

BOYUNA YİVLİ PÜRÜZLÜLÜĞÜN AKIMIN BORUYA UYGULADIĞI SÜRÜKLEME KUVVETİ ÜZERİNE ETKİSİ

Olca GÜNDEMİR ve Kerem TAŞTAN

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570, Ankara
olcaygundemir@yahoo.com, ktastan@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 08.10.2007; Kabul/Accepted: 25.06.2008)

ÖZET

Bu çalışmada, boru dış yüzeyine yerleştirilen boyuna yivli pürüzlülüğün, boruya etkiyen sürüklenme (direnç) kuvveti üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiş ve üniform kum pürüzlülük ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçları göstermiştir ki, boruya etkiyen sürüklenme kuvveti borunun tabanla olan mesafesi ve pürüzlülük elemanlarının yüksekliği arttıkça artarken, yiv genişliği azaldıkça azalmaktadır. Ayrıca aynı yükseklikteki boyuna yivli pürüzlülük ve üniform kum pürüzlülük elemanlarına sahip boruya etkiyen sürüklenme kuvvetleri arasında bir miktar fark olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Su altı borusu, sürüklenme kuvveti, pürüzlülük

EFFECTS OF LONGITUDINAL GROOVE-ROUGHNESS ELEMENTS ON THE DRAG FORCE EXERTED BY THE FLOW ON A PIPE

ABSTRACT

In this study, the effects of the longitudinal-groove roughness elements (placed on the outer surface of the pipe) on the drag force acting on the pipe were experimentally investigated and compared with uniform sand roughness. The experimental results have indicated that the drag force exerted by the flow on a pipe increases as the distance between the canal bottom and the pipe and the height of roughness elements increases and it decreases as the distance between two successive longitudinal-groove roughness elements decreases. The experiments have also shown that there is some difference between the drag forces corresponding to longitudinal-groove roughness elements and uniform sand roughness elements for the same height.

Keywords: Submerged pipe, drag force, roughness

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, su ve petrol taşımak veya başka nedenlerden dolayı açık denizlere veya nehirlere su altı boru hatları inşa edilip kullanılmaktadır. Dünyanın çeşitli yerlerinde çeşitli uzunlukta döşenmiş veya döşenecek birçok su altı boru hattı vardır. Su altı boru hattı denilince akla ilk gelen, deniz deşarj hatları, petrol ve doğalgaz boru hatları olmakla birlikte tüp geçitler de birer açık deniz boru hattıdır. Buna misal olarak, Kuzey Denizi Petrol platformu, Kıbrıs'a deniz altından su götürülmesi vs. verilebilir.

Su altı borularına (su altında giden kablolar, petrol, doğalgaz ve sıvı taşımacılığı için kullanılan borular, tren veya diğer araç ulaştırması için yapılan tüneller)

birçok kuvvet etkir. Akışkan nedeniyle oluşan kuvvetler; genellikle dalgalar, akım, rüzgar tarafından oluşturulan akıntı, gel-git olayı ve yoğunluk farkından kaynaklanır.

Bu makalede boru dış yüzeyi boyunca yerleştirilmiş olan yivli pürüzlülüğün ve kum pürüzlülüğün, su yüzeyinde dalga olmadığı durumda, boruya etkiyen sürüklenme (direnç) kuvveti üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR (PREVIOUS STUDIES)

Teng ve Nath [1], su altı boru hatlarına gelen dalga ve akımdan kaynaklanan kuvvetleri incelemişlerdir. Okyanus altında yapılan birçok boru hatları ve açık

deniz yapılarını araştırmışlardır. Okyanus dalgalarının, çoğunlukla akımlardan kaynaklandığını ve batık deniz yapılarına gelen hidrodinamik kuvvetlerin, akışkan elemanın kinematığı ve dinamiği ile doğrudan ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir.

Pranesh ve Man [2], su altında askıda duran boru hatlarına gelen hidrodinamik kuvvetleri deneysel olarak değişik derinliklerde araştırmışlar; borunun tabana olan değişik mesafelerini, boru çapının su derinliğine oranı ve iki komşu paralel boru arasındaki uzaklığın etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, eksenleri paralel 3 adet boru kullanılarak, sadece dalga veya dalga ve akıntı birleşimi halleri için borulara etkiyen kuvvetler deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, sürüklenme ve atalet katsayılarındaki değişim de araştırılmıştır. Sadece dalga hali için bulunan sonuçlar, dalga ve akıntının birlikte olması hali ile karşılaştırılmıştır.

Ballet ve Hobbs [3], boru hattında taşınan sıvıların deniz suyu ile aralarındaki yoğunluk ve ısı farkından dolayı, borulara gelen kuvvetleri incelemişlerdir. Yüksek ısı farkından kaynaklanan kuvvetlerin, boru ile deniz yatağı arasındaki sürtünmeden dolayı engellendiği ve bunun aksel bir zorlanma oluşturduğu, bu zorlamanın da boruda bükülmelere neden olduğunu göstermişlerdir.

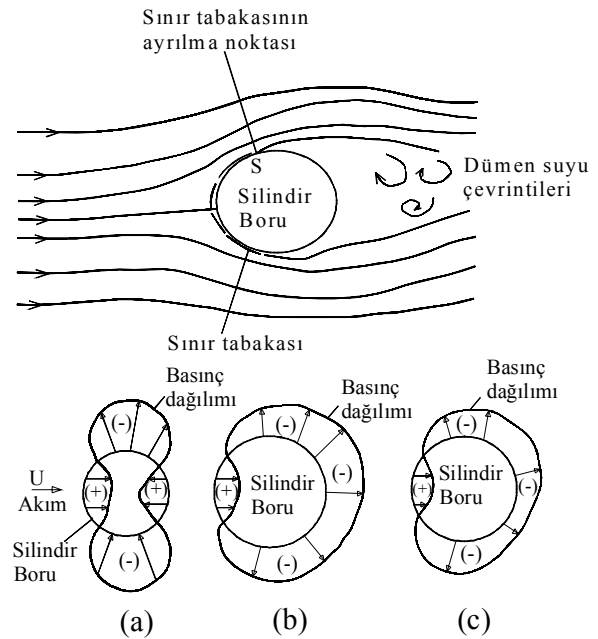
Fredsoe ve Sümer [4-6], sadece dalga ve dalga ve akımın beraber olması hallerinde çeşitli boru düzenekleri için boru hatlarına gelen kuvvetleri incelemişlerdir. 1993 yılında yaptıkları çalışmada dalga ve akımın beraber etki etmesi halinde tabanda oluşan kesme gerilmesi ve bu gerilimden kaynaklanan etkilerin hesaplanması amacıyla deneyler yapmışlardır.

Wu ve Riha [7], deniz tabanına oturan boru hatlarına, fırtınalar nedeniyle etkiyen kuvvetleri incelemişler ve "Tabandaki Boru Hattının Stabilesinin Zaman Değişkenli Güvenirlik Analizi" isimli bir yöntem geliştirmişlerdir. Meksika körfezinde meydana gelen ve üç saat süren fırtınadan kaynaklanan kuvvetleri bu metotla çözmüş ve gerçeği ile karşılaştırmışlardır.

Çokgör ve ark. [8, 9, 10], laboratuardaki açık kanalda, akım ve dalganın birlikte bulunması halinde, tabana oturan ve tabana kısmen gömülü silindir borulara etkiyen hidrodinamik kuvvetleri çalışmışlar ve hidrodinamik kuvvetlerle ilgili parametreleri deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak düzgün akım halinde (dalganın olmadığı halde) sürüklenme (direnç) katsayısı C_D 'nin, borunun gömülme katsayısı arttıkça düştüğünü görmüşlerdir. Boru, çapının yarısı kadar gömüldüğünde, C_D 'nin yaklaşık yarı değerini aldığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca akımın boruya uyguladığı kaldırma kuvvetinin de artan gömülme derinliği ile azaldığını göstermişlerdir. Son olarak Keulegan-Carpenter sayısı, K , arttıkça C_D sürüklenme (direnç) katsayısının azaldığını belirtmişlerdir.

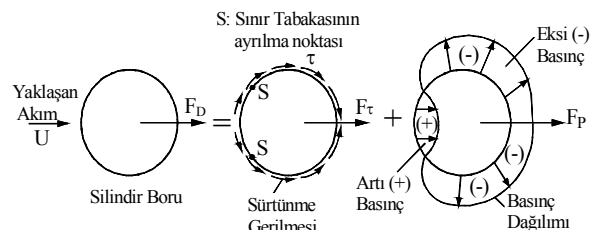
3. BORU DIŞ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN SINIR TABAKASI İÇERİSİNDEKİ AKIM ÜZERİNE ETKİSİ (THE EFFECT OF ROUGHNESS ELEMENTS ON FLOW WITHIN THE BOUNDARY LAYER)

Boru dış yüzey pürüzlülüğü, boru dış cidarındaki sınır tabakası içerisindeki akımın özelliklerini (başta basınç dağılımı olmak üzere) ve sınır tabakasının cidardan ayrılma noktasının yerini değiştirir. Akımın türbülanslılık derecesi arttıkça (laminerden türbülansa doğru gittikçe) sınır tabakasının ayrılma noktası S , silindir üzerinde mansaba doğru kayar (Şekil 1).



Şekil 1. Akım içerisindeki bir silindirin dış yüzeyindeki basınç dağılımının temsili gösterilişi a) İdeal akışkan akımı (potansiyel akım) durumunda silindir yüzeyindeki basınç dağılımı b) Gerçek akışkan akımındaki silindir üzerinde laminar sınır tabakası durumunda c) Gerçek akışkan akımında silindir üzerindeki türbülanslı sınır tabakası durumunda [11] (Pressure variation on outer surface of a cylinder a. Potential flow, b. Laminar boundary layer c. Turbulent boundary layer)

Şekil 2'de gösterildiği üzere, akım içerisinde bulunan bir cisme akımın uyguladığı sürüklenme (direnç) kuvveti F_D 'nin iki esas nedeni veya bileşeni vardır.



Şekil 2. Sürüklenme Kuvveti ve Bileşenleri (Drag force and its components)

Bunlardan birincisi, cismin dış cidarı boyunca oluşan sürtünme (viskoz) gerilmesi, τ , nedeniyle meydana gelen sürtünme direnç kuvveti F_τ , ikincisi ise cismin memba ve mansap yüzeylerinde oluşan artı (+) ve eksi (-) basınç dağılımından kaynaklanan net basınç kuvveti F_p 'dir

$$F_D = F_\tau + F_p \quad (1)$$

Yüksek Reynolds sayısına sahip akımlarda (türbülanslı sınır tabakası) basınç kuvveti F_p 'nin değeri, sürtünme kuvveti F_τ 'dan çok daha büyük olduğundan toplam sürüklenme kuvveti F_D 'nin oluşumunda F_p 'nin katkısı çok fazladır. Diğer taraftan küçük Reynolds sayısına sahip (laminer sınır tabakası) akımlarda ise, F_τ 'nin değeri F_p 'nin yanında önemli olup sürüklenme kuvveti F_D 'nin oluşmasında büyük bir öneme sahiptir.

Cismin dış yüzey pürüzlülük elemanının, gerek boyutu gerekse dağılımı ve konumu, cismin dış yüzeyi boyunca hızı, basıncı, enerjinin kırılmasını ve böylece sürtünme gerilmesini veya sürtünme kuvvetini, basınç dağılımını veya basınç kuvvetini ve dolayısıyla sürüklenme kuvvetini etkiler. Cismin dış yüzey pürüzlülük elemanı, sınır tabakasının ayrılma noktasını ötelediğinden, dümensuyu çevrinti bölgesinin büyüklüğünü ve dolayısıyla mansaptaki eksi (-) basınç bölgesini ve böylece basınç kuvvetini, F_p , oldukça etkiler. Yani, pürüzlülük elemanının F_D üzerindeki etkisi, türbülanslı akımda esas olarak basınç kuvveti F_p 'nin üzerindeki etkisi nedeniyle öne çıkmaktadır.

Sürüklenme kuvveti F_D , genel olarak direnç katsayısı C_D , yaklaşan akım hızı U , cismin akıma dik boyutları ve sıvının yoğunluğu ρ cinsinden ifade edilir. Pürüzlülük elemanının; cismin boyutu, yaklaşan akımın hızı ve sıvının yoğunluğu üzerine etkisi olmayıp direnç katsayısını, C_D , ve dolayısıyla sürüklenme kuvvetini, F_D , etkiler. Kısacası pürüzlülük elemanının gerçek etkisi direnç katsayısı C_D üzerindedir. Yukarıda değinildiği üzere, pürüzlülük elemanı bilhassa sınır tabakasının ayrılma bölgesinin büyüklüğünü değiştirdiğinden, C_D aslında (akışkanın rejimi veya Reynolds sayısı yanında) sınır tabakasının ayrılma bölgesinin büyüklüğü konusunda bir çeşit ölçüttür. Sınır tabakasının ayrılma bölgesi (dümensuyu çevrinti bölgesi) ne kadar büyük ise C_D de o kadar büyük olur. Dümensuyu çevrinti bölgesindeki (sınır tabakasının ayrılma bölgesindeki) akım, çok aşırı karmaşık olduğundan C_D 'yi matematiksel olarak ifade etmek zordur. Dolayısıyla, borunun dış yüzeyine ait pürüzlülük elemanının sürüklenme kuvveti F_D üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemeye ihtiyaç vardır. Deneysel çalışmaya geçmeden önce olaya etkileyen boyutsuz grupları bulmak için boyut analizi gerekir. Söz konusu boyut analizi aşağıda yapılmıştır. Bu çalışmada silindirik borunun dış yüzeyine gerek küresel plastik daneler

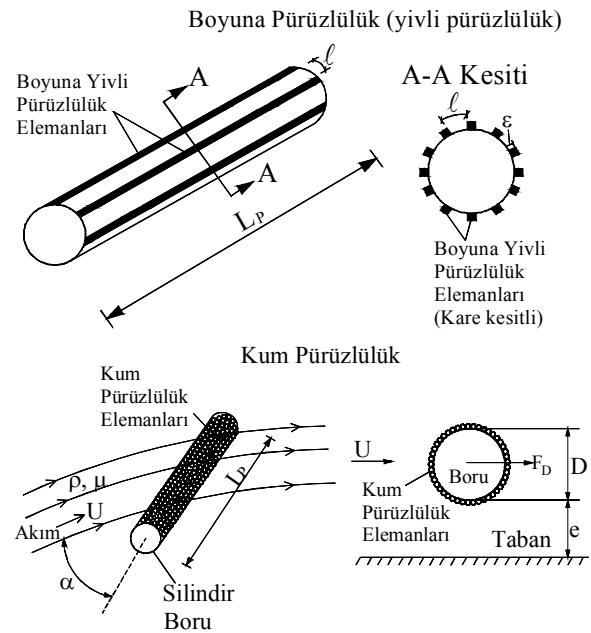
yapıştırarak gerekse boru boyunca uzayan çubuk şeklinde pürüzlülük elemanları yerleştirilerek (bir çeşit boyuna yivli pürüzlülük yaparak) pürüzlülük elemanlarının sürüklenme kuvveti F_D ve dolayısı ile direnç katsayısı C_D üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

4. BOYUT ANALİZİ (DIMENSIONAL ANALYSIS)

Akım içerisindeki silindirik boruya akımın uyguladığı sürüklenme kuvveti üzerinde; sıvıya, akıma ve silindirik boruya ait aşağıda verilen büyüklükler etkindir.

Geometrik büyüklükler: D = Silindir borunun dış çapı; L_p = Silindir borunun boyu; ε = Silindir borunun dış yüzeyindeki pürüzlülük elemanının yüksekliği; ℓ = Silindir borunun dış yüzeyine yerleştirilen (boru boyunca uzayan) kare kesitli çubuk şeklindeki pürüzlülük elemanları arasındaki boşluk mesafesi (yiv genişliği); e = Boru dış alt sınırının kanal tabanına olan düşey mesafesi; α = Boru boyu ekseninin yaklaşan akım doğrultusu (yönü) ile yaptığı açı (akımın yaklaşım açısı, permenan akım halinde). Akım ile ilgili büyüklükler: U = Silindir borunun membasındaki akımın hızı (boru eksen seviyesinde boruya yaklaşan akım hızı). Akışkan ile ilgili büyüklükler: ρ = Akışkanın (suyun) yoğunluğu; μ = Akışkanın dinamik viskozitesi; σ = Akışkanın yüzeysel gerilmesi; g = yerçekim ivmesi.

Bu çalışmada, su yüzeyinde dalganın olmadığı durum için deneyler yapıldığından yer çekimi ivmesi g (veya Froude sayısı) ve yüzeysel gerilme kuvvetleri çok küçük olduklarından yüzeysel gerilme σ (veya Weber sayısı) boyut analizine alınmayıp ihmal edilmişlerdir. Olaya etkileyen ve yukarıda belirtilmiş olan büyüklükler Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Sürüklenme kuvvetini etkileyen büyüklüklerin şekil üzerinde gösterimi (Parameters affecting the drag force)

Akım içerisinde bulunan bir boruya akımın uyguladığı sürüklenme kuvveti F_D ile bu kuvvetin bağlı olduğu değişkenler arasındaki fonksiyonel ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F_D = f_1(U, D, e, L_p, \ell, \varepsilon, \rho, \mu, \alpha) \quad (2)$$

Boyut analizi sonucu Eş.3'teki gibidir;

$$\frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 L_p D} = f_2\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{\ell}{D}, \frac{e}{D}, \frac{L_p}{D}, \alpha\right) \quad (3)$$

buradaki 1/2 katsayısı kasıtlı olarak konulmuştur (teorik direnç veya sürtünme kuvvetinin tarifini göz önüne alarak).

Bu ifade, $\text{Re} = UD/\nu = \text{Reynolds}$ sayısı, $\nu = \text{akışkanın kinematik viskozitesi}$, $\varepsilon/D = \text{izafi (relatif) pürüzlülük yüksekliği}$, $\ell/D = \text{izafi (relatif) pürüzlülük aralığı (yivli pürüzlülük için)}$, $F_D/(0.5\rho U^2 L_p D) = \text{boyutsuz sürüklenme (direnç) kuvveti olup direnç katsayısı olan } C_D \text{'ye eşittir [} C_D = F_D/(0.5\rho U^2 L_p D) \text{]}.$

Deneylerde esas amaç, boru dış cidar pürüzlülüğünün (izafi veya relatif pürüzlülüğün) akımın boruya uygulayacağı sürüklenme kuvveti üzerindeki etkisini incelemektir. Bütün deneylerde boru boyu eksenine akım yönüne dik $\alpha = 90^\circ$ (sabit) ve boru boyu $L_p = 20$ cm (sabit) tutulduğundan yukarıdaki Eş.3 ifadesi aşağıdaki gibi olur.

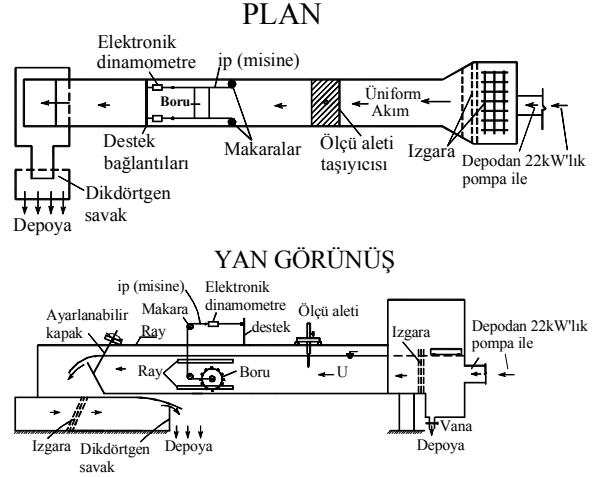
$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 L_p D} = f\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{\ell}{D}, \frac{e}{D}\right) \quad (4)$$

Bu ifadedeki ilişkiyi araştırmak için deneyler yapılmıştır.

5. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEYİN YAPILIŞI (EXPERIMENTAL SETUP and EXPERIMENTS)

Deneyel çalışmalarda hangi boyutsuz parametrelerin kullanılması gerektiği boyut analizi yöntemi ile bulunmuş ve Eş. 4'te belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 4'te gösterilmiştir. Yatay dikdörtgen bir kanalda, akıma dik olarak yerleştirilmiş olan bir boru (dış çapı 10.5 cm) üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneyde kullanılan yatay dikdörtgen açık kanalın boyu 5 m, genişliği 30 cm ve derinliği 50 cm'dir. Açık kanalın yanları ve tabanı camdan yapılmıştır. Deneyde kanala su, 22 kW gücünde santrifüj bir pompa ile yer altı deposundan alınarak verilmiş ve kanaldan çıkan su da tekrar yer altı deposuna gönderilerek suyun devir daimi sağlanmıştır.

Kanal başında bulunan ızgara sistemi, pompadan gelen suyun enerjisini kırarak suyun sakinleşip durgunlaşmasını ve böylece boruya yaklaşan kanal



Şekil 4. Deney düzeneği (ölçeksiz) (Experimental set-up, not to scale)

akımının üniform olmasını sağlamaktadır. Boru, kanal sonundan 2.5 m mesafede, kanal akımına dik olarak kanal tabanından yukarıda istenen yüksekliğe yatay olarak yerleştirilmiştir (Şekil 4).

Kanalın sonunda yer alan, yüksekliği ayarlanabilir kapak kullanılarak kanalda istenen su derinliği sağlanmıştır. Kanalın üzerinde bulunan ray üzerinde hareket eden tekerlekli seviye ölçüm aleti (limnometre) kullanılarak kanaldaki su seviyesi ve akım derinliği istendiğinde okunmuştur. Kanaldan geçen debi ise, kanal çıkışında bulunan 50 cm genişliğindeki bir dikdörtgen savak vasıtasıyla ölçülmüştür. Kanala su temin eden pompa ile kanalın bağlantısını sağlayan boru üzerinde bulunan bir ana vana kullanılarak kanala verilen suyun debisi ayarlanmıştır. Kanal sonundan ve dolayısı ile dikdörtgen savaktan çıkan su, pompanın bağlı bulunduğu yeraltı su deposuna geri gönderilerek suyun devir daimi sağlanmıştır.

Şekil 4'te görüldüğü üzere, kanalın sağ ve sol duvarlarının iç yüzeyine tespit edilmiş karşılıklı ve yatay (2 mm kalınlıkta metal levhadan oluşan) iki adet 70 cm uzunluğunda ray kızak yapılmıştır. Silindir borunun iki merkezine kaynak edilmiş 10 mm çaplı 4 cm boyunda iki adet mil ve sürtünmeyi azaltmak için bu millere geçirilmiş rulmanlar bulunmaktadır. Deneyde kullanılan borunun boyu 20 cm, dış çapı ise 10.5 cm'dir (pürüzlülük elemanı yüksekliği hariç). İstenen boyuttaki pürüzlülük elemanı deneyde kullanılacak olan borunun dış yüzeyine yapıştırılmıştır. Silindir boru, her iki sonunda bulunan mil uçlarına geçirilen 2 cm çapında rulmanlar vasıtasıyla yatay kızaklar üzerine oturtulmuştur. Böylece silindir borunun, serbestçe hareket etmesi sağlanmaktadır. Silindir borunun her iki sonundaki mile geçirilen yeterince kuvvetli, ince naylon iplikler (misine) kanal duvarlarının iç yüzeyine tespit edilmiş olan yatay eksenli makaralar vasıtası ile kanalın en üstüne tespit edilmiş makaralardan da geçirilerek yine kanal üzerine

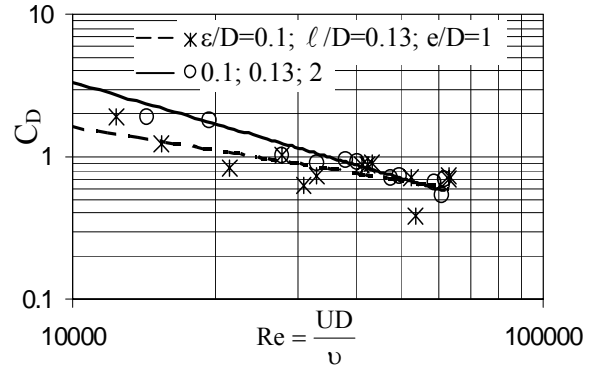
yerleştirilmiş olan karşılıklı iki “elektronik dinamometreye” bağlanmıştır (Şekil 4). Böylece akımın silindir boruya uyguladığı sürüklenme (direnç) kuvvetinin dinamometrelerle ölçümü sağlanmış olur. Dinamometrelerin hassasiyetlikleri ± 10 gram kuvvettir. Daha fazla açıklama Gündemir’in [12] çalışmasında verilmiştir.

Üzerine istenen boyutta ve aralıkta boyuna yivli pürüzlülük elemanı veya kum pürüzlülüğü ($\varepsilon = 5$ mm ve 10 mm yüksekliklerinde ve $\ell = 0.80$ cm ve 1.4 cm aralıkta) yapılandırılmış olan silindir boru, kanal tabanından istenen düşey mesafedeki ($e/D = 1$ veya 2) yatay kızaklar üzerine akım yönüne dik ve yatay olarak yerleştirilip dinamometrelerin sıfır okumaları alınmıştır. Pompadan kanala su getiren boru üzerindeki vana vasıtası ile kanala istenen debide su verilmiştir. Kanal sonundaki ayarlanabilir kapak vasıtası ile kanaldaki su derinliği ayarlanmıştır. Akım şartlarının permenan olması için bir müddet beklenmiştir. Daha sonra seviye ölçüm aleti “limnimetre” ile borunun memba tarafında yeterli uzaklıkta su seviyesi okuması yapıp boruya yaklaşan üniform akım derinliği ölçülmüştür. Dinamometrelerdeki kuvvetler okunarak boruya akımın uyguladığı toplam sürüklenme (direnç) kuvveti bulunmuştur. Dikdörtgen kanaldan geçen akımın debisi kanal sonunda bulunan 50 cm genişliğindeki dikdörtgen savak vasıtası ile hesaplanmıştır. Borunun membasında istenen derinlikteki akım hızı (boru eksen hizasındaki U hızı), küçük pervaneli bir hız ölçer (current meter) ile ölçülmüştür. Gerek kanaldan geçen debi, gerekse kanaldaki akım derinliği değiştirilerek yukarıdaki deney birkaç farklı akım durumu için yapılmıştır. Farklı pürüzlülükler ve borunun tabana olan farklı düşey mesafeleri için yukarıdaki deneyler tekrarlanmıştır.

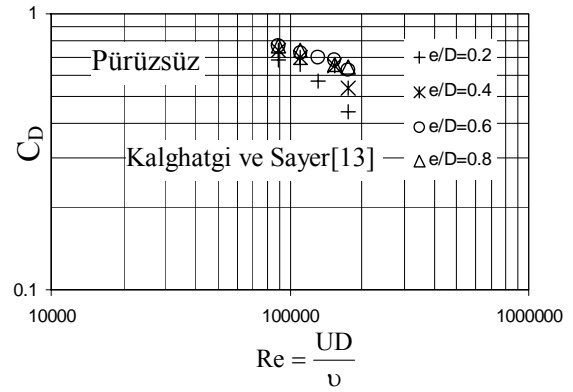
6. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ (ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESULTS)

Deneysel veriler kullanılarak [12] boyuna pürüzlülük (yivli) veya üniform kum pürüzlülüğüne sahip boruya, akımın uyguladığı sürüklenme (direnç) kuvveti hesaplanmış ve bu kuvvetin Reynolds sayısı ile nasıl değiştiği Şekil 5-7’de gösterilmiştir (normal oda sıcaklığında (20-25°C) suyun yoğunluğu ve kinematik viskozitesi sırasıyla $\rho = 1000$ kg/m³ ve $\nu = 1,02 \times 10^{-6}$ m²/s alınmıştır).

Şekil 5’de borunun tabandan olan düşey mesafesinin sürüklenme katsayısı C_D üzerindeki etkisi hem boyuna yivli pürüzlülük elemanına sahip hem de pürüzsüz bir boru için görülmektedir. Bu şekillerde görüldüğü üzere borunun tabandan olan düşey mesafesi, e/D arttığında küçük Reynolds sayılarında akımın boruya uyguladığı sürüklenme kuvveti artmaktadır. Reynolds sayısı arttıkça (akımın türbülanslılık derecesi arttıkça) sürüklenme kuvveti, borunun tabana olan mesafesi ile çok yavaş değişmektedir. Bunun sebebi, küçük e/D



(a)

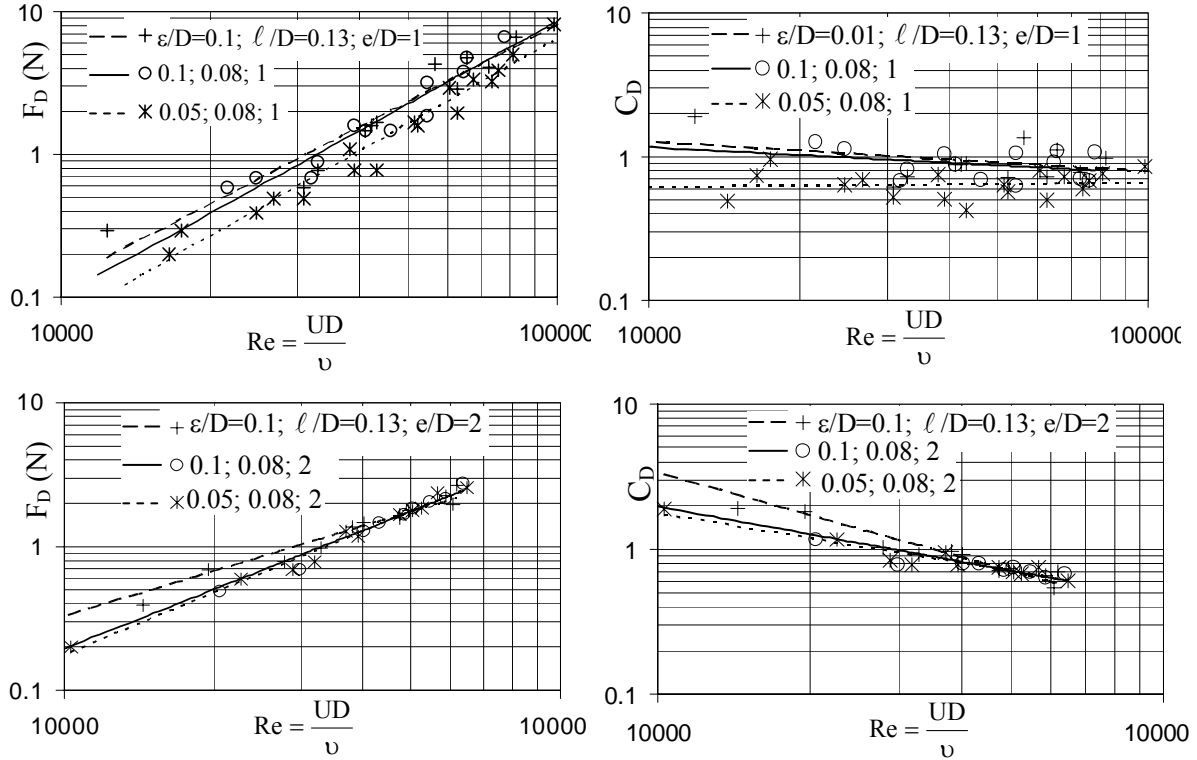


(b)

Şekil 5. Borunun tabana olan düşey mesafesinin sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi a) $\varepsilon/D=0.10$; $\ell/D=0.13$ b) Pürüzsüz boru (Kalghatgi ve Sayer, 1997) (The effect of vertical distance between pipe and the canal bottom on drag coefficient)

değerlerinde tabanın sönümlenme ve sürtünme etkisi nedeniyle borunun alt kısmındaki çevrintilerin zayıflaması ve böylece eksi (-) basınç bölgesinin küçülerek basınç kuvvetinin azalmasıdır. Borunun tabana olan düşey mesafesi (e/D), arttıkça ayrılma çevrinti bölgesi artar, eksi (-) basınç bölgesi büyür ve böylece basınç kuvveti (dolayısıyla sürüklenme kuvveti) artar.

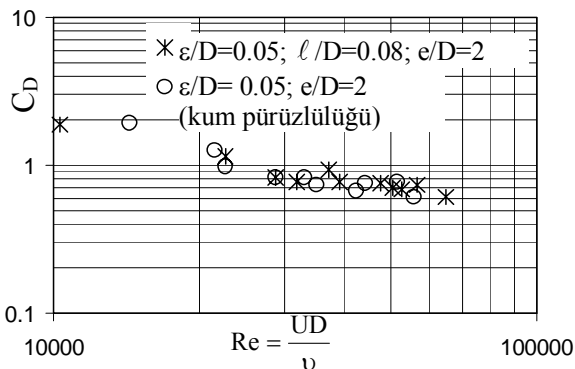
Şekil 6’da boru dış cidarındaki pürüzlülük yüksekliğinin ve boyuna pürüzlülük elemanları arasındaki uzaklığın boruya etkileyen sürüklenme kuvveti ve sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi farklı e/D mesafeleri için verilmiştir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere, Reynolds sayısı küçüldükçe boruya etkileyen sürüklenme kuvveti, pürüzlülük elemanı yüksekliği ile artmaktadır. Bunun sebebi boyuna pürüzlülük elemanının yüksekliği nedeniyle borunun akıma dik izdüşüm alanının küçük de olsa bir miktar artmış olmasıdır. Reynolds sayısı arttıkça, boruya etkileyen sürüklenme kuvveti pürüzlülük ile önemli bir değişim göstermemektedir. Bunun nedeni muhtemelen türbülanslı akımda ayrılma noktasının çok az yer değiştirmesi ve dolayısıyla silindir boru üzerinde eksi (-) basınç bölgesinin büyüklüğünde kayda değer bir değişimin olmamasıdır.



Şekil 6. Pürüzlülük yüksekliğinin ve pürüzlülük elemanları arasındaki mesafenin sürüklenme kuvveti ve sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi (The effects of longitudinal-groove roughness elements' height and the distance between two successive longitudinal-groove roughness elements on drag force and drag coefficient)

Aynı şekilde görüldüğü üzere boyuna yivli pürüzlülük elemanları arasındaki mesafe (yiv) genişliği (l/D) azaldığında sürüklenme kuvvetinde küçük bir düşüş olmaktadır. Bunun sebebi, birbirlerine yakın olan pürüzlülük elemanlarının yivlerinde oluşan küçük fakat çok sayıda çevrintinin sebep olduğu türbülansın sınır tabakasındaki akışkan elemanları daha etkin bir şekilde hızlandırması ve ayrılma noktasını mansaba doğru ötelemesi sonucunda silindirin dümen suyu çevrinti bölgesinin, diğer bir deyişle eksi (-) basınç bölgesinin küçülmesi ve böylece basınç kuvvetinin azalmasıdır.

Şekil 7'de üniform kum pürüzlülük ile aynı



Şekil 7. Üniform kum pürüzlülüğü ile boyuna yivli pürüzlülüğün sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi (The effects of longitudinal-groove roughness elements and uniform sand roughness on drag coefficient)

yükseklige sahip boyuna yivli pürüzlülüğün sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Söz konusu şekilde görüldüğü ki, aynı yükseklikteki kum pürüzlülük ile boyuna yivli pürüzlülük elemanının sürüklenme kuvveti üzerindeki etkileri karşılaştırıldığında kum pürüzlülüğe sahip boruya etkiyen sürüklenme kuvvetinin daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi "Sonuçlar" kısmında açıklanmıştır.

Bu çalışmada deneylerde kullanılan Reynolds sayıları ile uygulamadaki Reynolds sayılarını kıyaslamak amacıyla, Tablo 1'de pürüzsüz bir boru için uygulamada tavsiye edilen sürüklenme katsayıları farklı Reynolds sayı aralıkları için verilmiştir [14].

Bu çalışmadaki deneylerde kullanılan Reynolds sayısı aralığı ($1 \times 10^4 - 1 \times 10^5$) için uygulamada pürüzsüz bir

Tablo 1. Su altı boru hattı tasarımı için tavsiye edilen C_D katsayıları [14]

Re	C_D Sürüklenme katsayısı
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3
$5.0 \times 10^4 < Re < 1.0 \times 10^5$	1.2
$1.0 \times 10^5 < Re < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - \left(\frac{Re}{3 \times 10^5} \right)$
$2.5 \times 10^5 < Re < 5 \times 10^5$	0.7
$5.0 \times 10^5 < Re$	0.7

boru için tavsiye edilen sürüklenme katsayısı $C_D=1.2-1.3$ olduğu Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1. ve Şekil 5-6. karşılaştırıldığında boyuna yivli pürüzlülük elemanına sahip boru için sürüklenme katsayısının bu değerden daha düşük değerler aldığı görülmektedir.

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. Boru dış yüzeyine yerleştirilen boyuna yivli pürüzlülük elemanların ve üniform kum pürüzlülük elemanların akımın boruya uyguladığı sürüklenme kuvveti üzerinde etkili oldukları deneysel olarak gösterilmiştir.
2. Boyuna yivli pürüzlülük etkisi ile üniform kum pürüzlülüğünün etkileri karşılaştırılmıştır. Üniform kum pürüzlülüğü durumunda, akımda pürüzlülük elemanlarını geçerken oluşan çevrıntiler daha düzensiz, küçük ve çok sayıda olmaktadır. Bu ise, sınır tabakası içerisinde türbülansın artmasına, sınır tabakası içerisindeki akışkan moleküllerinin enerji kazanmasına ve sınır tabakasının ayrılma noktasının mansaba doğru kaymasına sebep olur. Böylece, borunun dümensuyu çevrinti bölgesi (wake-vortex region) küçüleceğinden boruya ait sürüklenme katsayısı C_D (veya sürüklenme kuvveti) daha az olur. Bunun yanında, üniform kum pürüzlülüğü, boyuna yivli pürüzlülük gibi boru boyunca devamlılık göstermediğinden, üniform kum pürüzlülüğü durumunda, borunun akıma dik iz düşüm alanı daha küçük olup boruya etkileyen sürüklenme kuvvetinin (yivli pürüzlülüğe göre) azalmasına sebep olmaktadır.
3. Borunun, tabana olan düşey mesafesi azaldıkça boruya etkileyen sürüklenme kuvveti azalmaktadır. Boru tabana yaklaştıkça, borunun alt kısmındaki akım hızının borunun üst kısmındaki akım hızından çok daha küçük olması ve borunun alt kısmında sınır tabakasının ayrılması nedeniyle oluşan dümensuyu çevrıntilerinin çok daha zayıf olması, (tabanın sürtünme ve sönümleme etkisi nedeniyle) borunun dümensuyu çevrinti bölgesinin küçülmesine ve böylece sürüklenme katsayısının C_D (veya sürüklenme kuvvetinin) küçülmesine sebep olur. Buna ek olarak, boru tabana yaklaştıkça boru hizasındaki akım hızı çok daha küçüleceğinden boruya etkileyen sürüklenme kuvveti de küçülür.
4. Yivli pürüzlülük durumunda büyük Reynolds sayılarında boruya etkileyen kuvvet, yiv genişliğiyle önemli sayılacak bir değişim göstermemektedir. Ancak, küçük Reynolds sayılarında yiv genişliği arttıkça (boyuna pürüzlülük elemanları arasındaki mesafe arttıkça) boruya etkileyen sürüklenme kuvveti (veya C_D) artmaktadır. Bunun sebebi, yiv genişliği arttıkça sınır tabakasının içerisindeki akımın daha

az türbülanslı olması ve sınır tabakasının içerisindeki akışkan moleküllerinin yeterince hız kazanamamaları nedeniyle sınır tabakası ayrılma noktasının membaya doğru kayması neticesinde C_D 'nin artmasıdır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

C_D	Sürüklenme katsayısı
D	Borunun dış çapı
e	Boru alt sınırı ile kanal tabanı arasındaki düşey mesafe
F_D	Sürüklenme (direnç) kuvveti
F_τ	Sürtünme direnç kuvveti
F_p	Net basınç kuvveti
g	Yer çekim ivmesi
ℓ	Yiv genişliği
L_p	Silindir borunun boyu
Re	Reynolds sayısı
U	Permenan akımda boruya yaklaşan kanal akım hızı
α	Akımın boruya yaklaşım açısı
σ	Akışkanın yüzeysel gerilmesi
ε	Pürüzlülük elemanının yüksekliği
ρ	Akışkanın yoğunluğu
μ	Akışkanın viskozitesi (dinamik viskozite)
ν	Akışkanın kinematik viskozitesi
τ	Sürtünme gerilmesi

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Teng, C.C. ve Nath, J. H., "Forces on Horizontal Cylinder Towed in Waves", **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE**, Cilt 111, No 6, 1022-1040, 1985.
2. Pranesh, M.R.R. ve Man, J.S., "Wave – Tubular Member – Wave and Current Interaction", **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE**, Cilt 115, No 6, 760-774, 1988.
3. Ballet, J.P. ve Hobbs, R.E., "Asymmetric Effects of Prop Imperfections on the Upheaval Buckling of Pipelines", **Thin-Walled Structures**, Cilt 13, No 55, 355-373, 1992.
4. Fredsoe, J. ve Sümer, B. M., "Bed Shear Stress Measurements over a Smooth Bed in Three-Dimensional Wave – Current Motion", **Coastal Engineering**, Cilt 20, No 34, 277-316, 1993.
5. Fredsoe, J. ve Sümer, B.M., "Sinking/ Floating of Pipelines and Other Objects in Liquefied Soil Under Waves", **Coastal Engineering**, Cilt 38, 53-90, 1999.
6. Fredsoe, J. ve Sümer, B.M., "Onset of Scour Below Pipelines and Self-burial", **Coastal Engineering**, Cilt 42, No 4, 313-335, 2001.
7. Wu Y.T. ve Riha, D.S., "Reliability Analysis of On-Bottom Pipeline Stability", **8th American Society of Civil Engineer Special Conference on Probabilistic Mechanics and Structural**

- Reliability**, University of Notre Dame, Chicago, 312-325, 23-26 Temmuz 2000.
8. Çokgör, S. ve Avcı, İ., “Hydrodynamic Forces on Partly Buried Tandem, Twin Pipelines in Current”, **Ocean Engineering**, Cilt 28, No 10, 1349-1360, 2001.
 9. Çokgör, S., “Hydrodynamic Forces on Partly Buried Cylinder Exposed to Combined Waves and Current”, **Ocean Engineering**, Cilt 29, No 7, 753-768, 2002.
 10. Çokgör, S. ve Avcı İ., “Forces on Partly Buried Tandem Twin Cylinders in Waves at Low Keulegan-Carpenter Numbers”, **Ocean Engineering**, Cilt 30, No 12, 1453-1466, 2003.
 11. Alexandrou A., **Principles Of Fluid Mechanics**, Prentice Hall, New Jersey, 2000.
 12. Gündemir, O., **Su Altı Borularına Etkiyen Kuvvetler**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
 13. Kalghatgi, S.G. ve Sayer, P.G., “Hydrodynamic Forces on Piggyback Pipeline Configurations”, **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, Cilt 123, No 1, 16-22, 1997.
 14. Mouselli, A.H., **Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods**, PennWell Books Company, 33-43, 1981.