cihazlar geliştirmeye odaklanmıştır. Bu çalışmada, GKT'nin hem yıkıcı-tahrip edici özelliklerinden kaçınmaya hem de fenomenden yararlanmayı amaçlayan araştırmaların sıklıkla karşılaştığı ortak problemlerden biri olan serbest su yüzeyi etkisini yüksek Reynolds sayılarında inceleme amaçlanmıştır. Bu amaçla, serbest yüzeye yakın bir konumda bulunan dairesel bir silindirin GKT'si üzerine yapılan deneysel ve sayısal araştırmaların bulguları sunulmakta ve tartışılmaktadır. Çalışmada öncelikle, serbest su yüzeyinden yeterince uzakta konumlandırılan bir silindirin GKT performansı deneysel olarak verilmiştir. Ardından aynı silindir kademeli olarak yüzeye yaklaştırılmış ve sonunda sakin suda silindir üst noktası serbest su yüzeyi hizasında olacak şekilde konumlandırılmıştır. Serbest su yüzeyinden yeterince uzakta olduğu koşulda en yüksek genlik ürettiği kenetlenme durumundaki kütle oranı, yay sabiti, Reynolds sayısı gibi deneysel parametreler sabit tutularak sadece su içindeki derinliği değiştirilmiş ve her yeni koşul için hareketli silindir etrafındaki akış özelliklerine ve GKT performansına izahat getirilmiştir. Çalışma, serbest yüzey etkisi altında GKT hareketi gözlemlenen dairesel silindirin salınım genliğinin, frekansının ve faz farkının su içindeki derinliğine bağlı olarak kontrol edilebileceğini ve düzenlenebileceğini göstermektedir. Bu bulgular, açık denizde yerleştirilen rüzgâr türbinleri, dalga enerjisi üreteçleri, hidrojen ve güneş enerjisi tesisleri gibi birçok potansiyel uygulamanın daha güvenli ve uzun ömürlü olmasına sağlamasına katkı sağlayacak niteliktedir. Çalışmada, tercih edilen deneysel ve sayısal yöntemler, parametrik analiz ve ana sonuçlar detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Girdap kaynaklı titreşimler, dairesel silindir etrafında akış, serbest yüzey etkisi.

**Makale geçmişi:** Geliş 25/03/2024 – Kabul 17/04/2024

<https://doi.org/10.54926/gdt.1458453>

# Experimental and Numerical Investigation of Free Surface Effect on Vortex-Induced Vibrations of Circular Cylinders

Aytekin Duranay

Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Izmir Kâtip Çelebi University, Izmir, Türkiye

aytekin.duranay@ikc.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9551-3508

## ABSTRACT

Vortex-induced vibrations (VIV) occur as a nonlinear flow-structure interaction phenomenon on various types of structures, ranging from offshore structures to stationary and floating platforms. VIV phenomenon usually leads to structural damage and instability. However, recent studies have focused on harnessing this phenomenon directly for renewable energy generation or developing devices for various purposes. In this study, effects of free surface conditions were examined on VIV at high Reynolds numbers—a common challenge faced by researches aiming both to avoid the destructive effects or harnessing the benefits of VIV. To achieve this, the findings of experimental and numerical investigations on the VIV of a circular cylinder located near the free surface are presented. Initially, the VIV performance of a cylinder positioned sufficiently far from the free surface was experimentally measured. Subsequently, the same cylinder was gradually brought closer to the surface until its uppermost point aligns with the still free water level. While keeping experimental parameters such as mass ratio, spring stiffness, and Reynolds number constant for the condition where the cylinder produced the highest oscillation amplitudes, only the water depth was gradually altered. The flow characteristics around the moving cylinder and its VIV performance under each new condition have been interpreted. The study demonstrates that the oscillation amplitude, and frequency of the circular cylinder experiencing VIV under free surface effects can be controlled and adjusted based on the water depth. These findings have implications for various potential applications, including offshore wind turbines, wave energy converters, hydrogen production, and solar energy facilities, making them safer and more sustainable in open sea environments. In the study, the proposed experimental and numerical methods, parametric analyses, and main results are presented in detail.

**Keywords:** Vortex-induced vibrations, flow around a circular cylinder, free surface effect.

**Article history:** Received 25/03/2024 – Accepted 17/04/2024

## 1. Giriş

Küt bir cisim belirli Reynolds sayıları üzerinde akışa maruz kaldığında, cismin etrafında girdaplar oluşmaya ve periyodik olarak kopmaya başlayacaktır (Zdravkovich, 2003). Bu girdaplar, dönen akışkan hareketinin iz bölgelerinde çıplak gözle dahi gözlemlenebilmektedir. Koparak cisim üzerinden ayrılan girdaplar, ayrıldıkları yüzeyde basınç farklılıkları meydana getirmekte ve bunun sonucunda akışa dik eksenin her iki yönünde zamanla değişen kuvvet farkları oluşturmaktadır. Periyodik olarak etkiyen bu kuvvetler neticesindeki cisim titreşime zorlanmaktadır. Tam bu noktada, cismin doğal frekansı ile üzerinde kopan girdapların frekansı arasındaki ilişki önem arz etmektedir. Elastik bir cismin doğal frekansı değerleri yakınında GKT hareketi göstermesi durumunda bir “*senkronizasyon bölgesi*”nden bahsetmek mümkün hale gelmektedir. Senkronizasyon bölgesi içinde bu titreşimlere maruz kalması durumunda salınım genlikleri gözle görünür biçimde artmakta ve bölge içinde rezonansa girdiği noktada bu genlikler genellikle en yüksek değerine ulaşmaktadır. Girdap kaynaklı titreşimler (GKT) olayında bu özel duruma “*kenetlenme (lock-in)*” adı verilir (Kınacı, 2016a).

GKT olayı yapılarda tahribe, yorulmaya ve diğer yapısal bozulmalara neden olmaktadır. 1940 yılında Washington Tacoma Narrows Bridge ismiyle bilinen ve kendi döneminde dünyanın en büyük asma köprülerinden biri olan yapı üzerinde meydana gelen salınımlar yıkılma ile sonuçlanmış ve o tarihlere bu yıkımın sebepleri net olarak ortaya konamamıştır. Hadisenin GKT nedeni olduğu ise ancak birkaç on yıl sonra Feng (1968)'in ortaya koyduğu bulgular ışığında anlaşılabilmiştir. Feng (1968), küt cismi temsilen dairesel bir silindir kullanarak rüzgâr akışına maruz bırakmış ve kenetlenme halinde bu silindirin kendi çapından büyük salınım genliği ürettiğini gözlemlemiştir. Literatürde öncü çalışmalardan kabul edilen bu deney sonuçları sonrasında köprü, açık deniz yapıları, gökdelen, baca, ısı eşanjörleri, deniz tabanındaki kablolar gibi akışa dik yönde maruz kalan küt geometri mühendislik yapıları üzerine GKT araştırmaları önem kazanmış ve yapı dinamiği hesaplamaları içindeki yerini almaya başlamıştır.

GKT çalışmaları üzerine yapılan deneysel ve sayısal hesaplamalarda küt cisim olarak genellikle dairesel bir silindir tercih edilmektedir. Sabit bir silindir etrafındaki akış karakteristikleri ve iz bölgesi yapıları Sumer & Fredsoe (1997) ve Zdravkovich (2003) tarafından detaylıca tartışılmıştır. Sabit silindire benzer mühendislik yapıları üzerinde levha sarmalı (helical fairings) ve karenajları (strakes) gibi mekanik uygulamalar kullanılarak yapı üzerindeki girdap oluşumu veya girdap kuvvetlerinin periyodik olarak yapıya etki etmesi azaltılmaya çalışılmaktadır (Schulz & Kallinderis, 2000). İnşası planlanan bir yapının GKT'den etkilenmesini en aza indirebilmek için öncelikle fenomenin bağlı olduğu parametrelerin irdelenmesi gerekmektedir. Akış hızı ( $U$ ), akış kaynaklı titreşimlere maruz kalan yapının çapı ( $D$ ), uzunluğu ( $L$ ) ve ağırlığı ( $m$ ), taşıdığı akışkanın yapı ağırlığına oranı (kısaca kütle oranı:  $m^* = m_{osc}/m_d$ ), yapının yay sabiti ( $k$ ) ve blokaj oranı ( $BO$ ) gibi parametreler silindir etrafındaki akışın özellikleri ve yapı dinamiği üzerinde mutlak rol oynamaktadır. Bu parametrelerin değiştirilmesi ile GKT'nin senkronizasyon bölgesinin genişletilmesi ya da daraltılması, salınım genliklerinin artırılıp azaltılması ve de kenetlenme olayının açığa çıkarılması mümkündür.

Geçtiğimiz son 15 yıla kadar GKT çalışmalarının sıklıkla araştırdığı yıkıcı-tahrip edici özelliklerinin aksine son yıllarda yapılan bazı icatlar ve prototip modeller ile bu fenomenden yararlanılabileceği ispatlanmıştır. 2005 yılında Bernitsas & Raghavan tarafından patentlenen VIVACE isimli dönüştürücü sayesinde akışa dik yöndeki GKT hareketine elastik yaylar ile izin verilen dairesel bir silindirin titreşimlerinden elektrik enerjisi elde etmeyi başarması ile fenomene olan bakış açısı değişmiş ve ilgi artmıştır (Bernitsas & Raghavan, 2005). Başka bir çalışmada geleneksel GKT düzeneği tasarımından farklı olarak silindire bağlı yaylar yerine kullanılan akışa paralel levhanın elastikliğinden faydalanılmış ve piezoelektrik malzeme kullanılarak elektrik enerjisi üretilmiştir (Akaydın vd., 2010). 2013 yılında ise

dairesele bir silindirin GKT hareketinin frekansından yola çıkarak meskenlerde kullanılan suyun debi ölçümünü efektif olarak yapan bir alet geliştirilmiştir (Lakka, 2013). Dört farklı GKT düzeneği ile piezoelektrik malzeme kullanılarak elektrik üreten bir başka çalışmanın bulguları Dai vd. tarafından 2016 yılında paylaşılmıştır. 2020 yılında ise tek serbestiyet dereceli dairesele bir silindir–elastik yay kullanılan GKT düzeneği marifeti ile üretilen mekanik enerjiden tarımda sulama için kullanılabilir ve kendi kendini tahrik eden pompa tasarlanarak patentlenmiştir (Kınacı & Gökçe, 2020).

Bu çalışmada, Türkçe kaynakların sınırlı olması sebebiyle GKT üzerinde yeterli ilginin gösterilememesi sorununu aşmak amacıyla, fenomenin fiziksel izahatını yapmak ve aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılabilirliğini artırmak için sığ sularda karşılaşılan serbest su yüzeyi etkisi gibi problemler ele alınmıştır. Çalışmanın deneysel kısmında, İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deneysel Laboratuvarında yer alan sirkülasyon kanalı üzerine kurulu ve 2022 yılında restore edilerek dairesele silindirler etrafında girdap kaynaklı titreşim deneylerini çok daha düşük ağırlıklarda yapmaya olanak tanıyan yeni deneysel mekanizması kullanılmıştır. Yapılan deneysel testlere ek olarak üç boyutlu simülasyonlardan yararlanılmıştır. Sığ sularda elektrik üretimi, su pompası tahriki gibi enerji üretimi hedefleyen çalışmalarda karşılaşılan serbest su yüzeyi etkisini irdelemek için modellemede kullanılan dairesele silindir ile serbest su yüzeyi arasındaki mesafe değiştirilerek üç farklı senaryo oluşturulmuştur: serbest su yüzeyi etkisinden yeterince uzakta konumlandırılan dairesele silindir, serbest su yüzeyi etkisinde üç farklı derinlikte dairesele silindir koşulu ve sakin sudaki serbest yüzeye temas eden dairesele silindir. Bu senaryolarda dairesele silindir etrafındaki akışın özellikleri tartışılmış ve iz bölgesindeki girdap yapılarının GKT hareketi üzerindeki rolü gözlemlenmiştir. Çalışmada iz bölgesindeki girdap yapılarını incelemeye oldukça başarılı olan Detached Eddy Simülasyonu (DES) yöntemi kullanılmış, GKT hareketinin simülasyonu için ise STAR CCM+'da yer alan Dinamik Akışkan–Yapı Etkileşimi (Dynamic Fluid Body Interaction, kısaca DFBI) yönteminden yararlanılmıştır.

## 2. Girdap Kaynaklı Titreşimlerin Bağlı Olduğu Başlıca Parametreler ve Fiziksel İzahatı

Küt bir cisim etrafında girdap oluşumu, başta akışkan özellikleri olmak üzere cisim ile akışkan arasındaki uzaysal ve zamansal etkileşime bağlıdır. Örneğin, hareketsiz dairesele bir silindir üzerindeki akışı ele aldığımızda, silindirin çapı ( $D$ ), akışkanın hızı ( $U$ ) ve yoğunluğu ( $\rho$ ), akışkanın dinamik viskozitesi ( $\mu$ ) ya da kinematik viskozitesi ( $\nu$ ) ile Reynolds sayısı ( $Re$ ) hesaplanır. Bu Reynolds sayısına bağlı olarak akışkanın cisim üzerinde tek–çift yönlü girdap kopmaları oluşturup oluşturmayacağı, sınır tabakanın türbülanslı olup olmayacağı hakkında tahminde bulunmak mümkündür.

### 2.1 Akış Hızı, Silindir Çapı ve Reynolds Sayısı

Reynolds sayıları tarafından belirlenen akış rejimi sınırları ve karşılık gelen sınır tabaka ve akış özellikleri, Tablo 1'de verildiği gibi alt bölümlere ayrılmıştır (Martins & Avila, 2019).

$$Re = \frac{\rho DU}{\mu} = \frac{DU}{\nu} \quad (1)$$

Okyanus yataklarından doğal kaynak rezervlerini su yüzeyine doğru taşımada kullanılan çıkış boruları (riser) ve seren, denizde petrol ve doğalgaz arama ve çıkarmada kullanılan açık deniz yapılarının ayakları gibi gemi inşaatı ve denizcilik yapılarına etkiyen dış akışlar genellikle kritik-altı akış rejimindeki TrSL2 ve TrSL3 (Transition Shear Layer: Geçiş Kayma Tabakası) aralığına denk gelmektedir (Rahman, 2015). Bu yapıları dairesele bir silindir ile temsil ettiğimiz zaman Şekil 1'de görüldüğü üzere stagnasyon noktası civarında ikiye ayrılan akım, silindirin altında ve üstünde kayma tabakaları meydana getirecek,

bu kayma tabakaları silindir üzerinde bir süre yol aldıktan sonra cisim üzerinden koparak yoluna devam etmek isteyecektir. Bu noktada, silindirin altında ve üstünde, başta Reynolds sayısı olmak üzere akışın anlık özelliklerine göre silindir merkezine göre belirli açılarda silindir üzerinden ayrılmaya başlayacaktır. Kayma sınır tabakasının silindire temas eden yüzeyinin kopmak istememesi, silindir aftında (arkasında) negatif basınç oluşumu nedeniyle kayma tabakasındaki akışın bir kısmının yön değiştirerek yeniden silindire doğru hücum etmesi gibi nedenler ile girdaplar oluşacaktır. Cismin simetrik olduğu göz önüne alındığında, bu girdapların alttan ve üstten birbirini takip ederek kopacağını tahmin etmek zor değildir. Bütün bu yapı-sıvı etkileşimi neticesinde silindir üzerinde çift yönlü kuvvetler oluşacak ve bu da cismi titreşim yapmaya zorlayacaktır. Eğer silindir rijit bir bağlantı ile sabitlenmemiş ise, başka bir deyişle akışa dik yönde elastik serbestlik verilmiş ise, girdap kopmalarından kaynaklanan kuvvetler cisimde salınımlara neden olacaktır.

**Tablo 1.** Reynolds sayısı aralıkları ve bunlara karşılık gelen dairesel silindirler etrafındaki akış karakteristikleri.

| Reynolds Sayısı                              | Akış Rejimi | Özelliği  |
|--|-------------|---|
| Laminer Rejim                                |             |   |
| $Re < 1$                                     |             | Sürüklenen Akış (Creeping Flow)                       |
| $3 - 5 < Re < 30 - 40$                       | L           | Durağan Ayrılma (Steady separation)                   |
| $30 - 40 < Re < 150 - 300$                   | L           | Periyodik laminer dökülme                             |
| Kritik-altı Rejim                            |             |   |
| $150 - 200 < Re < 200 - 250$                 | TrW1        | İz bölgesinde Laminer Girdaptan Geçiş                 |
| $200 - 250 < Re < 350 - 500$                 | TrW2        | Düzensiz Girdap Oluşumuna Geçiş                       |
| $350 - 500 < Re < 1 - 2 \times 10^3$         | TrSL1       | Serbest kayma tabakasında geçiş dalgalarının gelişimi |
| $1 - 2 \times 10^3 < Re < 1 - 2 \times 10^4$ | TrSL2       | Serbest Kayma Tabakasında Girdap Oluşumu              |
| $1 - 2 \times 10^4 < Re < 1 - 2 \times 10^5$ | TrSL3       | Tamamen Türbülanslı Kayma Tabakası                    |
| Kritik Rejim                                 |             |   |
| $1 - 2 \times 10^5 < Re < 3.1 \times 10^5$   | TrS0/TrBLO  | Ayrılma Noktasındaki Geçişin Başlangıcı               |
| $3.1 \times 10^5 < Re < 3.4 \times 10^5$     | TrS1/TrBL1  | Tek Ayrılma Balon Rejimi                              |
| $3.4 \times 10^5 < Re < 3.8 \times 10^5$     |             | Kararsız Bölge  |

## 2.2 Kütle, Sönüm Katsayısı ve Yay Sabiti

Tek serbestlik derecesinde  $k$  rijitliğindeki elastik yaylar ve  $c$  sönüm katsayısı ile  $y$  yönünde titreşimine izin verilen  $m$  kütleli bir GKT silindirin titreşimini Denklem 2 ile verilen zorlanmış titreşim ifadesi ile temsil etmek mümkündür.

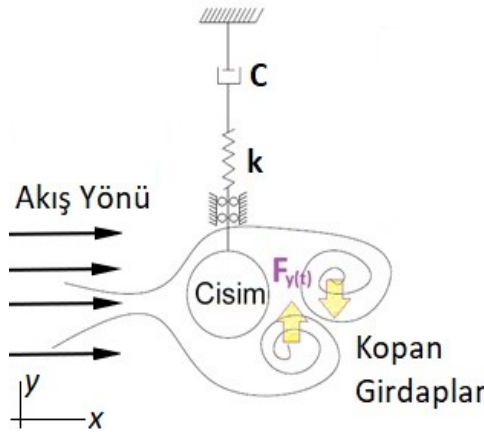
$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_y(t) \quad (2)$$

Bu denklemde doğal frekans  $\omega_n = \sqrt{k/m}$  ve kütsüz sönüm parametresi  $\gamma = c/m$  yerine konursa Denklem 3 elde edilir.

$$\ddot{y} + \gamma\dot{y} + \omega_n^2 y = F_y(t) \quad (3)$$

Hareket denkleminde tanımlanan doğal frekansın ve girdap kopmaları neticesinde oluşarak zamana bağlı olarak büyüklüğü ve yönü değişen  $F_y(t)$  ifadesinin frekansının birbirine yakın olduğu durumlarda titreşimin senkronizasyon bölgesinde olduğu, birbirine eşit olduğu durumlarda da kenetlenme olayının ortaya çıktığı bilinmektedir. Bu noktadan hareketle, bir GKT çalışmasında şayet tasarımı yapılacak

mühendislik yapısının en kötü durum senaryosu (worst-case scenario) incelenmek isteniyorsa kenetlenmeyi de içine alan ve senkronizasyon bölgesinin en tehlikeli alanı olarak bilinen “üst dallanma” aralığı ayrıntılı olarak incelenmelidir. Taşırılan akışkanın ağırlığı (displaced-fluid-mass)  $m_d \gg 1$  olduğu hava ortamında senkronizasyon aralığında genellikle başlangıç dallanması (initial-branch) ve üst dallanma (upper-branch) olmak üzere iki dallanma görülür. Su gibi yüksek öz-kütleyle sahip bir akışkan ortamında GKT gözlemlenirken düşük ve orta Reynolds sayılarında bu senkronizasyon bölgelerine ilaveten üçüncü bir dallanma türü olan alt dallanma (lower-branch) gözlemlenir.

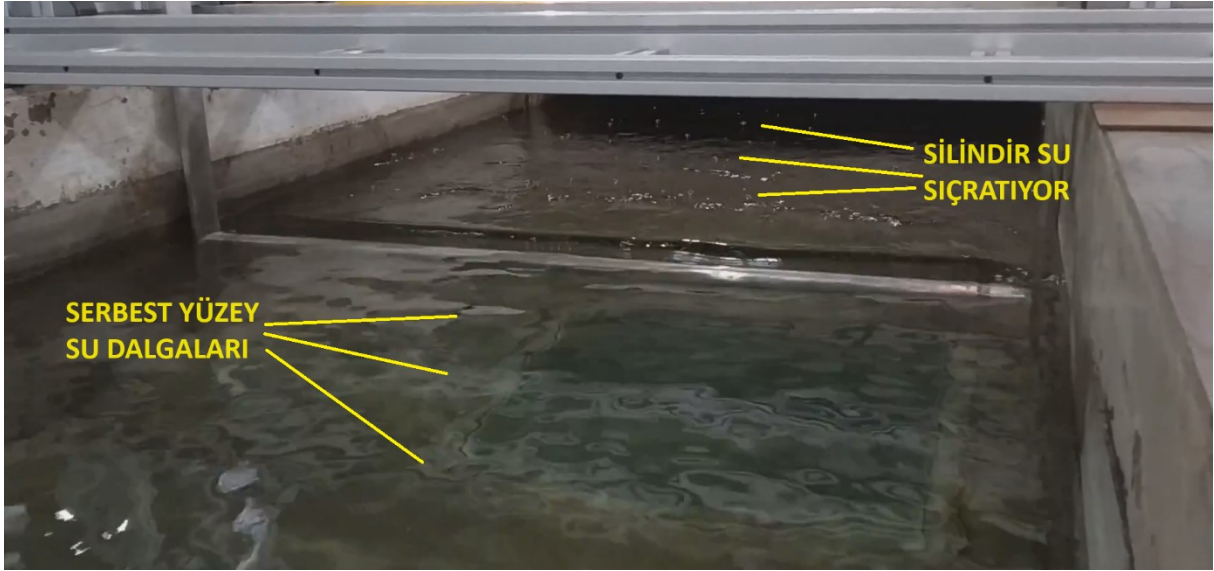


**Şekil 1.** Girdap kopmalarından kaynaklanan kuvvetlerin cismi titreşime zorlaması

GKT olayından faydalanmayı hedefleyen çalışmalarda, hareket denkleminde faydalanılarak doğal frekansların matematiksel yöntem ile tespit edilmesi ve ardından girdap kopma frekanslarına yakın çalışma koşulları oluşturularak senkronizasyon aralığındaki üst dallanma bölgesi incelenmelidir. Bu hesaplamalarda sabit silindir etrafında akış problemlerinin incelendiği Fredsoe & Sümer (1997), Yüksel (2011) gibi kaynaklarda farklı akış hızlarında ve bu akış hızlarına karşılık gelen Reynolds sayılarında girdap kopmalarını veren Strouhal ( $St$ ) sayısından yararlanılabilir.

### 2.3 Serbest Su Yüzeyi Etkisi ve Boşluk Katsayısı

Dairesel silindirin içinde bulunduğu akışkan ile hava arasındaki sınır görevini gören serbest su yüzeyi, GKT dinamiğinde daha fazla karmaşıya sebebiyet vermesi kaçınılmazdır. Açık deniz yapılarında GKT'ye serbest su yüzey etkisi ile birlikte maruz kalan mühendislik yapılarının dayanım ve ömür hesaplamalarında bu iki etki birlikte incelenmelidir. Serbest su yüzeyinin mevcudiyeti, su içinde akışa maruz kalan küt cisimler üzerindeki akış desenini önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca bu etki, serbest su yüzeyi yakınındaki akış hızı ve basınç gradyanını da değiştirmektedir. Bu şartlarda periyodik olarak alttan ve üstten kopması gereken girdaplar için üst sınır tabakanın tahrip olması ya da hiç oluşmama riski vardır. Bütün bunlara ek olarak, serbest yüzeye yakın tarafta yeterince alan olmaması, serbest yüzey gerilimi ya da su jetlerinin oluşumundan kaynaklanan yeni kuvvetlerin de aktif rol oynaması gibi (Reichl vd., 2005) sebepler girdapların oluşumunu kısmen ya da tamamen engelleyerek sadece alt sınır tabakadan kopmasına neden olmaktadır. Bütün bu etkiler, şüphesiz yay-silindir sisteminin doğal frekansını ve sönümünü de değiştirecektir. Yüzeyden yeterince derinde konumlandırılan dairesel bir silindire akışkandan GKT vasıtasıyla geçen enerjinin bir kısmı, silindirin yüzeye yakın konumlandırılması durumunda, su sıçratma ve serbest su yüzeyinde dalga oluşturmaya harcanacaktır. Silindirin oluşturduğu bu dalgalar hiç şüphesiz kendi GKT hareketini de etkileyecek böylece zaten ancak doğrusal olmayan denklemler ile tanımlanabilen fiziksel olgunun izahatı daha da karmaşık bir hal alacaktır.



**Şekil 2.** İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında yer alan sirkülasyon kanalında GKT'ye maruz bırakılmış dairesel bir silindirin serbest su yüzeyi etkisindeki hareketi.

Şekil 2'de örnek olarak verilen serbest su yüzeyine yakın konumlandırılan dairesel silindirin üst noktası ile yüzey arasındaki mesafe  $h$  (m), silindir çapı  $D$  (m) olmak üzere boyutsuz boşluk oranı (gap ratio)  $h^* = h/D$  ile ifade edilmektedir. Çalışmadaki Froude sayısı ( $Fr$ ) ise serbest su yüzeyi ile silindirin üst noktasındaki boşluk oranına bağlı olarak hesaplanmıştır. Tahmin edileceği üzere oranı  $h^*$  arttıkça serbest su yüzeyi etkileri azalacaktır. Ancak bu etkinin azalıp artmasının GKT hareketine etkisinin doğru orantılı olup olmadığı söylemek ancak sayısal ve deneysel testler ile mümkün olacaktır. Boşluk oranının azaldığı ve sonunda silindirin serbest su yüzeyine temas ettiği noktadan itibaren negatif  $h^*$  değerlerinden söz etmek mümkün olmakla birlikte, çalışmada sakin su yüzeyindeki silindirin serbest su yüzeyi deldiği bir koşul incelenmemiştir. Kısaca, GKT hareketi üzerindeki rolü açısından serbest su yüzeyi etkisi incelenmek istendiğinde,  $h^*$  önemli bir parametre olarak anılacaktır.

### 3. Model Kurulumu

Çalışmanın iki ana bölümüne ait bulgular, deneysel testler ve simülasyonlar, GKT olayında üretilen indirgenmiş genlik ve frekans değerlerini bulmakta ve bu değerlerin genel hatları ile literatüre uyumluluklarına çift denetim sağlamaktadır. Ayrıca doğru sonuçlar üreten bir simülasyon modellenmesi sağlanması, ileride yapılması planlanan GKT analizlerinin düşük maliyetli ve daha hızlı olmasını sağlayacaktır. Bütün bunlara ek olarak, iz bölgesindeki akış ve girdap yapılarını simülasyonlar aracılığı ile irdeleyebiliyor olmamız, deneysel olarak oldukça maliyetli ve erişiminde güçlük yaşadığımız PIV (Particle Image Velocimetry) ekipmanının olmayışının eksikliğini büyük ölçüde azaltmaktadır.

#### 3.1 Deney Mekanizması

Deneyel araştırma, İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında yer alan sirkülasyon kanalı üzerine kurulu GKT deney mekanizması ile gerçekleştirilmiştir. Sirkülasyon kanalı, bir adet elektrik motoru, pervane ve  $rpm$  (dakikadaki devir sayısı) kontrol paneli içermektedir. Kanaldaki suyun akış hızı ( $U$ ),  $rpm$  değerlerine bağlı olarak tarafımızca 2019 yılındaki renevasyon sonrası kalibre edilmiştir. Sirkülasyon kanalında yaklaşık  $43m^3$  su, 50 kW gücündeki elektrik motoru-pervane düzeneği ile tahrik edilmektedir. Şekil 3'te gösterilen deneylerin yapıldığı test alanı ölçüleri  $1.5m \times 0.64m$  ve akış hızı aralığı

0 – 1.95 m/s şeklindedir. Deneylerde kullanılan silindirin boyu  $L = 1.42\text{m}$  olup yatay blokaj oranı ( $BO$ ) %94.67'dir. Bu oran silindirin bağlı olduğu kolların kanal duvarlarına sürtmemesi için kasten %100 olarak ayarlanmamıştır. Öte yandan, silindir üzerindeki akışın üç boyutlu karakteristikler göstermesi ve uçlara doğru akış formunun bozulmasına neden olabilecek niteliktedir. Bu çalışmanın kapsamı içinde yer verilmeyen bu etkilerin sayısal analizlerde de benzer bulunması için simülasyonlarda aynı  $BO$  değeri kullanılmıştır. Dairesel silindirlerin GKT hareketine uç akışın etkileri benzer akış rejimlerinde Duranay vd. (2021) ve Kınacı vd. (2016)'da müstakilen tartışılmıştır.



**Şekil 3.** Sirkülasyon kanalı ve GKT deney mekanizması

Önceki deneysel çalışmalarımızda kullanılan deney mekanizmalarının aksine (Duranay & Kınacı, 2020; Duranay vd., 2021), dairesel silindirlerin daha düşük kütle oranlarında VIV deneylerini gerçekleştirmek için bazı ağır bileşenler değiştirilmiş ve mekanizma genel hatları ile revize edilmiştir. Deneylerde ölçüm almak için donanımsal tasarımı ve yazılımı tarafımızca geliştirilen ultrasonik bir sensör (HC-SR04), her bir test boyunca en az bir dakika boyunca veri kaydetmiştir. Her bir koşulda ve akış hızında alınan verilerin ortalama değerleri kullanılmıştır.

### 3.2 Sayısal Yöntem

Bu çalışmada düzensiz, sıkıştırılmayan akış kullanılarak gerçekleştirilen yapı-sıvı etkileşimi olayını simüle etmek için Detached Eddy Simülasyonu (DES) yöntemi kullanılmış, GKT hareketinin simülasyonu için ise STAR CCM+'da yer alan Dinamik Akışkan-Yapı Etkileşimi (Dynamic Fluid Body Interaction, kısaca DFBI) yönteminden yararlanılmıştır. Navier-Stokes denklemleri ile akış içindeki momentum, kütle ve enerjinin korunumu, kullanılan ticari yazılımın Sonlu Hacimler Yöntemi (Finite Volume Method, kısaca FVM) yardımı ile kontrol hacminde tanımlanarak ayrıklaştırılmıştır. STAR CCM+ temelde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımı olmakla birlikte akışkan-yapı etkileşimi analizlerinde yapı dinamiğinin özelliklerini ve hareket denkleminin bileşenlerini tanımlamaya izin veren DFBI modülü sayesinde GKT olayını simüle etmemize imkân sağlamaktadır.

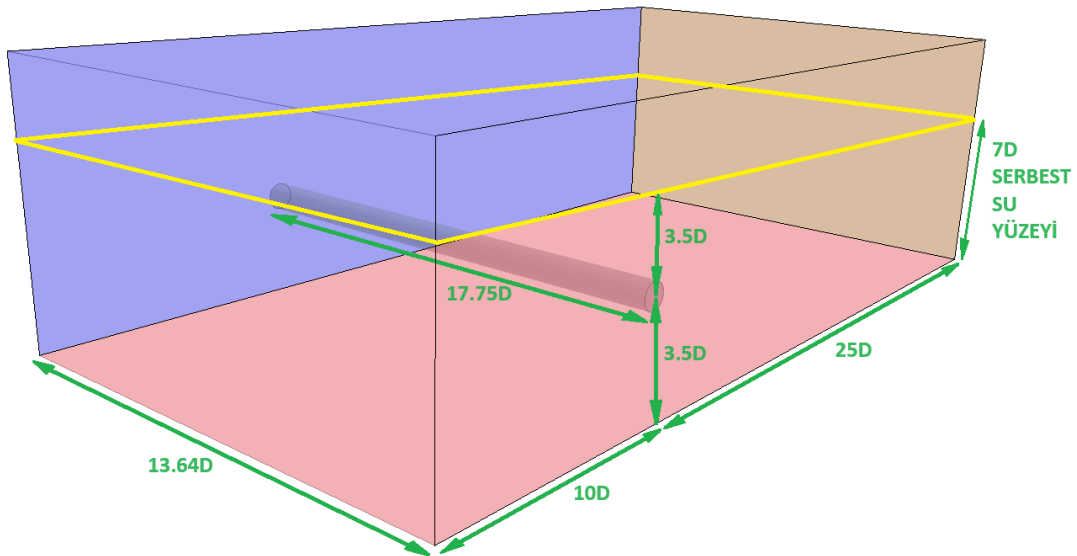
Çalışmada, iz bölgesindeki girdap yapılarını incelemeye başarılı türbülans modeli olarak SST  $k - \omega$  Detached Eddy yöntemi kullanılmıştır (Menter, 1994). Seçilen bu türbülans modeline göre yakın duvar bölgesini doğru bir şekilde modellemek için geliştirilmiş  $y^+$  duvar işlemi kullanılmıştır. Bu model,



özellikle akış ayrılması, girdap kopması veya bozucu bir basınç gradyanı olduğunda diğer iyi bilinen türbülans modellerine kıyasla daha doğru tahminler sağladığı bilinmektedir.  $k-\omega$  türbülans modeli ayrıca mevcut simülasyonlar için doğruluk ve hesaplama süresi arasında iyi bir denge sağlamaktadır. Türbülans modelleri arasındaki kıyaslamalar hakkında daha geniş bilgi Ünal vd. tarafından 2010 yılında yayınlanan içerikte elde edilebilir.

### 3.2.1. Kontrol Hacmi ve Sınır Koşulları

Çalışmada, sınır koşulları olarak İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında yer alan sirkülasyon kanalının boyutları taklit edilerek simülasyonlarda tanımlanmıştır. Üç boyutlu silindirin hacim merkezi sıfır noktası olarak ayarlanarak silindir çapına ( $D$ ) bağlı sınır koşulları Şekil 4'teki gibi düzenlenmiştir. Dairesel silindir, akışın girişten stagnasyon noktasına kadar düzgün ulaşabilmesi ve GKT hareketiyle silindirin ters yönde oluşturacağı yüzey dalgalarının hareket edeceği yeterli alanı sağlayabilmek amacıyla girişten  $10D$  mesafeye konumlandırılmıştır. Akışın kontrol hacmini terk edeceği yönde iz bölgesinin oluşumu ve görüntülenebilmesi için  $25D$  mesafe bırakılmıştır. Sirkülasyon kanalındaki genişliği taklit etmek için toplamda  $13.64D$  ( $BO = L_{silindir} / L_{kanal} = 0.947$ ) genişlik ve duvar etkilerini asgariye indirmek için toplamda  $10.25D$  yükseklik tanımlanmıştır. Su-hava karışımının aynı anda bulunduğu bu analizlerde, farklı boşluk oranlarına ( $h^*$ ) göre tanımlanan  $10.25D$  yükseklik içindeki su seviyesi farklılık göstermektedir. Hava-su karışımının kontrol hacmine giriş yaptığı ön, alt ve üst yüzeyler analizlerde *giriş (inlet)*, akışkanın kontrol hacmini terk ettiği arka yüzey *çıkış (outlet)* ve diğer yüzeyler *simetri düzlemi* olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Boşluk oranı  $h^*=3.5D$  olduğu durum için kontrol hacmi ve silindir.

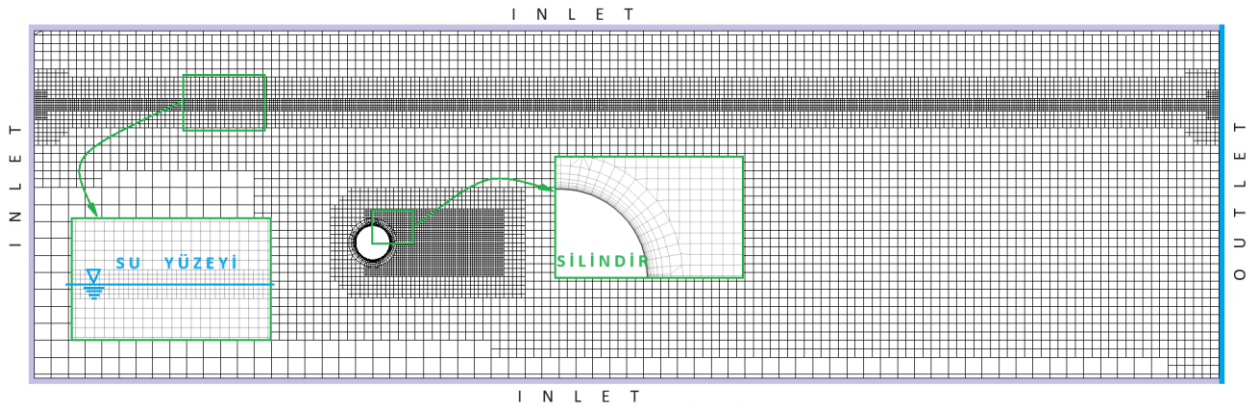
### 3.2.2 Uzaysal-Zamansal Ayrıklaştırma ve Ağ Yapısı

Dönüş ve ötelenme hareketlerin olduğu akışkan-yapı problemlerinin sayısal olarak modellendiği HAD analizlerindeki ağ yapısı oluşturulurken Şekil 5'te gösterildiği üzere üç boyutlu altı düzlem yüzeyli bir örgü kullanmak, özellikle cismin hareket ettiği bölgede daha dinamik ve dirençli hücreler oluşmasını sağlamaktadır (STAR CCM+, 2018). Ağ yapısı oluşturulurken cisim etrafında ve iz bölgesinde daha küçük ve sık bir doku kullanmak, sınır tabaka ve viskoz alt katmanların doğru bir şekilde modellenmesini sağlamaktadır. Çalışmada, bu sık ağ örgüsünün dairesel silindir etrafındaki prizmatik katmanlarının

sayısı, genişleme oranı ve toplam kalınlığı oluşturulurken  $y^+$  kriterleri uygulanarak ve cisim etrafındaki ilk hücreler üzerindeki sayısal değerinin 5'ten küçük sonuçlar üretmesine dikkat edilmiştir. Bunun sonucu olarak analizlerde toplam 2,744,473 ağ hücresi kullanılarak çözüme gidilmiştir. Simülasyonlarda kullanılan zaman adımı büyüklüğü girdap kopma periyodunun ( $T$ ) 200'de 1'ini geçmeyecek şekilde  $\Delta s=0.01$  olarak alınmıştır. GKT hareketi yapan dairesel bir silindirin sayısal analizlerinde doğru bir ağ yapısının genel hatları ile oluşturulması,  $y^+$  kriterlerinin detayları ve zaman adımı büyüklüğünün doğru seçilmesi hususlarında Duranay (2024), Kınacı (2016b) ve Mandelli vd. (2016)'dan daha detaylı bilgiler edinilebilir. Çalışmada, ağ sayısından ve zaman adımı aralığından bağımsızlık irdelenmiş ve Tablo 2'de sunulmuştur. Standart sapma değerleri incelendiğinde simülasyonlarda kullanılan hücre sayısı ve zaman adımı aralığı seçimlerinin yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

**Tablo 2.**  $U^*=6.144$  hızında farklı hücre sayısı ve zaman adımı aralıklarında indirgenmiş genlik ve indirgenmiş frekans değerleri

| Hücre Sayısı (Adet) | Zaman adımı aralığı ( $\Delta s$ ) | $A^*$   | $f^*$   |
|---------------------|------------------------------------|---------|---------|
| 1,703,391           | 0.010                              | 1.16173 | 1.19878 |
| 2,744,473           | 0.020                              | 1.14846 | 1.22521 |
| 2,744,473           | 0.010                              | 1.15124 | 1.21982 |
| 2,744,473           | 0.005                              | 1.15119 | 1.21456 |
| 5,162,089           | 0.010                              | 1.15061 | 1.21807 |
|                     | Standart Sapma                     | 0.00320 | 0.00694 |



**Şekil 5.** Kontrol hacmi kesit görüntüsü ve ağ örgüsünün dağılımı.

#### 4. Deneysel Testler ve Sayısal Analizlerdeki Girdap Kaynaklı Titreşim Silindirin Teknik Özellikleri

Üç boyutlu analizlerde tek bir silindir kullanılarak aynı sınır ve başlangıç koşullarında sadece su yüksekliği değiştirilmiş ve böylece 5 farklı boşluk oranı ( $h^*$ ) elde edilmiştir. Bu  $h^*$  değerlerinin ilkinde, silindir merkezi serbest su yüzeyinden  $3D$  kadar uzakta konumlandırılmış ve öncelikle bu etkiye maruz kalmadığı durumdaki GKT performansı elde edilmiştir. Son  $h^*$  değerinde ise su seviyesi silindir üst sınırına teğet olacak şekilde tanımlanarak (yani silindir merkezi ile su seviyesi arası  $0.5D$  de denebilir) GKT hareketi sırasında silindirin kısmen de olsa kendiliğinden su üzerine çıkması amaçlanmıştır. Ara  $h^*$  değerlerinde ise silindir üst sınırı ile serbest su yüzeyi arasındaki mesafe kademeli olarak azaltılarak her bir yeni koşulda silindirin serbest su yüzeyine daha fazla maruz kalması ve bunun sonucu olarak da GKT performansında değişim gözlemlenmesi istenmiştir.

**Tablo 3.** Deneysel ve Sayısal analiz koşulları ve değişkenleri.

| Değişken                  | Sembol   | Birim             | Değer ve aralık                      |
|---------------------------|----------|-------------------|--------------------------------------|
| Silindir Çapı             | $D$      | m                 | 0.080                                |
| Silindir Boyu             | $L$      | m                 | 1.420                                |
| Yay Sabiti                | $k$      | N/m               | 766                                  |
| Su içindeki doğal frekans | $f_{nw}$ | 1/s               | 1.221                                |
| İndirgenmiş akış hızı     | $U^*$    | –                 | 6.144                                |
| Kütle oranı               | $m^*$    | –                 | 0.829                                |
| Boşluk oranı              | $h^*$    | –                 | 0 – 3.500                            |
| Reynolds sayısı aralığı   | $Re$     | –                 | $2.2 \times 10^4 - 1.07 \times 10^5$ |
| Froude sayıları           | $Fr$     | –                 | 0.362 – 0.958                        |
| Sönüm katsayısı           | $\zeta$  | –                 | 0.050                                |
| Akışkan özkütlesi         | $\rho$   | kg/m <sup>3</sup> | 997.561                              |

Çalışmanın sayısal kısmında, serbest su yüzeyi etkilerinde incelenen deneysel çalışma ile kıyaslanması yapılarak, kenetlenme civarına denk gelen indirgenmiş akış hızları ( $U^* = 5 - 7$ ) olduğu koşullar taklit edilerek  $U^* = 6.144$  hızında analizler yapılmıştır. Silindir geometrisi ve suyun teknik özellikleri hesaplandığında bu hızdaki Reynolds sayısı TrSL3 akış rejimine denk gelen  $Re = 4.8 \times 10^4$  olarak bulunmuştur. Silindir çapı, boyu ve ağırlık oranı, yay sabiti ve sönüm katsayısı deneysel çalışmalarımızda kullandığımız özellikler ile uyumlu olacak şekilde ayarlanmıştır (örneğin Duranay vd., 2021). Bu parametrelerin GKT üzerindeki etkisi literatürdeki çalışmalarda detaylı olarak açıklanmış olup (Lee & Bernitsas, 2011), (Kınacı, 2016a), (Duranay vd., 2023) mevcut çalışmada sadece serbest su yüzeyi etkisine odaklanılmıştır.

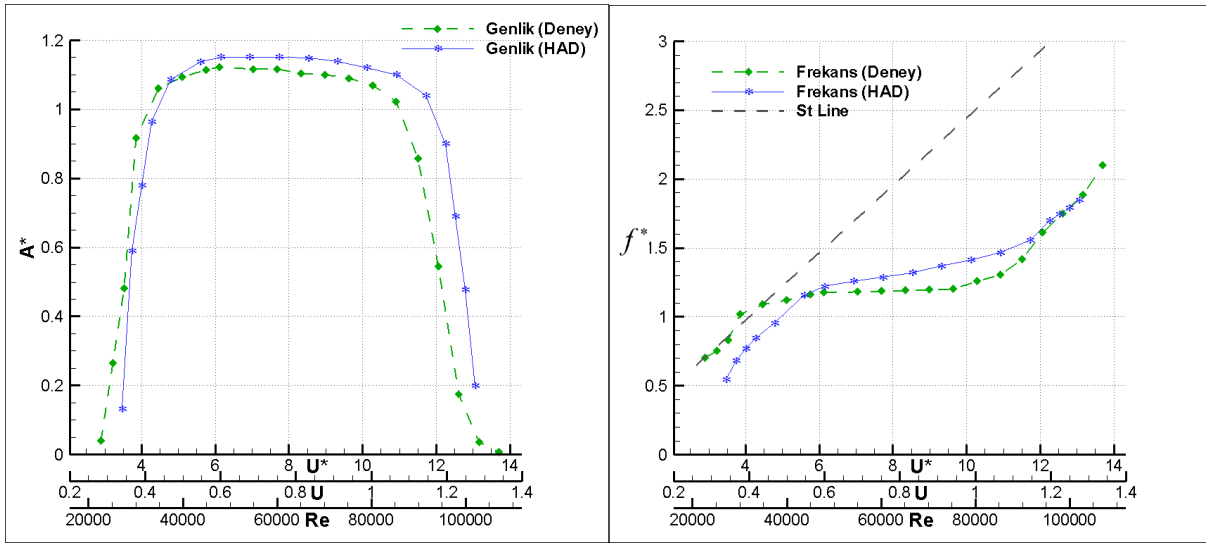
## 5. Sonuçlar ve Çıkarımlar

### 5.1 Kullanılan Yöntemlerin Doğrulanması

Kullanılan sayısal yaklaşım, İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında yer alan sirkülasyon kanalında yapılan deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Şekil 6, serbest su yüzeyinden yeterince uzakta konumlandırılan ( $h^* = 3.5D$  için) dairesel silindirin Tablo 3'te yer alan koşullarda GKT hareketinin bütün senkronizasyon aralığındaki sayısal ve deneysel sonuçlarını birlikte sunmuştur. Sayısal ve deneysel yöntemin birlikte verildiği bu boşluk oranına denk gelen sonuçlar aynı zamanda çalışmada kullanılan beş farklı derinlikten en büyüğüdür. Tüm parametrik detaylar Tablo 3'te verilmiş olup testlerin tamamı TrSL3 akış rejimi içinde gerçekleşmiştir. Serbest su yüzeyi ile silindirin üst noktasındaki mesafe ve akış hızına bağlı hesaplamalarda en derin konumdaki silindir koşulunda Froude sayısı  $Fr = 0.362$  olarak bulunmuştur.

Çalışmanın deneysel sonuçlarının literatürde benzer parametreler ile yürütülen çalışmalarla mukayesesi önceki yayınlarımızda, örneğin (Duranay vd., 2021; Kınacı vd., 2022), yapılmış olup deneysel belirsizlikleri Usta & Duranay (2020) ve Duranay vd. (2022)'de detaylıca tartışılmıştır. Şekil 6'da ifade edilen genlik ve frekans değerleri  $U$  akış hızlarında, bu akış hızlarına denk gelen indirgenmiş akış hızlarında ( $U^*$ ) ve Reynolds ( $Re$ ) sayılarında gösterilmiştir. Buradaki  $f_{nw}$  ifadesi silindirin su içindeki doğal frekansı anlamına gelmektedir. GKT testlerinde, çalışılan Reynolds sayısı aralığına denk gelen Strouhal frekansı  $St$  Line ile gösterilmiştir. Bu değer, hareketsiz silindirler üzerinde girdap kopma frekansı değerinin Reynolds sayılarına bağlı olarak değişimini göstermektedir.  $St$  Line, GKT çalışmalarındaki frekans değerlerinin Reynolds değerlerine bağlı ana yönelimin belirlenmesi ve

takibinde referans alınan önemli bir değişkendir.  $f_{osc}$ , hareketli silindirin salınım frekansı olmak üzere  $U^*$  ve  $f^*$  ifadeleri (4) ve (5) numaralı denklemlerde verilmiştir.



**Şekil 6.** Kullanılan sayısal ve deneysel yöntemler ile  $h^*=3.5D$  koşulundaki dairesel silindirin GKT indirgenmiş genlik ( $A^*$ ) (solda) ve indirgenmiş frekans ( $f^*$ ) (sağda) sonuçları.

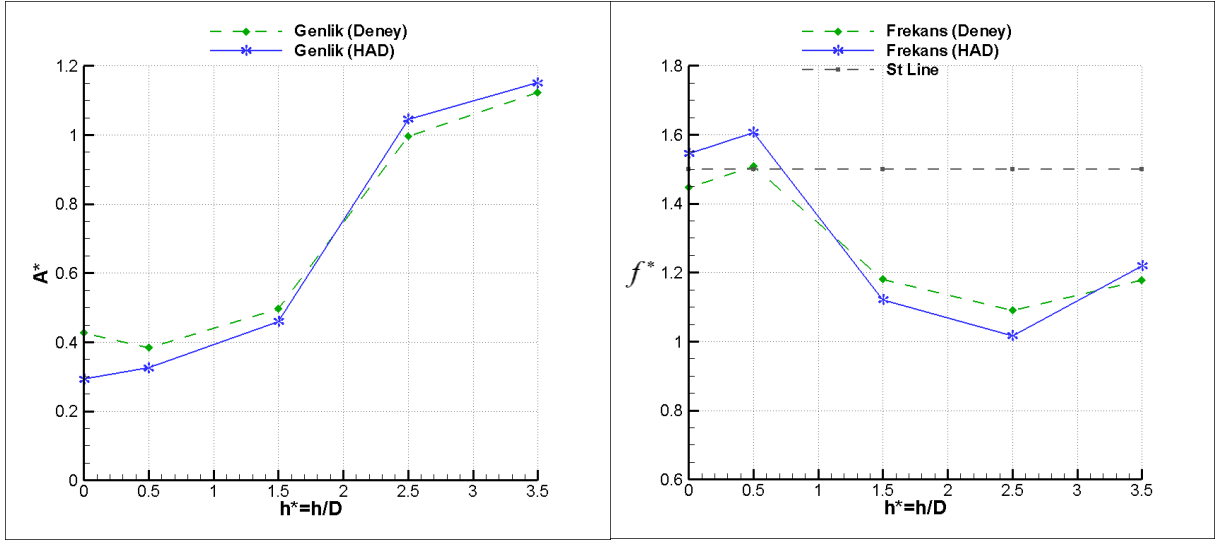
$$U^* = U / (f_{nw} \times D) \quad (4)$$

$$f^* = f_{osc} / f_{nw} \quad (5)$$

HAD analizleri, bulunan genlik ve frekans değerleri senkronizasyon aralığı, dallanmalar arası geçiş ve maksimum genlikler açısından değerlendirildiğinde deneyler ile oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir. Senkronizasyon aralığındaki başlangıç dallanması deneylerde daha önce başlamış ve üst dallanmadan alt dallanmaya ve hatta senkronizasyon dışına daha erken çıkmıştır. Öte yandan, HAD analizlerinde üst ve alt dallanma bölgelerinde daha yüksek, başlangıç dallanmasında ise deneylerden daha düşük genlikler üretilmiştir. İki yöntemde elde edilen kenetlenme noktası ve civarındaki üst dallanma genlikleri farkı sadece %2–3 aralığında iken bu fark sırasıyla başlangıç dallanması ve alt dallanmada daha yüksektir. GKT konusunda öncü çalışmalardan kabul edilen Govardhan & Williamson (2000)'e uygun olarak, su içindeki doğal frekans ( $f_{nw}$ ) ve vakum ortamındaki doğal frekans ( $f_v$ ) değerlerinin aşıldığı noktalarda dallanmalar arası geçişler görülmüştür. Bu geçiş noktaları sayısal ve deneysel çalışmalarda benzer aralıklarda bulunmuş olup sırasıyla  $U^*=4-5$  ve  $U^*=11-12$  değerlerinde meydana gelmiştir. Bu geçiş aralıkları Şekil 6'da hem genlik (solda) hem de frekans (sağda) değerlerindeki kırılmalar ile net olarak anlaşılmaktadır. Genliklerde alt dallanma bölgesinin üst dallanma bölgesi ile senkronizasyon çıkışı arasında fazla yer işgal etmemesi, hatta oldukça sönük kalmasının nedeni, çalışmanın TrSL3 akış rejiminde yürütülmesidir. TrSL3 akış rejiminin karakteristikleri hakkında detaylı bilgi için Ji vd. (2018) ve Duranay (2024)'den yararlanılabilir.

## 5.2 Serbest Su Yüzeyinin Dairesel Silindirin GKT Hareketine Etkisi

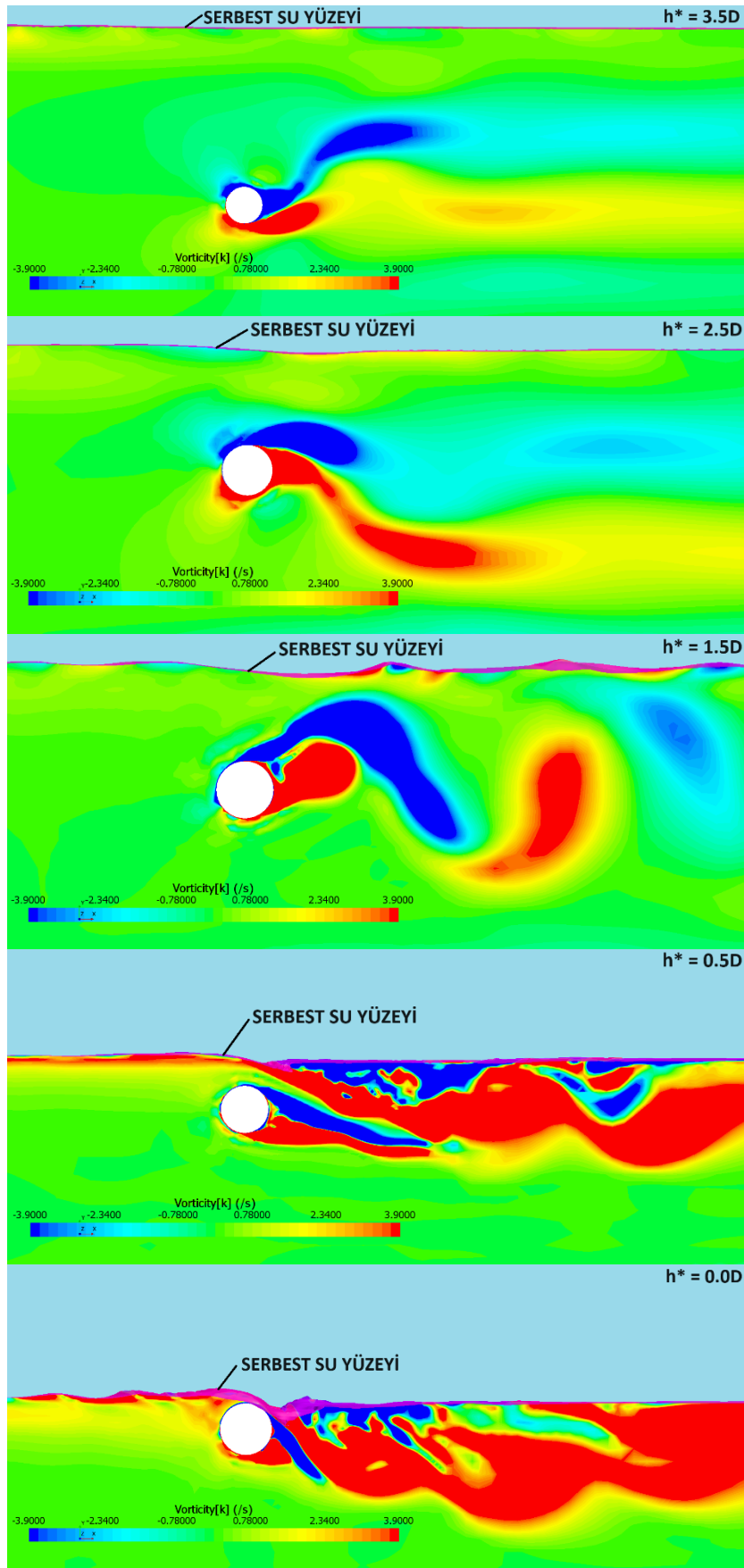
Çalışmada deneysel ve sayısal olarak GKT performansı incelenen dairesel silindirin senkronizasyon bölgesinde elde etmiş olduğu en yüksek genlik değerine karşılık gelen indirgenmiş akış hızı  $U^* \approx 6$  civarındadır. Bu akış hızında üretilen sayısal ve deneysel genlikler sırasıyla  $A^* = 1.130$  ve  $A^* = 1.151$  iken sayısal hesaplamalarda elde edilen indirgenmiş frekans  $f^* = 1.220$  ve deneysel indirgenmiş frekans  $f^* = 1.178$  olarak bulunmuştur.



**Şekil 7.**  $U^* \approx 6$  civarında erişilen en yüksek genliklerin ( $A^*$ ) (solda) ve aynı hıza denk gelen frekans ( $f^*$ ) değerlerinin (sağda) boşluk oranına ( $h^*=h/D$ ) bağlı olarak değişimi.

Şekil 7’de  $U^* \approx 6$  civarındaki üst dallanma bölgesinde GKT performansı irdelenen dairesel silindirin yapılan deneysel testler ve sayısal HAD analizleri beş farklı boşluk oranına bağlı olarak birlikte sunulmuştur. Dairesel silindirin su içindeki derinliği azaldıkça serbest su yüzeyi etkisinin genlikler üzerindeki negatif etkisi açıkça görülmektedir. HAD analizlerindeki genlikler yeterli derinlikte deneysel sonuçlardan yüksek değer üretmekteyken serbest su yüzeyine yaklaştıkça HAD ile üretilen genlikler deneysel genlikleri aşmıştır. İndirgenmiş frekans değerlerinde ise genliklerin aksine, serbest su yüzeyi etkisi ile artış meydana gelmiştir. Akışkandan dairesel silindire olan enerji transferi açısından bakıldığında GKT genliklerin azalırken frekanslarının aynı etki ile artması, GKT fenomeninden yenilenebilir enerji elde etmeyi hedefleyen çalışmalar için bir optimizasyon problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Öte yandan, GKT’nin açık deniz yapılarında meydana getirebileceği tahribat söz konusu olduğu durumlarda doğal frekansı yüksek yapılar için serbest su yüzeyine yakın koşullarda daha fazla risk oluşturacağı görülmektedir.

HAD simülasyonlarında, serbest su yüzeyi etkisinin girdapların oluşumuna nasıl kısmen veya tamamen engel olduğu Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekilde, beş farklı boşluk oranında diğer tüm parametreler sabit tutularak gerçekleştirilen analizlerde meydana gelen girdaplar verilmiş olup bu girdap formlarının ve akışın oluşturduğu desenlerin derinliğe bağlı olarak büyük değişim gösterdiği açıktır. Hareket denkleminin sağ tarafında ifade edilen ve zamana bağlı değişiklik gösteren  $F_y(t)$  girdap kopması kaynaklı periyodik kuvvetlerin oluşabilmesi için öncelikle gerekli olan sınır koşulları en sığ iki derinlikte ( $h^*=0.0D$  ve  $h^*=0.5D$ ) büyük oranda sağlanamamıştır. Bu şartların ilki ve en önemlisi Şekil 1’de gösterilen alt ve üst sınır tabakalarıdır. Şekilde, dairesel silindir serbest su yüzeyine daha yakın konumlandırıldıkça yüzey civarında akışkan yapıları kaotik bir hal almış, silindirin varlığı münasebeti ile serbest su yüzeyinin yüksekliği de artmıştır. Böylece dairesel silindirin GKT hareketi daha düzensiz bir akış içinde gerçekleşmiştir. Sonuç olarak Şekil 7’de gösterildiği üzere oluşan salınım genlikleri de boşluk oranı ile birlikte azalmıştır.



Şekil 8. GKT silindirin  $U^* \approx 6$  civarında beş farklı boşluk oranına ( $h^*=h/D$ ) bağlı olarak değişen iz bölgesi.

Aynı akış hızında hesaplanan Froude sayıları, boşluk oranlarının farklı olması nedeniyle her bir koşulda derinliklere bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Boşluk oranının  $h^*=3.5D$  olduğu 0.24m derinlikte  $Fr=0.362$  olan Froude sayısı değeri dairesel silindir serbest yüzeye yaklaştıkça artmıştır. Chung (2016)'da detaylıca bahsedildiği üzere serbest su yüzeyinin etkisi arttıkça, başka bir deyişle  $Fr$  değeri arttıkça, dairesel silindirlerin GKT hareketi baskılanmaktadır. Benzer bir çalışmada Reichl et al. (2005) paralel bir çıkarımda bulunmuş ve  $Fr$  değeri arttıkça üst sınır tabakada girdap kopma olasılığının azaldığını göstermiştir. Mevcut çalışmanın sonuçları bütün bu bulgular ve önceki bölümlerde bahsedilen literatürde GKT üzerinde serbest su yüzeyi etkisini irdeleyen araştırma sonuçları ile uyumludur. Deneysel ve sayısal sonuçların serbest su yüzeyi etkisi altında ürettiği genlik ve frekans değerleri birbirini destekler nitelikte olup, oluşan küçük farkların deneysel belirsizlikler ve sayısal modellemenin eksiklerinden kaynaklandığı not edilmelidir.

### 5.3 Çıkarımlar

Bu çalışmada, serbest su yüzeyine yakın şartlarda ve yüzeyden yeterince uzakta konumlandırılan akışa dik eksende hareket etmesine izin verilen dairesel bir silindirin girdap kaynaklı titreşimleri incelenmiştir. Silindirin su yüzeyinden derinliğine bağlı olarak toplamda beş farklı koşulda gerçekleştirilen araştırma, deneysel ve sayısal olarak yürütülmüş olup aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Serbest su yüzeyine yaklaştıkça salınım frekansı değerleri artmış olup, yüzeye teğet ve en yakın koşuldaki dairesel silindirin salınım frekansı sabit silindir etrafındaki girdap kopma frekansı olan Strouhal frekansını geçmiştir.
- Serbest su yüzeyi varlığı ile silindir üst sınır tabakasında girdap oluşumunu kısmen ya da tamamen engelleyerek dairesel silindir üzerinde ve iz bölgesinde periyodik girdap oluşumlarını azaltmış ya da engellemiştir. Bunun sonucunda ise serbest su yüzeyi etkisi arttıkça daha düşük genlikli GKT hareketleri elde edilmiştir.
- Boşluk oranı  $h^* = h/D = 1.5$  daha büyük olduğu durumlarda serbest su yüzeyi etkisi  $h^* = 0.5$  ve  $h^* = 0.0$  seviyelerine kıyasla oldukça sönük kalmıştır. Bu oran  $h^* = 1.5$ ,  $h^* = 2.5$  ve  $h^* = 3.5$  olduğunda iz bölgesinde rijit girdaplar gözlemlenmiştir.
- Araştırmanın amacına uygun olarak üretilen bulgular neticesinde, dairesel silindirin GKT hareketine serbest yüzey etkisi Şekil 7'deki genlik değerlerinden ve Şekil 8'deki iz bölgesinde girdap oluşumlarındaki farklılıklar ile kolayca ayırt edilebilmiştir.
- GKT hareketinden yararlanan su pompası, elektrik üretimi sağlamayı planlayan bir yöntem için teçhizatın çok derinde konumlandırılmasının maliyeti artıracığı muhakkaktır. Çalışmanın bulgularından yola çıkarak, serbest su yüzeyi ile hareketli silindirin üst noktası arası mesafe sadece 2.5D kalacak durumda dahi genlik ve frekans bakımından büyük farklılıklar oluşmadığı sonucuna varılmaktadır. Öte yandan, derinliğe bağlı değişen GKT performansı ve kurulum maliyeti hesaplarının bir optimizasyon problemi olduğu unutulmamalıdır.

Kullanılan sayısal yaklaşımın sonuçları ile İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarında yer alan sirkülasyon kanalında yapılan deneysel çalışmanın sonuçları birbiri ile uyumludur. Simülasyonlar sayesinde elde edilen iz bölgesindeki akış yapılarının gelecek çalışmalarda PIV gibi yöntemler ile deneysel olarak da gözlemlenebilmesi planlanmakta ve tavsiye edilmektedir.

## Bilgilendirme

Bu çalışmanın deneysel testleri, 2023 yılında İTÜ Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda yer alan sirkülasyon kanalında Araştırma Görevlisi Yüksek Mühendis Alkın Erdal Demirhan'ın değerli katkılarıyla tamamlanmıştır. Kendisine teşekkürlerimi sunarım.

## Kaynaklar

Akaydin, H. D., Elvin, N., & Andreopoulos, Y. (2010). Energy harvesting from highly unsteady fluid flows using piezoelectric materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(13), 1263–1278.

Bernitsas, M. M., & Raghavan, K. (2005). Fluid Motion Energy Converter. In United States Patent and Trademark Office Patent# 7,493,759 B2.

Chung, M. H. (2016). Two-degree-of-freedom vortex induced vibration of low-mass horizontal circular cylinder near a free surface at low Reynolds number. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 57, 58-78.

Dai, H. L., Abdelkefi, A., Yang, Y., & Wang, L. (2016). Orientation of bluff body for designing efficient energy harvesters from vortex-induced vibrations. *Applied Physics Letters*, 108(5), 053902.

Duranay, A., & Kinacı, Ö. K. (2020). Enhancing two-dimensional computational approach for vortex-induced vibrations by scaling lift force. *Ocean Engineering*, 217, 107620.

Duranay, A., Usta, O., & Kinacı, Ö. K. (2021). Systematic investigation of the tip effects on vortex-induced vibrations for circular cylinders. *Ocean Engineering*, 239, 109829.

Duranay, A., Kinacı, Ö. K., & Bernitsas, M. M. (2022). Effect of aspect ratio on hydrokinetic energy harnessing using cylinders in VIV. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 8(2), 217-232.

Duranay, A., Demirhan, A. E., Dobrucali, E., & Kinaci, O. K. (2023). A review on vortex-induced vibrations in confined flows. *Ocean Engineering*, 285, 115309.

Duranay, A. (2024). Numerical and experimental investigation of vortex formation modes on a freely vibrating circular cylinder at high Reynolds numbers. *Applied Ocean Research*, 144, 103909.

Feng, C. C., (1968). The measurements of vortex-induced effects in flow past a stationary and oscillating circular and d-section cylinders, University of British Columbia, Yüksek Lisans Tezi, Vancouver, Kanada.

Fredsoe, J., & Sumer, B. M. (1997). Hydrodynamics around cylindrical structures (Vol. 12). World Scientific.

Govardhan, R., & Williamson, C. (2000). Modes of vortex formation and frequency response of a freely vibrating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 420, 85-130.

Ji, C., Xu, W., Sun, H., Wang, R., Ma, C., & Bernitsas, M. M. (2018). Interactive flow-induced vibrations of two staggered, low mass-ratio cylinders in the TrSL3 Flow Regime ( $2.5 \times 10^4 < Re < 1.2 \times 10^5$ ): Smooth Cylinders. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 140(4), 041801.



- Kınacı, Ö. K., 2016a, Girdap kaynaklı titreşimler. *GMO Journal of Ship and Marine Technology*, 22(206), 51-65.
- Kınacı, Ö.K., 2016b. 2-D URANS simulations of vortex induced vibrations of circular cylinder at Trsl3 flow regime. *J. Appl. Fluid Mech.* 9 (5), 2537–2544.
- Kınacı, Ö. K., Lakka, S., Sun, H., & Bernitsas, M. M. (2016). Effect of tip-flow on vortex induced vibration of circular cylinders for  $Re < 1.2 * 10^5$ . *Ocean engineering*, 117, 130-142.
- Kınacı, Ö. K., & Gökçe, M. K. (2020). Akımla kendi kendini tahrik eden pompa (TPE 2015 17104).
- Kınacı, Ö. K., Demirhan, A. E., & Duranay, A. (2022). Vortex-induced vibrations of a single-degree-of-freedom circular cylinder in the vicinity of the free surface. *Applied Ocean Research*, 124, 103202.
- Lakka, S. (2013). Flowmeter based on vibration induced by vortices, Doktora Tezi, Lempäälä, Finlandiya.
- Lee, J. H., Bernitsas, M. M. (2011). High-damping, high-Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter. *Ocean Engineering*, 38, s. 1697-1712.
- Mandelli, S., Muggiasca, S., Malavasi, S (2016). Pressure field and wake modes analysis of an oscillating cylinder. *Ocean Engineering* 124, 74–83.
- Martins, F. A. C., & Avila, J. P. J. (2019). Effects of the Reynolds number and structural damping on vortex-induced vibrations of elastically-mounted rigid cylinder. *International Journal of Mechanical Sciences*, 156, 235-249.
- Menter, F. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1598-1605.
- Rahman, M. A. A. (2015). Vortex-induced Vibration of Circular Cylindrical Structure with Different Aspect Ratios (Doktora Tezi).
- Reichl, P., Hourigan, K., & Thompson, M. C. (2005). Flow past a cylinder close to a free surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 533, 269-296.
- STAR-CCM+. User Guide. CD-Adapco Inc., USA.
- Schulz, K. W., & Kallinderis, Y. (2000). Numerical prediction of the hydrodynamic loads and vortex-induced vibrations of offshore structures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 122(4), 289–293.
- Sumer, B. M., Fredsoe, J. (1997). *Hydrodynamics around cylindrical structures*, World Scientific, Singapur.
- Usta, O., & Duranay, A. (2020). Uncertainty analysis of experiments of vortex-induced vibrations for circular cylinders. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 14(2).
- Ünal, U., Atlar, M., Gören, Ö. (2010). Effect of turbulence modelling on the computation of the near-wake flow of a circular cylinder. *Ocean Eng.* 37 (4), 387–399.
- Yüksel, Y. (2011). *Deniz tabanı hidrodinamiği ve kıyı morfolojisi:(Planlama ve tasarım)*, Beta, İstanbul.
- Zdravkovich, M. M. (2003). *Flow Around Circular Cylinders*. New York: Oxford University Press.