



## Relationship of critical submergence with dimensionless quantities in deep well pumps

Nuri Orhan\*

Department of Agricultural Machinery and Technologies Engineering, Faculty of Agriculture, Selçuk University, 42100, Konya, Türkiye

### Highlights:

- Critical submergence in deep well shaft pumps
- Submergence and Froude number
- Depth and shape of vortex formation

### Keywords:

- Critical submergence
- Deep well pump
- Dimensionless quantities
- Froude number
- Vortex

### Article Info:

Research Article

Received: 18.03.2020

Accepted: 15.01.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.706122

### Correspondence:

Author: Nuri Orhan

e-mail:

nuriorhan@selcuk.edu.tr

phone: +90 332 223 2881

### Graphical/Tabular Abstract

The relationship between the relative critical submergence ( $Sc/D$ ) determined by the vacuum pressure measurement method and the Froude numbers of  $P_1$  and  $P_2$  pumps was analyzed. The results are illustrated in Figure A.

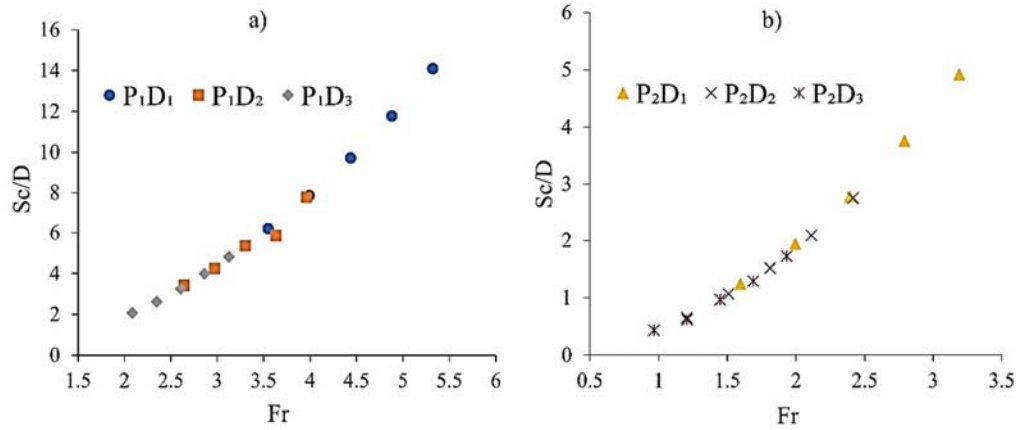


Figure A. Relationship between Froude and  $Sc/D$  for  $P_1$  pump (a) and  $P_2$  pump (b) models in the experiments

**Purpose:** In this study, it is aimed to relate the critical submergence in deep well pumps with Froude, Weber, and Reynolds numbers.

**Theory and Methods:** In this study, the critical submergence of 3" and 4" outlet shaft pumps with three different water inlet cross-sectional areas and five different flow rates were determined by the vacuum measurement method. Relative critical plunging depth and Froude number are compared with the equations of other researchers in the literature. In addition, the vortices formed at very low plunging depths of the pumps were photographed with a camera, and vortex types were determined.

**Results:** In all water inlet diameters of the pumps, critical submergence increased as the flow rate increased. At constant flow rates, the critical submergence decreased as the water inlet diameters increased. It was observed that the submergence at which the vortex occurred were smaller than the critical submergence. This indicates that the vortex occurs at submergence smaller than the critical submergence and the critical submergence is under assurance. An Equation was developed for the Froude number and relative critical submergence of the pumps according to Figure A. The  $R^2$  value of this equation is 0.996. As can be seen from Figure A, with the increase in Froude number, the value of the relative critical submergence also increases. In all physical models of  $P_1$  and  $P_2$  pumps, vortex formation depths vary between 20-70 mm and 20-145 mm, respectively. For the pump types, the vortex formation depth increased with the increase in Froude number. This is because the increase in the entry velocity of water into the pump increases the surface stress. Increasing the inlet area in the  $P_1$  pump decreased the  $W_{cr}$  (critical Weber) and  $Re$  values.  $W_{cr}$  and  $Re$  values were obtained as  $W_{cr}>1600$   $Re>3,1 \times 10^5$ ,  $W_{cr}>1100$   $Re>2,7 \times 10^5$  and  $W_{cr}>750$   $Re>2,4 \times 10^5$  for  $D_1$ ,  $D_0$  and  $D_2$  models respectively.  $W_{cr}$  and  $Re$  values obtained from  $P_2$  pump were determined as  $W_{cr}>790$   $Re>2,9 \times 10^5$ ,  $W_{cr}>500$   $Re>2,6 \times 10^5$  and  $W_{cr}>350$   $Re>2,3 \times 10^5$  for  $D_1$ ,  $D_0$  and  $D_2$  models respectively.

**Conclusion:** According to the dimensionless quantities used to determine the critical submergence of deep well pumps, it is appropriate to use the original models ( $D_0$  diameter) for both pumps ( $P_1$  and  $P_2$ ) analyzed in this study.



## Derin kuyu pompalarında kritik dalma derinliğinin boyutsuz büyüklükler ile ilişkisi

Nuri Orhan\*<sup>ID</sup>

Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, 42100, Selçuklu, Konya, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Derin kuyu milli pompalarda kritik dalma derinliği
- Dalma derinliği ve Froude sayısı
- Vorteks oluşum derinliği ve şekli

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 18.03.2020  
Kabul: 15.01.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.706122

### Anahtar Kelimeler:

Kritik dalma derinliği,  
Derin kuyu pompası,  
Boyutsuz büyüklük,  
Froude sayısı,  
Vorteks

### ÖZ

Bu çalışmada, derin kuyu pompalarındaki kritik dalma derinliği analiz edilmiştir. Genellikle belirli bir çapa sahip su girişleri ve santrifüj pompalarda önemli bir parametre olan kritik dalma derinliği, boyutsuz büyüklükler kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın yenilikçi yönü, farklı anma çapına sahip iki adet milli pompa için üç farklı su giriş ağız modelleri oluşturulması ve bu modellerin su giriş çapları ile ilişkilendirilerek kritik dalma derinliğinin boyutsuz büyüklükler yardımıyla tanımlanmasıdır. Pompaların kritik dalma derinliği vakum ölçüm yöntemiyle belirlenmiş, her bir modelin değişik debi değerlerindeki kritik dalma derinliği seviyesi, diğer araştırmacıların Froude sayısına bağlı dalma derinliği eşitlikleri ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın amacı, pompaların güvenilir bölgede çalışmasını sağlamak için pompaların kritik dalma derinliklerinin belirlenmesi ve bu derinliklerde geliştirilen akış modellerinin matematiksel eşitlikler yardımıyla kullanılmasıdır. Vortekslerin oluşum derinliği ve vorteks şekli üzerinde fiziksel modellerin etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Fiziksel modellerin  $P_1$  pompası için  $F_{cr}$  (kritik Froude sayısı)  $\leq 1,40$ ,  $P_2$  pompası için ise  $F_{cr} \leq 1,44$  olarak bulunduğu bu değerler, pompaların emme yüksekliği yüksekliğinin belirlenmesinde de kullanılabilir. Pompaların su giriş alanlarının artması ile kritik Weber sayısı ve Reynolds sayısı azalmaktadır. Vorteks oluşum derinliği dikkate alındığında, her iki pompa için orijinal ( $D_0$ ) fiziksel modellerin kullanılması uygun olacaktır. Sonuç olarak boyutsuz büyüklükler, derin kuyu pompalarının kritik dalma derinliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

## Relationship of critical submergence with dimensionless quantities in deep well pumps

### HIGHLIGHTS

- Critical submergence in deep well shaft pumps
- Submergence and Froude number
- Depth and shape of vortex formation

### Article Info

Research Article  
Received: 18.03.2020  
Accepted: 15.01.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.706122

### Keywords:

Critical submergence,  
Deep well pump,  
Dimensionless quantities,  
Froude number,  
Vortex

### ABSTRACT

In this study, the critical submergence of deep well pumps is analyzed. The critical submergence, which is an important parameter for centrifugal pumps and water intakes that usually have a certain diameter, is determined using dimensionless quantities. The innovative aspect of this study is that three different water inlet opening models are created for two shaft pumps with different nominal diameters, these models are related to the water inlet diameters and the critical submergence is defined using dimensionless quantities. The critical submergence of the pumps was determined using a vacuum measurement method and the critical submergence of each model at different flow rates was compared with Froude number dependent submergence equations developed by other researchers. The aim of this study is to determine the critical submergence of the pumps and to use the flow models developed at these depths with the aid of mathematical equations to ensure the operation of the pumps in the reliable zone (vortex-free). The physical models were found to be effective for vortex formation depth and vortex shape. The physical models found  $F_{cr}$  (critical Froude number)  $\leq 1.40$  for pump  $P_1$  and  $F_{cr} \leq 1.44$  for pump  $P_2$ , these values can also be used to determine the suction lift of the pumps. The critical Weber and Reynolds numbers decrease as the water suction area of the pumps increases. Considering the depth of vortex formation, it would be appropriate to use the original ( $D_0$ ) physical models for both pumps. As a result, dimensionless quantities can be used to determine the critical submergence of deep well pumps.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : nuriorhan@selcuk.edu.tr / Tel: +90 332 223 2881

## 1. Giriş (Introduction)

Pompaların girişinin düşük su seviyelerine yerleştirilmeleri veya su seviyelerindeki azalmalar vorteks oluşumlarına ve sürüklenen havanın içeri girmesine neden olabilir. Ayrıca olumsuz akış koşullarında da sıklıkla vorteksler görülebilir.

Pompa girişinden vorteksler ile birlikte hava girmesi, pompa çarkında kavitasyona sebep olacağından pompa performansını olumsuz etkiler [1, 2]. Kavitasyon pompaların hidrolik performansını etkilediği gibi, titreşimli ve gürültülü çalışmasına da sebep olur. Pompa yüzeyinde meydana gelen kavitsyon, metal aşınmasına neden olacaktır. Yüzey erozyonu, pompa verimliliğini azaltır ve yüksek bakım maliyetlerine neden olur [3]. Yüksek devirli santrifüj pompalar, yüksek dönme hızlarından dolayı sıradan santrifüj pompalardan daha fazla kavitasyona eğilimlidir [4]. Yetersiz dalma derinliği sonucunda olabilecek vorteksi ve kavitasyonu önlemek için pompa girişinin belirli bir su seviyesinin altına yerleştirilmesi gerekir.

Derin kuyu pompaları yer altından emilen suyu genellikle tarımsal sulama amaçlı kullanılmak üzere yer yüzeyine çıkarmaktadır. Derin kuyu pompa tesisatı ile ilgili yükseklik tanımları, Şekil 1'de verilmiştir. Pompa su giriş girişi ile dinamik su seviyesi arasındaki düşey yükseklik, dalma derinliği (S) olarak sembolize edilmiştir. Pompa dalma derinliği, kritik dalma derinliği ( $S_{cr}$ ) seviyesinden daha düşük seviyeye yerleştirildiğinde vorteks oluşma riski çok daha yüksektir. Dolayısıyla, pompalar için kritik dalma derinliğinin belirlenmesi ve boyutsuz büyüklükler ile ilişkilendirilmesi önemlidir.

Kritik dalma derinliği açık kanallarda veya tanklarda genellikle ampirik eşitlikler ile hesaplanmaktadır. Genellikle araştırmacılar bağlı kritik dalma derinliğini ( $S_{cr}/D$ ) Froude ( $Fr$ ) sayısının fonksiyonu olarak ifade etmişlerdir [5, 7-9].

Khanarmuei, vd. [6] çalışmasında, farklı boru açıklarındaki su girişi için Froude sayısına bağlı olarak Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3'deki denklemleri önermişlerdir.

$$S_{cr}/D = 4,44 Fr^{0,859}, \varphi=90^\circ \quad (1)$$

$$S_{cr}/D = 4,2 Fr^{0,869}, \varphi=45^\circ \quad (2)$$

$$S_{cr}/D = 4,21 Fr^{1,351}, \varphi=0^\circ \quad (3)$$

Möller vd. [10] çalışmalarında, kritik dalma derinliğini Eş. 4'deki denklem ile ifade etmişlerdir.

$$S_{cr}/D = -2,5 \times Fr^{-0,45} + 5,3 \quad (4)$$

Amphlett [11] ise çalışmasında kritik dalma derinliğini Eş. 5'e göre hesaplamıştır. Burada c değeri: 3,3 ile 3,95 arasında bir katsayıdır.

$$S_{cr}/D = c \times Fr^{0,5} - 0,5 \quad (5)$$

Ott [12], Eswaran vd. [13], kritik dalma derinliğine ait ilişkiyi sırasıyla Eş. 6 ve Eş. 7 denklemleri ile vermişlerdir.

$$S_{cr}/D = 0,5 + 2Fr \quad (6)$$

$$S_{cr}/D = 0,44 Fr^{0,53} \quad (7)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde yazarlar, boru giriş çapı (D), boru girişindeki Froude sayısı ( $Fr$ ) olmak üzere bağlı kritik dalma

derinliğini Forude sayısını ile ilişkilendirmişlerdir. Forude sayısı ise Eş. 8'deki denklemde verilmiştir. Burada (v) boru girişindeki ortalama su hızı, (g) yer çekim ivmesidir.

$$Fr = v/(gD)^{0,5} \quad (8)$$

Belirli bir çapa sahip su girişindeki D çapı doğrudan hesaplanabilir. Ancak belirli bir çapa sahip olmayan su girişindeki kesit alanlarında ise dikkate alınacak D çap değeri bulunmamaktadır. Bu çalışmada kullanılan pompaların, su girişinde belirli bir çap değeri bulunmamaktadır. Araştırmacılar, dalgıç veya milli pompalar için Forude ve dalma derinliği hesaplamalarında, pompa çark çıkış çapını (D) kullanmışlardır [15]. Ancak literatürde, kritik dalma derinliği, su giriş alanı ile hesaplanmıştır. Bu çalışmanın bir diğer özgün yönü, pompaların giriş kısmında kesit alanına sahip fiziksel modellerin çap ile ilişkilendirilmesidir. Böylece, fiziksel modellerin dalma derinliği sadece giriş alanı ile tanımlanmıştır.  $F_{cr}$ , kritik Froude sayısı, S dalma derinliği olmak üzere bazı araştırmacılar tarafından tanımlanan bir diğer ilişki Eş. 9'da verilmiştir [10, 15].

$$F_{cr} = v/(gS)^{0,5} \quad (9)$$

Weber sayısı, atalet kuvvetleri ile yüzeydeki gerilme kuvvetleri arasındaki ilişkiyi inceleyen boyutsuz bir büyüklüktür. Literatürde, Weber sayısını kritik dalma derinliği ile ilişkilendiren çalışmalar bulunmaktadır. Keihanpour and Kabiri-Samani [16]  $W > 120$  ise Weber sayısının kritik dalma derinliğini etkilemediğini açıklamışlardır. Weber sayısının  $600 < W < 9000$  aralığında kritik dalma derinliği üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır [9, 17]. Weber  $> 600$  ve Reynolds  $> 7,7 \times 10^4$  olduğunda, yüzeydeki gerilme ve akışkanın vizkozitesi ihmal edilebilir [6, 18]. Jones vd. [19] minimum Reynolds ve Weber sayılarının sırasıyla  $3,10^4$  ve 120 olması gerektiğini bildirmişlerdir. W, weber sayısı (-), v, su giriş hızı ( $m s^{-1}$ ),  $\rho$ , sıvı yoğunluğu ( $kg m^{-3}$ ),  $\sigma$ , su yüzey gerilimi ( $kg m^{-1}$ ) olmak üzere Weber sayısı, Eş. 10 kullanılarak hesaplanır [6, 20, 21].

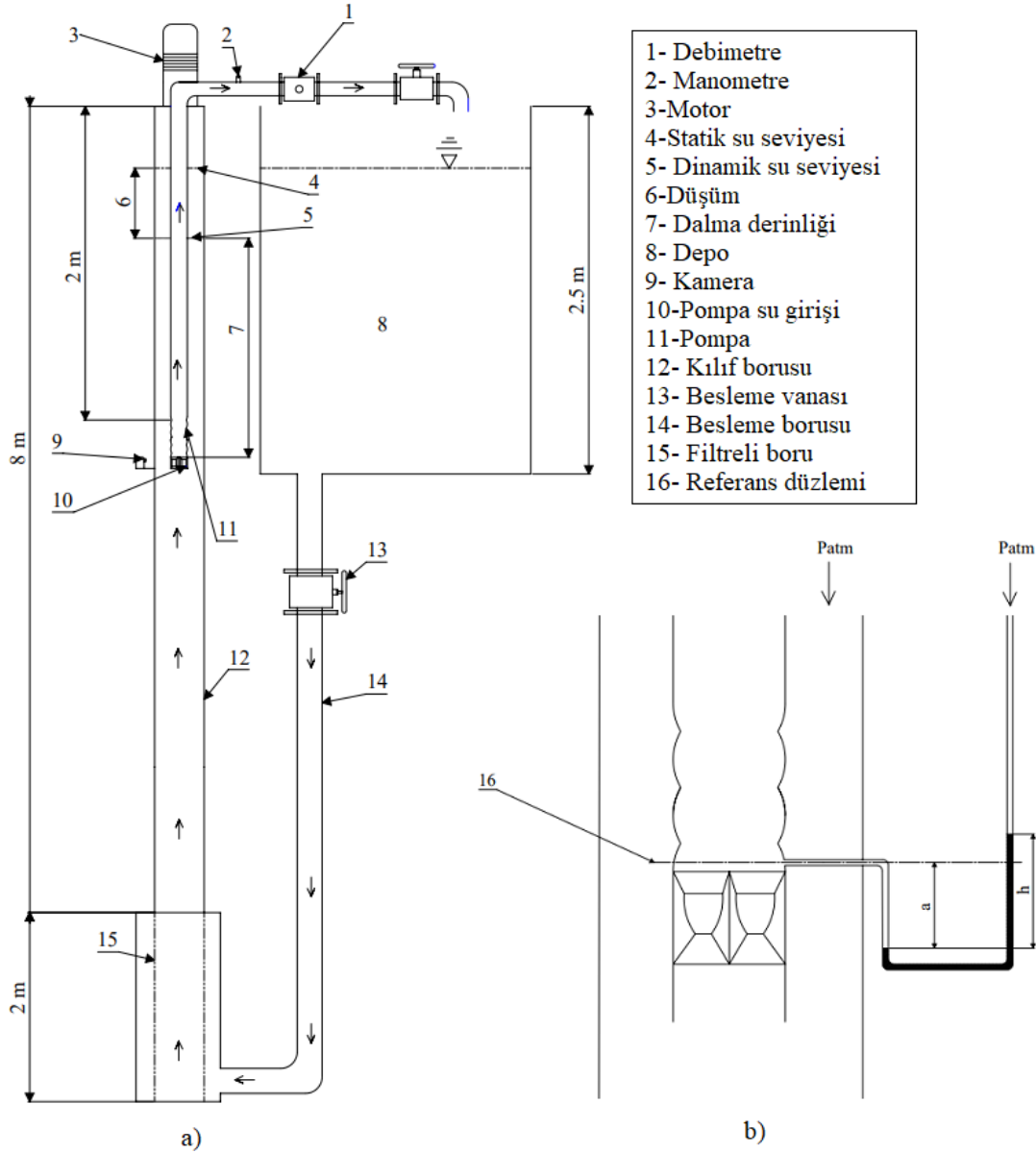
$$W = \rho D v^2 / \sigma \quad (10)$$

$W_{cr}$  kritik Weber sayısı (-), S dalma derinliği (m) olmak üzere kritik dalma derinliğindeki su seviyesi için Weber sayısı, Eş. 11 kullanılarak hesaplanmaktadır [23]. Elde edilen Weber sayısı, yüzey gerilmesinin ve vorteks oluşumunun belirlenmesi için önemli bir büyüklüktür.

$$W_{cr} = v(\rho S / \sigma)^{0,5} \quad (11)$$

Boyutsuz sayıların kritik değerleri, akış tipinin, akış büyüklüğünün tanımlanması ve vorteks oluşumunun önlenmesi için kritik dalma derinliğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kritik dalma derinliği, özellikle derin kuyu pompalarının kuyulara monte edilmesi işleminde önemli parametrelerden birisidir.

Bu çalışmanın amacı, derin kuyu pompalarındaki kritik dalma derinliğinin boyutsuz büyüklükler ile belirlenmesidir. Literatürde, derin kuyu pompalarında kritik dalma derinliklerinin boyutsuz büyüklükler ile ilişkilendirilmesine ait bilgi bulunmamaktadır. Vorteks oluşumlarının engellenmesi için önemli bir parametre olan kritik dalma derinliği, genellikle açık kanallar veya tanklardaki farklı giriş çaplarında modeller kullanılarak boyutsuz büyüklükler ile ilişkilendirilmiştir. Bu çalışmada 3" ve 4" çıkışlı milli pompaların üç farklı su giriş kesit alanında ve beş farklı debi değerlerinde vakum ölçüm yöntemine göre kritik dalma derinlikleri belirlenmiştir. Pompaların farklı su giriş kesit alanlarındaki emme haznelere giriş boru çapına benzetimi ile kritik dalma derinliklerinin Froude, Weber ve Reynolds sayıları ile ilişkilendirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 1. Test ünitesinin genel ölçüleri (a) ve U tipi manometre ölçüm düzeneği (b)  
 (General dimensions of the test unit (a) and U type manometer measurement device (b))

## 2. Deneysel Metot (Experimental Method)

### 2.1. Materyal (Material)

Deneyler, Şekil 1’de gösterilen derin kuyu test ünitesinde, Selçuk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilmiştir.

Derin kuyu simülasyonu ile oluşturulmuş test ünitesi, bileşik kaplar prensibine göre çalışmaktadır. Şekil 1a’ da gösterilen test düzeneği, 15 m<sup>3</sup> hacminde sac depo (8), 2 m uzunluğunda 300 mm çapında filtreli boru (15), 4 m uzunluğunda, 300 mm çapında kılıf borusu ve 4 m uzunluğunda 300 mm çapında mika borudan oluşmaktadır (12). Deneylerde kullanılan 3"(P<sub>1</sub>) ve 4" (P<sub>2</sub>) çıkışlı milli pompaların teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir [23]. Denemelerde kullanılan ölçüm cihazlarının teknik özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1 Pompaların teknik özellikleri  
 (Technical features of shaft pumps)

Teknik özellikler	P <sub>1</sub> (3" çıkışlı)	P <sub>2</sub> (4" çıkışlı)
Pompa anma çapı (mm)	78	105
Pompa gövdesi (TSE EN 1591)	Dökme demir	Dökme demir
Çark	Prinç	Prinç
Mil	Paslanmaz çelik	Paslanmaz çelik
Mil çapı (mm)	25	25
Kademe sayısı	2	1
Çark Kanat sayısı	5	5
Kanat kalınlığı (mm)	5	5
Çark çıkış çapı (mm)	93,5	136
Kanat çıkış genişliği (mm)	15	16

**Tablo 2.** Ölçüm cihazlarının teknik özellikleri (Technical characteristics of measuring devices)

Cihaz	Teknik özellikler
Debimetre	S MAG 100 TİP, DN 80-100 flanş bağlantılı elektromanyetik debimetre, 220 V beslemeli dijital göstergeli, anlık debi, yüzde akış ve toplam gösterimli. Ayarlanabilir 4-20 m/A plus ve frekans çıkışlı. Ölçüm hatası %0,5, 16 bar çalışma basıncı, 9-282 m <sup>3</sup> /saat ölçüm aralığı, ölçüm doğruluğu ± 0,5 %, Opsiyonel: ± 0,2 %.
Manometre Su seviye ölçer	WİKA model PSD-4, 0-10 bar, Alttan Bağlantılı, 4-20 m/A çıkışlı, ölçüm doğruluğu ± 0,5 %, Hydrotechnik marka, 010 tip/1,5 V, 150 m'lik ölçeklendirilmiş kablolu, ses ve ışık ikazlı tip.
Sıcaklık sensörleri	Turck marka, 10-24 VDC, -50...100°C, 4-20mA çıkışlı, hassasiyet ± 0,15°C, Yanıt süresi 0,2 m/s'de su içerisinde t <sub>0,5</sub> = 3,5 s/t <sub>0,9</sub> = 9,5 s
Kamera	Kamera; 1080p HD Sensor, 720p HD video
Bilgisayar	Asus intel core i7, Ram (Sistem Belleği) 12 GB, işlemci 4 çekirdek, işlemci hızı 1.4 GHz

Pompa çalıştırıldığında depodan (8) besleme borusuna (14) gelen su, filtreli borudan (15) geçerek kılıf borusu (12) içerisinden pompanın su giriş haznesine (10) ve tekrar depoya aktarılmaktadır (Şekil 1a).

Giriş basıncı, pompaların emme haznesine yerleştirilen U tipi civalı manometre ile ölçülmüştür. Şekil 1b' de gösterilen U tipi civalı manometre, 6 mm çapında ve 2 m uzunluğunda şeffaf borudan oluşmaktadır. Ölçülen verilerin ortalama değerleri ve standart hataları örnek olarak Tablo 3'de P<sub>1</sub> pompasının D<sub>1</sub> çapı ve P<sub>2</sub> pompasının D<sub>0</sub> çapı için verilmiştir.

**Tablo 3.** Ölçülen verilerden örnek olarak P<sub>1</sub>D<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub>D<sub>0</sub> modellerine ait ortalama ve standart hata değerleri  
(For example, the mean and standard error values of models P<sub>1</sub>D<sub>1</sub> and P<sub>2</sub>D<sub>0</sub> from the measured data)

	Q (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	S (cm)	Δ (cm)	Pb (kPa)	Pe(kPa)
P <sub>1</sub> D <sub>1</sub>	40,10±0,008	158,2±0,26	29,7±0,26	143,27±0,18	11,18±0,025
	40,13±0,01	136,9±0,17	51,0±0,17	141,39±0,11	9,14±0,017
	40,19±0,001	13,0±0,09	174,9±0,09	129,75±0,17	-3,05±0,009
	40,01±0,008	3,0±0,075	184,9±0,075	128,65±0,17	-4,01±0,008
	39,08±0,008	2,0±0,1	185,9±0,1	126,65±0,3	-3,65±0,01
P <sub>2</sub> D <sub>0</sub>	59,63±0,016	117,37±0,3	70,63±0,3	129,34±0,17	9,4±0,08
	60,05±0,018	74,98±0,32	113,02±0,32	124,97±0,23	7,38±0,018
	59,99±0,023	36,03±0,23	151,96±0,23	122,42±0,2	5,21±0,012
	59,98±0,015	10,05±0,11	177,95±0,11	112,78±0,21	-4,97±0,017
	60,04±0,017	4,53±0,22	183,46±0,22	113,39±0,2	-5,16±0,004
	57,24±0,1	2,10±0,08	185,89±0,08	112,06±0,17	-4,79±0,014

## 2.2. Metot (Method)

Ölçülen verilerin kayıt edilmesi için yazılım ve otomasyon sistemi geliştirilerek sensörlerden gelen veriler wireless kart sistemi ile bilgisayara aktararak merkezi işlem biriminde toplanan sensör verileri arayüz aracılığıyla operatör tarafından istenilen aralıkta ve uygun isimlerle kaydedilmiştir. Kayıt işlemi her bir sensörden saniyede bir adet veri alacak şekilde oluşturulmuş ve pompa kararlı duruma ulaştıktan sonra kayıt işlemi başlatılmıştır. P<sub>1</sub> pompası 40-45-50-55-60 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, P<sub>2</sub> pompası ise 40-50-60-70-80 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> debi değerlerinde çalıştırılmıştır. Pompanın farklı giriş kesit alanlarında kritik dalma derinliğini belirlemek için 5 farklı debi değerinde 5 ile 7 farklı dinamik su seviyesinde ölçümler yapıldı. Deneysel çalışma yapılan işlemlerin şematik planı Şekil 2' de gösterilmiştir.

Pompa çalışma karakteristiklerinin ölçümleri ve hesapları TS EN ISO 9906 standardı referans alınarak yapılmıştır [24] Pompaların su emme hazneleri 1880 mm sabit su yükü altına yerleşecek şekilde monte edildikten sonra pompaların farklı debilerde elde edilen düşüm (Δ) değerleri mm olarak ölçülerek, Eş. 12 yardımıyla dalma derinlikleri hesaplanmıştır.

$$S=1880-\Delta \quad (12)$$

Pompalarda farklı su giriş alanları oluşturmak için emme haznesi değiştirilmiştir. Şekil 2b'de verilen orjinal emme haznesi hiç değiştirilmeden Şekil 2a'da ki gibi genişletilmiş kesit alanı için farklı bir emme haznesi kullanılmıştır. Bu hazneye bir halka takılarak Şekil 2c' deki gibi azalmış kesit alanı elde edilerek bir pompa için 3 farklı su giriş kesit alanı oluşturulmuştur. P<sub>1</sub> pompasına ait emme haznesi kullanım dizisi Şekil 3'de gösterilmiştir. P<sub>2</sub> pompası için benzer yöntem ile emme hazneleri hazırlanmıştır. Böylelikle P<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub> pompalarının her biri için üç farklı su giriş alanı elde edilmiştir. P<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub> pompalarının emme haznelerinin su giriş kesit alanları Tablo 4'de verilmiştir.

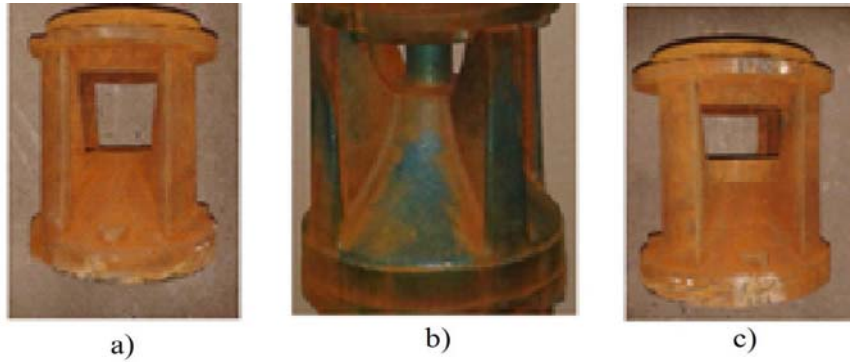
**Tablo 4.** Fiziksel modellerde su giriş kesit alanları (mm<sup>2</sup>)  
(Water inlet cross-sectional areas of physical models)

Pompa	D <sub>1</sub> (%20% küçük)	D <sub>0</sub> (Orjinal)	D <sub>2</sub> (%20 büyük)
P <sub>1</sub>	3800	4800	5800
P <sub>2</sub>	7200	9000	10800

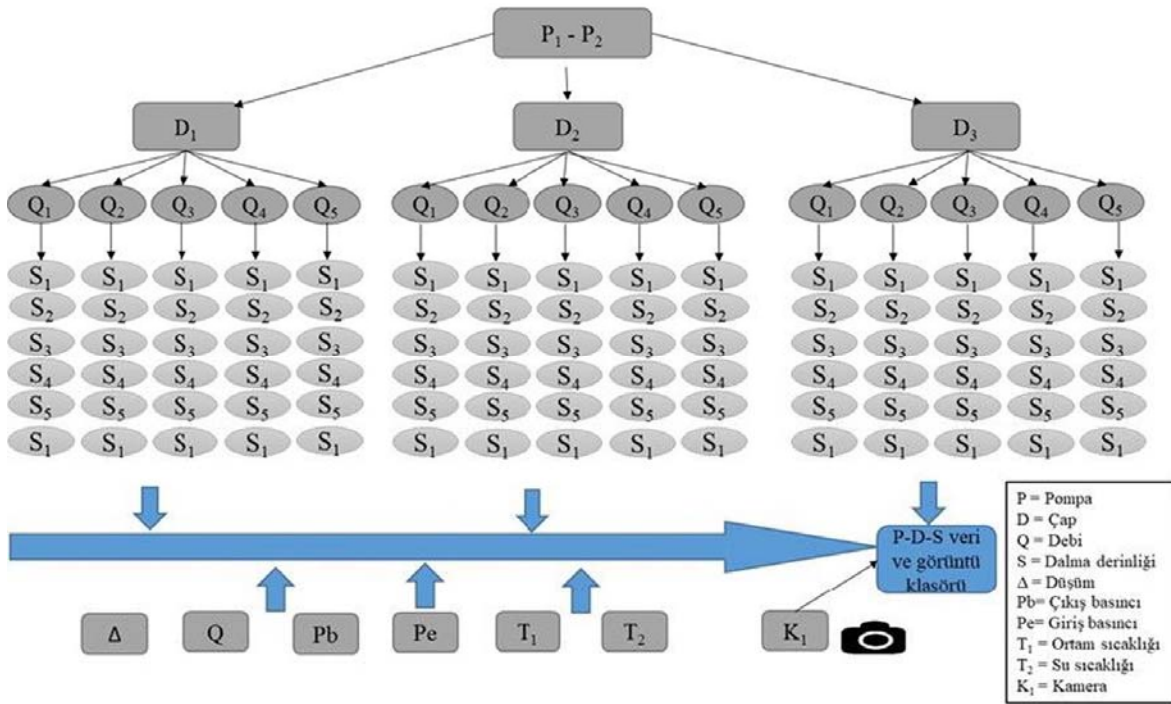
### 2.2.1. Kritik dalma derinliğinin belirlenmesi (Determination of critical submergence)

Kritik dalma derinliğinin (Sc) belirlenmesinde Orhan [25] tarafından geliştirilen vakum ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde göre kritik dalma derinliği, pompa vakum basıncı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Vakum basıncı, emme haznesine yerleştirilen civalı diferansiyel manometre ile ölçülmüştür. Pompalar çalıştırılmadan önce su yüküne göre değişen civa seviyesi (h), U diferansiyel manometresinin sağ kolunda en üst seviyededir. Pompalar çalıştırıldıktan sonra azalan dalma derinliği ile birlikte h seviyesi de azalmaktadır (Şekil 1b). Yani U manometresinin kollarındaki civa pozitif yönden (sağ kol) negatif yöne (sol kol) doğru geçmektedir. Pompaların dalma derinliği sürekli azaltılarak manometre kollarındaki civa seviyesi eşitlenmektedir. Bu eşitlenen nokta kritik dalma derinliği olarak belirlenmiştir. Kritik dalma derinliğinin belirlenmesinde pompaların sabit debi ve sabit su giriş kesiti kombinasyonunun beş farklı dalma derinliğinde vakum basınçları alınmıştır. Bu basınçlar ile dalma derinliği değerleri arasında doğrusal regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Bu denklemlerden vakum basıncının 0 (sıfır/eşit) değerini aldığı noktanın dalma derinliği seviyesi kritik olarak belirlenmiştir. Bu uygulama, pompaların diğer debi ve giriş kesit alanlarının her birinde denenmiş ve kritik dalma derinlikleri belirlenmiştir. Vakum basıncını (P<sub>e</sub>) hesaplamak için kullanılan Eş. 13'te civa yoğunluğu ρ<sub>m</sub> =13600 kg/m<sup>3</sup> ve yer çekim ivmesi 9,81 m/s<sup>2</sup> olarak alınmış, h ve a seviyeleri (Şekil 1b) U diferansiyel manometresinden mm olarak ölçülmüştür.

$$P_e = \frac{\rho_m g(h/1000) - \rho_m g(a/1000)}{1000} \quad (\text{kPa}) \quad (13)$$



**Şekil 2.** P<sub>1</sub> pompasında elde edilen farklı fiziksel modeller ( a) %20 genişletilmiş emme haznesi, b) orijinal emme haznesi, c) %20 daralmış emme haznesi)  
(Different physical models obtained in P<sub>1</sub> pump ( a) magnified intake chamber 20%, b) original intake chamber, c) reduced intake chamber 20%)

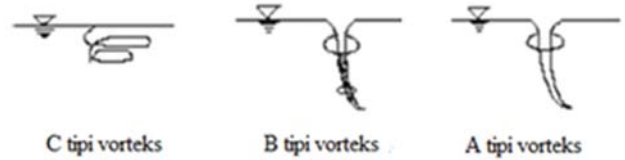


**Şekil 3.** Deney tasarımı (Experiment design)

### 2.2.2. Vorteksin belirlenmesi (Determination of vortex)

Vorteks oluşumu, hidrolik makinelerde karşılaşılan ve istenmeyen bir durumdur. Emme haznesinin geometrik yapısı, vorteks oluşumunu etkileyen en önemli parametrelerden birisidir [7]. Çalışma da vorteks oluşum derinliklerinin belirlenmesi için pompa dalma derinliği seviyesi düşürülmüştür. Bir başka ifade ile pompa giriş ağız eksenine ile su seviyesi arasındaki mesafe Şekil 1a'da besleme borusu üzerindeki 2 numaralı vana ile kontrollü olarak düşürülmüştür. Vananın kısılması sırasında su hareketi gözle sürekli kontrol edilmiş ve Şekil 4'de gösterilen vorteks tiplerinden herhangi birinin tespit edilmeye başlandığı seviyede mika borunun dışına bağlanmış kamera ile kayıtlar alınmıştır. Kayıt işlemi bittikten sonra 2 numaralı vana ile dalma derinliği tekrardan yavaş bir şekilde düşürülmüş ve gözlenen vorteks ile tekrar farklı bir kayda başlanmıştır. Bu şekilde pompa dalma derinliğinin 1-2 cm seviyelerine kadar işlemler tekrarlanmıştır. Vorteks görüntüleri bilgisayarda incelenerek Şekil 4'e göre vorteks tipleri belirlenmiştir [26]. Bu vorteks tiplerinden herhangi birinin ilk görüldüğü seviye

vorteks dalma derinliği (Sv) olarak isimlendirilmiştir. Vorteks tipleri ve bağlı vorteks dalma derinlikleri (Sv/D), P<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub> pompalarının farklı giriş çaplarının her bir debi değeri için tespit edilmiş ve Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Vorteks tipleri [26] (Vortex types)

Görüntülenen vorteks oluşumlarına örnek olarak Şekil 5'de, P<sub>1</sub> pompasının D<sub>1</sub> çapında 50 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> debi değerinde ve 40 mm dalma derinliğinde oluşan A tipi vortex oluşum şekli verilmiştir. Pompaların diğer fiziksel modellerinde de benzer şekilde görüntüler alınarak vorteksler sınıflandırılmıştır.

Bu çalışmada, Freude sayısı Eş. 8, kritik Froude sayısı Eş. 9, Weber sayısı Eş. 10, kritik Weber sayısı Eş. 11, Reynolds (Re) sayısı ise Eş. 14'e göre hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (14)$$

Eş. 14'de, v: su giriş hızı ( $m s^{-1}$ ), D: çap (m),  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesi ( $kg.ms$ )'dir.

### 2.3. Farklı Su Giriş Kesit Alanına Sahip Pompa Emme Haznesinin Su Giriş Anma Çapına (D) Benzetimi (Association of Pumps with Different Water Inlet cross-sectional area with Diameter (D))

Bu çalışmada farklı giriş kesit alan ve şekline sahip pompaların emme hazneleri su giriş çapına (D) benzetim yapılarak kritik dalma derinliği ve boyutsuz büyüklükler arasındaki ilişkilerin incelenmesi amaçlanmıştır. Institute [14]'deki çalışma, derin kuyu pompalarında, Froude sayısı ve dalma derinliğinin pompa çıkış çapına göre belirlenmesini tavsiye etmiştir. Çünkü derin kuyu pompaları tasarımlarından dolayı su emme hazneleri dairesel yapıya sahip olmadığı için pompa çıkış çapının alınmasını önermişlerdir. Froude sayısı formülündeki D çapının derin kuyu pompalar ile ilişkisini pompa çıkış çapına göre ifade etmişlerdir. Ancak çalışmaların

birçoğunda ise Froude sayısı ve dalma derinliği arasındaki ilişkinin belirlenmesinde dairesel yapıya sahip giriş boru çapları kullanılmışlardır. Çünkü Froude, Weber ve Reynolds formüllerindeki D boru çapı olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan pompaların su giriş hazneleri dairesel yapıya sahip boru çapı olmadığı için, su emme hazne alanları çap olarak dönüştürülmüştür.

P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub> Pompalarının giriş kesit alanları için A giriş kesit alanı ( $mm^2$ ) olmak üzere Eş. 15 kullanılarak çap değeri D (mm) olarak hesaplanmıştır. Buna göre, P<sub>1</sub> pompası için hesaplanan D<sub>1</sub>-D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> su giriş çapları sırasıyla 69,5 – 78,2 ve 86 mm, P<sub>2</sub> pompası için ise D<sub>1</sub>-D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> su giriş çapları sırasıyla 95,7-107 ve 117 mm' dir.

$$D = \sqrt{\frac{A \cdot 4}{\pi}} \quad (15)$$

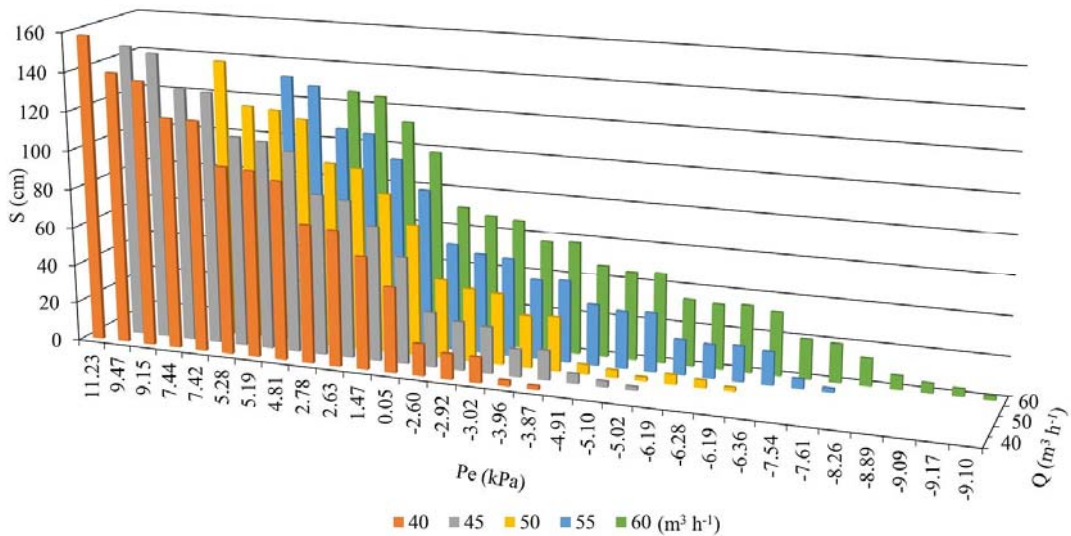
### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

#### 3.1. Pompaların Kritik Dalma Derinlikleri (Critical Submergence of Pumps)

Pompaların kritik dalma derinlikleri, her bir debi değeri için dalma derinliği değişimine bağlı olarak oluşturulan grafikler ile belirlenmiştir. Örneğin, P<sub>1</sub> pompasının D<sub>1</sub> giriş çapına ait sabit debi



Şekil 5. B tipi vortekse ait bir görüntü (An image of type B vortex)



Şekil 6. P<sub>1</sub> pompasının D<sub>1</sub> giriş çapında farklı debi değerlerinde giriş basıncı ve dalma derinliği arasındaki ilişki  
(The relationship between the inlet pressure and the submergence at different flow rates of the P<sub>1</sub> pump with inlet diameter D<sub>1</sub>)

değerlerindeki vakum basıncı ve farklı dalma derinliği (S) arasındaki ilişki Şekil 6'da verilmiştir. Sabit debi değerinde dalma derinliği düştüğünde, vakum basıncı sıfıra yaklaşmaktadır. Vakum basıncının sıfır olduğu noktadaki dalma derinliği seviyesi kritik dalma derinliği (Sc) olarak belirlenmiştir. Kritik dalma derinliği, her bir debi değerine karşılık gelen dalma derinliği ve vakum basıncına göre oluşturulan doğrusal regresyon denklemleri ile hesaplanmıştır. P<sub>1</sub> pompasının D<sub>1</sub> giriş çapında tüm debi değerlerinin vakum basıncı ve dalma derinliğine bağlı doğrusal regresyon denklemleri Tablo 5'de verilmiştir. P<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub> pompalarının D<sub>1</sub>, D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> giriş çaplarına ait kritik dalma derinliklerinde benzer yöntemle bulunmuştur. Pompaların farklı giriş çaplarına ait kritik dalma derinlikleri ve vorteks dalma derinlikleri (Sv) Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 5.** P<sub>1</sub> pompasının D<sub>1</sub> giriş çapında vakum basıncı ve dalma derinliği arasındaki doğrusal regresyon denklemleri (Linear regression equations between vacuum pressure and submergence at of pump P<sub>1</sub> inlet diameter D<sub>1</sub>)

Debi (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	Denklem	R <sup>2</sup>
40	y = 10,251x + 43,037	0,9999
45	y = 10,226x + 54,617	0,9999
50	y = 10,255x + 67,466	0,9997
55	y = 10,286x + 81,821	0,9998
60	y = 10,283x + 97,907	0,9996

Tablo 5'de görüldüğü gibi tüm debi değerlerinde vakum basıncı ve dalma derinliği arasında yüksek derecede (R<sup>2</sup>>0,99) doğrusal bir ilişki görülmektedir. Burada x, vakum basıncı, y ise dalma derinliğidir.

Her iki pompanın su giriş çaplarının tümünde debi arttıkça kritik dalma derinlikleri yükselmiştir. Derin kuyu pompalarının farklı emme giriş çaplarında tespit edilen bu ilişki, farklı su alma ağız girişine sahip çalışmalarda da görülmüştür [27, 28]. Sabit debi değerlerinde su giriş çapları arttıkça kritik dalma derinliği azalmıştır. Christiansen [29], yatay milli santrifüj pompa ile yaptığı çalışmasında sabit debide emme borusu çapının artmasıyla dalma derinliğinin azaldığını bildirmiştir. Ayrıca 4" 'lik (P<sub>2</sub>) pompa ile 12" 'lik kuyu kılıf borusu arasında kalan alan, 3" 'lik (P<sub>1</sub>) pompaninkinden daha dar olduğu için suyun hareketini dolayısıyla oluşacak vorteksin tipini ve derinliğini etkilemiştir. P<sub>1</sub> pompasının D<sub>2</sub> çapında (86 mm) 50 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> debi değerinde vorteks dalma derinliği 3 cm ve vorteks tipi A (Şekil 8) olarak belirlenmişken, P<sub>2</sub> pompasının D<sub>2</sub> çapında (117 mm) aynı debi değerinde vorteks dalma derinliği 7 cm ve vorteks tipi C (Şekil 9) olarak belirlenmiştir. Bu durum vorteksin tipini ve vorteks dalma derinliğini etkilemiştir. Tablo 6'da

vorteksin olduğu dalma derinliklerinin, belirlenen kritik dalma derinliklerinden daha küçük değerlerde olduğu görülmüştür. Bu durum vorteksin kritik dalma derinliğinden daha küçük dalma derinliklerinde oluştuğunu ve kritik dalma derinliğinin güvence altında olduğunu göstermektedir. Vakum ölçüm yöntemi ile belirlenen kritik dalma derinlikleri, çalışmanın bundan sonraki bölümünde Froude, Weber ve Reynolds sayılarıyla ilişkilendirilmiştir.

### 3.2. Kritik Dalma Derinliklerinin Boyutsuz Büyüklükler İle İlişkisi (Relation of Critical Submergence to Dimensionless Quantities)

#### 3.2.1. Froude Sayısı (Froude number)

Deneyel çalışmada, P<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub> pompalarının vakum basıncı, ölçüm yöntemiyle belirlenen kritik dalma derinlikleri ve Froude sayısı arasındaki ilişki incelenmiştir. Burada kritik dalma derinliği (Sc), bağıl kritik dalma derinliği (Sc/D) ile birlikte değerlendirilmiştir. Bağıl kritik dalma derinliği ve Froude sayısında kullanılan "D" giriş çapı, pompa giriş alanının çapa dönüştürülmüş değeridir. Pompa deneylerinden elde edilen bağıl kritik dalma derinliği (Sc/D) ve Froude sayısı arasındaki ilişki Şekil 7'de gösterilmiştir. Froude sayısı Eş. 8'e göre hesaplanmıştır.

Pompaların farklı giriş kesit alanlarına göre elde edilen Froude sayısı ile ilişkilendirilmiş bağıl kritik dalma derinliği (Sc/D), Eş. 16'da verilmiştir. Eş. 16'da elde edilen regresyon katsayısı 0,996'dır. Şekil (7)' den de görüleceği üzere Froude sayısındaki artışla birlikte bağıl kritik dalma derinliği değeri de artmaktadır. Benzer ilişki, Khanarmuei vd. [6], Sarkardeh [7], Möller vd. [10] tarafından yapılan çalışmalarda elde edilmiştir.

$$\frac{S_c}{D} = 0,4164 F^{2,118} \quad (16)$$

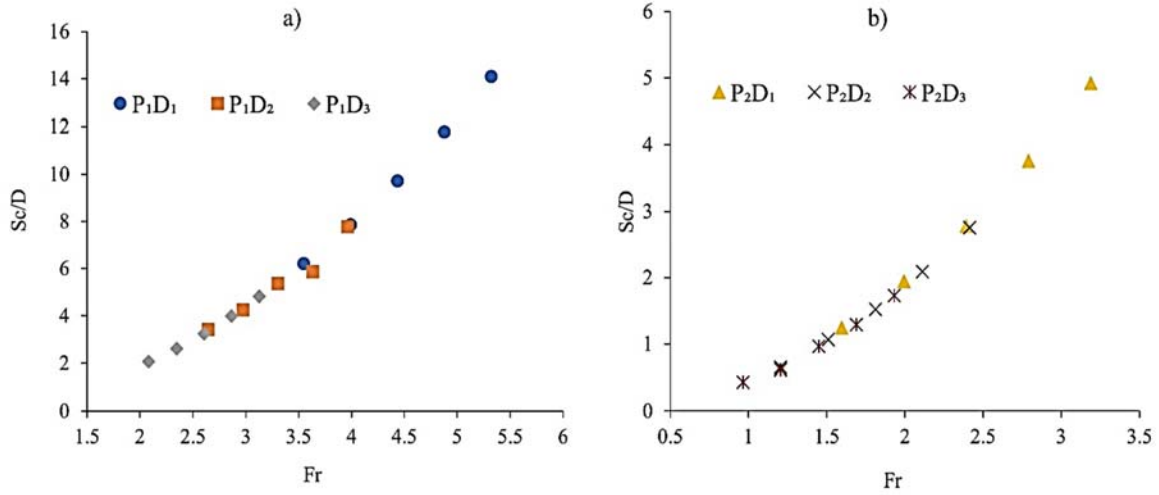
Şekil 8 ve Şekil 9'da, farklı anma çapı ve giriş alanlarına sahip pompaların (P<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub>) bağıl kritik dalma derinlikleri ve Froude sayıları arasındaki ilişki ayrı ayrı incelenmiş ve diğer araştırmacılar ile karşılaştırılarak düşük dalma derinliklerinde oluşan vorteks tipleri sınıflandırılmıştır. Şekil 8 ve Şekil 9'da vorteks tiplerinin olduğu dalma derinlikleri, Froude sayısına bağlı olarak bağıl vorteks dalma derinliği (Sv/D) olarak verilmiştir.

Farklı giriş çaplarında, P<sub>1</sub> pompasının Froude sayısı arttıkça bağıl kritik dalma derinliği seviyesi de artmıştır. Deneyel çalışmanın D<sub>1</sub> çapındaki ölçüm değerleri için Froude ve Sc/D arasındaki değişim aralığı diğer çaplara göre daha belirgin artmıştır. Bir başka ifade ile

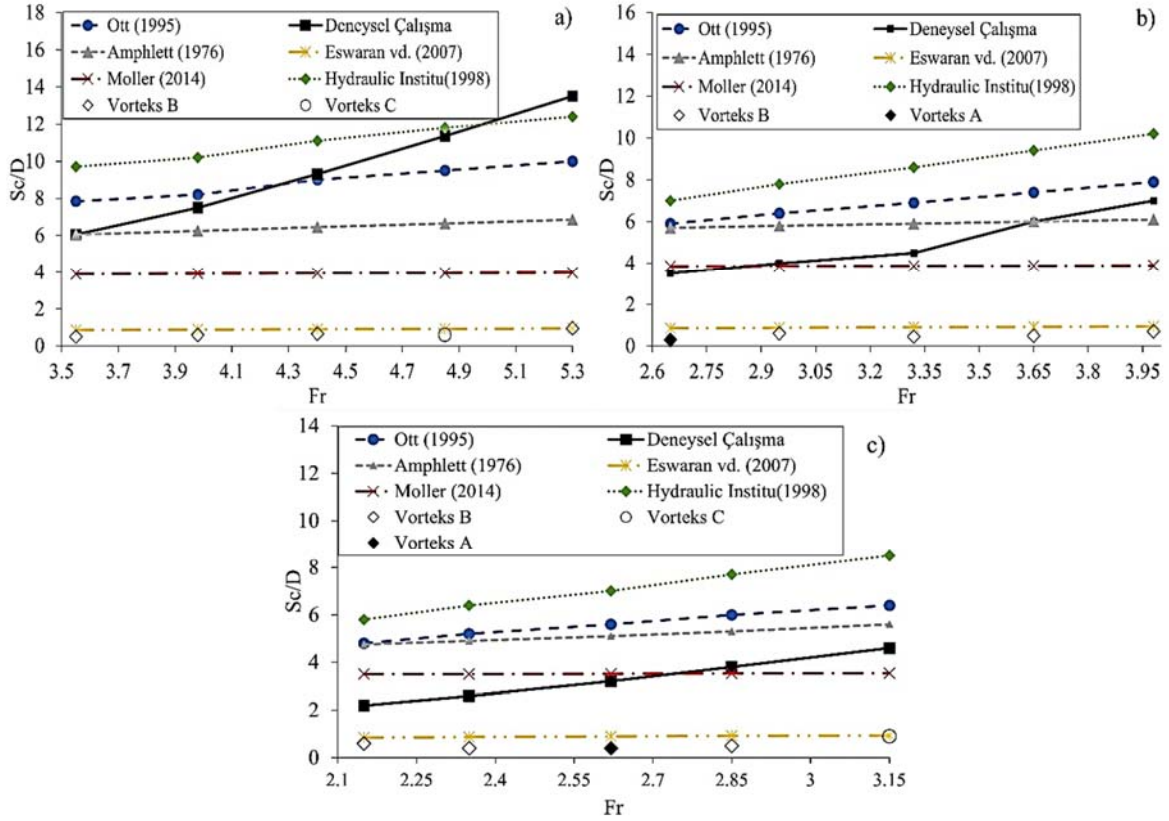
**Tablo 6.** P<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub> pompalarının kritik ve vorteks dalma derinlikleri (cm) (Critical and vortex submergence of pumps P<sub>1</sub> and P<sub>2</sub>)

	Q (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	P <sub>1</sub>			P <sub>2</sub>		
		D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>2</sub>
Sc	40	43,03	26,66	17,81	11,87	6,98	5,08
	45	54,61	33,10	22,54			
	50	67,46	41,82	27,96	18,58	11,38	7,24
	55	81,82	50,67	34,38			
	60	97,90	60,74	41,43	26,57	16,27	11,32
	70				35,97	22,31	15,08
Sv	80				47,06	29,47	20,21
	40	3	2	4	4	5	4
	45	3	5	3			
	50	4	4	3	5	5	7
	55	5	4	4			
	60	7	5	9	8	10	9
	70				15	9	14
	80				10	12	11





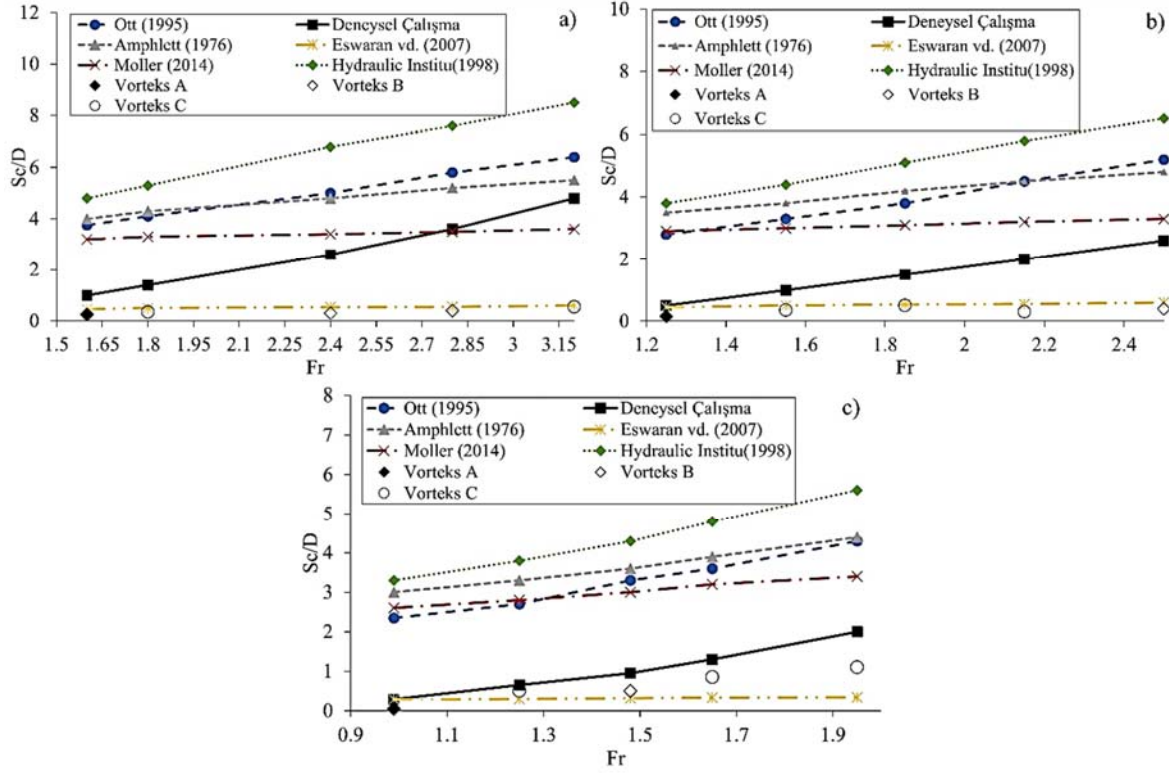
Şekil 7. Deneylerdeki P1 pompa (a) ve P2 pompa (b) modelleri için Froude ve Sc/D arasındaki ilişki (Relationship between Froude and Sc/D for P1 pump (a) and P2 pump (b) models in the experiments)



Şekil 8. P1 pompasının D<sub>1</sub> (a), D<sub>0</sub> (b) ve D<sub>2</sub> (c) çapları için Sc/D ve Fr değerleri (Sc/D and Fr values for diameters D<sub>1</sub> (a), D<sub>0</sub> (b) and D<sub>2</sub> (c) of pump P<sub>1</sub>)

D<sub>1</sub> girişinde elde edilen grafik diğer çaplara göre daha dik bir değişim göstermiştir. Bunun sebebi, D<sub>1</sub> çapında 40 ile 60 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> debi arasındaki kritik dalma derinliği değişim aralığının diğer çaplara göre daha fazla olmasıdır. Şekil 3'de Eswaran vd. [13] yaptıkları çalışmada elde edilen eşitlik, fiziksel modeller ile uyumlu değildir ve vorteks dalma derinliğine çok yakın bir değişim göstermiştir. Institute [14] ve Ott [12] eşitliklerinden hesaplanan Sc/D oranı, tüm fiziksel modellerde, vorteks dalma derinliği seviyesinden çok yüksekte ve güvenli çıkmıştır. Ancak bu eşitliklerin kullanılması

güvenli olmakla birlikte pompanın su altında kalan yüksekliğin (dalma derinliği) çok fazla olması durumunda ekonomik değildir. Benzer problem, bu çalışmada kullanılan fiziksel modelin D<sub>1</sub> çapında yüksek Froude sayılarında da oluşmuştur. Fiziksel modellerde kullanılan Möller vd. [10] ve Amphlett [11] eşitliklerinin yansıra bu çalışma için kritik dalma derinliğinin belirlenmesinde kullanılan vakum ölçüm yönteminin daha güvenilir ve ekonomik olduğu görülmüştür. Ekonomik kullanım için P<sub>1</sub> pompasının D<sub>2</sub> çapındaki fiziksel model önerilebilir.



Şekil 9. P<sub>2</sub> pompasının D<sub>1</sub> (a), D<sub>0</sub> (b) ve D<sub>2</sub> (c) çapları için Sc/D ve Fr değerleri (Sc/D and Fr values for diameters D<sub>1</sub> (a), D<sub>0</sub> (b) and D<sub>2</sub> (c) of pump P<sub>2</sub>)

Literatürdeki tüm araştırmacıların kullandıkları eşitliklerde, P<sub>2</sub> pompasından elde edilen Sc/D değerleri P<sub>1</sub> pompasına göre daha düşüktür. Çünkü, P<sub>2</sub> pompasının P<sub>1</sub> pompasına göre giriş alanı daha fazladır. Hanson [30] ve Christiansen [29] çalışmalarında, boru çapının azalmasıyla kritik dalma derinliğinin yükseldiğini ifade etmişlerdir. Şekil 9'da P<sub>2</sub> pompası için Eswaran eşitliğinden hesaplanan Sc/D değerlerinin bağlı vorteks dalma derinliğine çok yakın veya altında kaldığı görülmüştür. Çünkü, P<sub>2</sub> pompasının yüksek debi değerlerinde vortekslerin oluştuğu dalma derinliği seviyeleri yüksek çıkmıştır (Tablo 6). Bu pompa modeli için diğer araştırmacıların geliştirdiği eşitlikler ile deneylerden elde edilen Sc/D değerleri, güvensiz bölgenin üzerinde çıkmıştır. Ancak bu çalışma da kullanılan yöntemin sonucunda ölçülen Sc/D'nin daha ekonomik olduğu söylenebilir. P<sub>2</sub> pompasında D<sub>2</sub> fiziksel modelin bağlı kritik dalma derinliği, güvensiz bölge sınırlarının hemen üzerindedir. Dolayısıyla P<sub>2</sub> pompasının D<sub>2</sub> fiziksel modeli için güvenli kullanım katsayısı için Eş. 17'nin uygulanması daha uygundur.

$$\frac{S_c}{D} = 0,4454 F_r^{2,0605} + 1 \quad (17)$$

P<sub>1</sub> ve P<sub>2</sub> pompalarının tüm fiziksel modellerinde vorteks oluşum derinlikleri sırasıyla 20-70 mm ve 20-145 mm arasında değişmektedir. P<sub>2</sub> pompa tipinde vorteks dalma derinliği seviyesi daha yüksektir. P<sub>2</sub> pompasının anma çapının büyük olması nedeniyle kuyu kesit alanı küçüldüğü için vorteks oluşum derinlikleri ve tipleri birbirinden farklıdır. Pompa tipleri için Froude sayısı yükselmesi ile vorteks oluşum derinliği de yükselmiştir. Çünkü, suyun pompaya giriş hızının artması, yüzey gerilmesini de artırmaktadır. Her iki pompanın D<sub>0</sub> fiziksel modellerinde vorteks oluşum derinliği diğer fiziksel modellere göre daha düşüktür. A tipi vorteks, dalma derinliklerinin ve Froude sayılarının küçük olduğu durumlarda oluşmuştur. Bu çalışmada, vakum ölçüm yöntemi ile belirlenen kritik

dalma derinliklerinin vorteks oluşum derinliklerinden yüksek olması ölçüm yönteminin güvenli kullanılabilirliğini ortaya çıkarmıştır.

### 3.2.2. Kritik Froude, Weber ve Reynolds sayıları (Critical Froude, Weber and Reynolds numbers)

Pompaların farklı fiziksel modellerinden elde edilen kritik dalma derinliği seviyelerinde Froude ve Weber sayıları incelenmiş ve hesaplanan boyutsuz büyüklükler, kritik Froude ve kritik Weber sayısı olarak tanımlanmıştır [9, 10, 17]. Kritik Froude sayısı, Eş. 9'a göre hesaplanmış ve P<sub>1</sub> pompasının fiziksel modelleri için F<sub>cr</sub> değeri Şekil 10 a'da verilmiştir. Şekil 10 a'ya göre P<sub>1</sub> pompasının tüm fiziksel modellerinde bağlı kritik dalma derinliği ile kritik Froude sayısı arasında 2. dereceden parabolik bir değişimin olduğu görülmektedir. Bu değişimin R<sup>2</sup> değerleri D<sub>1</sub>, D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> fiziksel modelleri için sırasıyla 0,96-0,92 ve 0,93 çıkmıştır. Pompanın D<sub>1</sub>, D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> fiziksel modellerine ilişkin kritik dalma derinlikleri için ortalama F<sub>cr</sub> değerleri sırasıyla 1,42-1,45-1,43 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin birbirine çok yakın çıkmış olması, derin kuyu pompalarındaki kritik dalma derinlikleri için belirlenen ölçüm yönteminin, P<sub>1</sub> pompasının tüm modellerine uygulanabileceğini göstermiştir. Ayrıca değişen giriş çaplarında, debilerde ve farklı seviyelerde ölçülen kritik dalma derinlikleri için hesaplanan F<sub>cr</sub> değerleri, P<sub>1</sub> pompasının tüm modellerinde F<sub>cr</sub> ≤ 1,40 sınır şartını sağladığından pompanın kritik dalma derinliğinin üzerinde çalışması mümkün olacaktır. P<sub>1</sub> pompasının bağlı vorteks dalma derinliği (S<sub>v</sub>/D) ve vorteks Froude (F<sub>v</sub>) sayısına bağlı vorteks tipleri Şekil 10 b'de verilmiştir. Vorteks Froude sayısı hesaplanırken vorteksin oluştuğu seviye (S) dikkate alınmıştır. P<sub>1</sub> pompasının modellerinde genel olarak vorteks B tipi tespit edilmiştir. Vortekslerin oluştuğu seviyedeki vorteks Froude sayısı modeller arasında ayrıştığı Şekil 10 b'de görülmektedir. Bu durum D<sub>1</sub> - D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> fiziksel modellerde sırasıyla 0,56-0,47 ve 0,37 olan ortalama F<sub>v</sub> sayısından daha net anlaşılmaktadır. Çap arttıkça F<sub>v</sub> değeri azalma görülmüştür.

P<sub>2</sub> pompasının tüm fiziksel modellerinde bağıl kritik dalma derinliği ile kritik Froude sayısı arasında, P<sub>1</sub> pompasında olduğu gibi 2. dereceden parabolik bir ilişki görülmektedir (Şekil 11). P<sub>2</sub> pompasındaki ilişkiyi R<sup>2</sup> değerleri D<sub>1</sub>, D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> fiziksel modelleri için sırasıyla 0,76-0,77 ve 0,91 çıkmıştır. P<sub>2</sub> pompasının D<sub>1</sub>, D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> fiziksel modellerine ilişkin kritik dalma derinlikleri için ortalama F<sub>cr</sub> değerleri sırasıyla 1,43-1,46-1,48' dir. Fiziksel modellerin ortalama F<sub>cr</sub> değerleri P<sub>1</sub> pompasında olduğu gibi birbirine çok yakın çıkmıştır. P<sub>2</sub> pompasının tüm fiziksel modellerinde F<sub>cr</sub> ≤ 1,43 ise P<sub>2</sub> pompası kritik dalma derinliğinin üzerinde çalışacaktır. P<sub>2</sub> pompasının modellerinde en fazla vorteks C tipi tespit edilmiştir (Şekil 11b). D<sub>1</sub>-D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> fiziksel modellerinde ortalama F<sub>v</sub> sayısı sırasıyla 0,26-0,20 ve 0,16'dır. P<sub>1</sub> pompasında olduğu gibi P<sub>2</sub> pompasında da çap arttıkça F<sub>v</sub> sayısı azalmıştır.

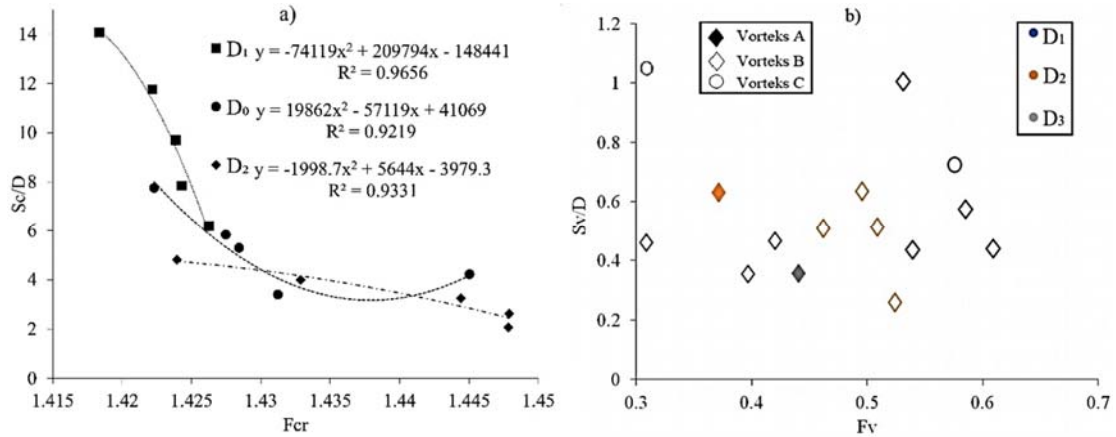
Akış yüzeyindeki gerilme deneysel modellerde karşılaşılan serbest yüzey girdaplarının oluşumunu etkileyebilir [7]. Bundan dolayı araştırmacıların çoğu, kritik dalma derinliğini, kritik Weber (W<sub>cr</sub>) ve Reynolds (Re) sayılarına göre belirlemişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları farklı fiziksel modeller için kritik Weber ve Reynolds sayılarını, W<sub>cr</sub>>120 [17], W<sub>cr</sub>>720 ve Re>1,1 x10<sup>5</sup> [18], W<sub>cr</sub>>600 ve Re>7,7x10<sup>4</sup> [6], W<sub>cr</sub>>1434 ve Re>1,53x10<sup>5</sup> [31] olarak bildirmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen ve P<sub>1</sub> pompasına ait farklı fiziksel modeller için W<sub>cr</sub> sayıları Şekil 12 (a)'da Re sayıları ise Şekil 12(b)'de verilmiştir. Tüm fiziksel modellerde debi arttıkça W<sub>cr</sub> ve

Re sayıları da artış göstermiştir. P<sub>1</sub> pompasındaki giriş alanının artması, W<sub>cr</sub> ve Re değerini düşürmüştür. W<sub>cr</sub> ve Re değerleri D<sub>1</sub>, D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> modelleri için sırasıyla W<sub>cr</sub>>1600 Re>3,1x10<sup>5</sup>, W<sub>cr</sub>>1100 Re>2,7x10<sup>5</sup> ve W<sub>cr</sub>>750 Re>2,4x10<sup>5</sup> olarak elde edilmiştir.

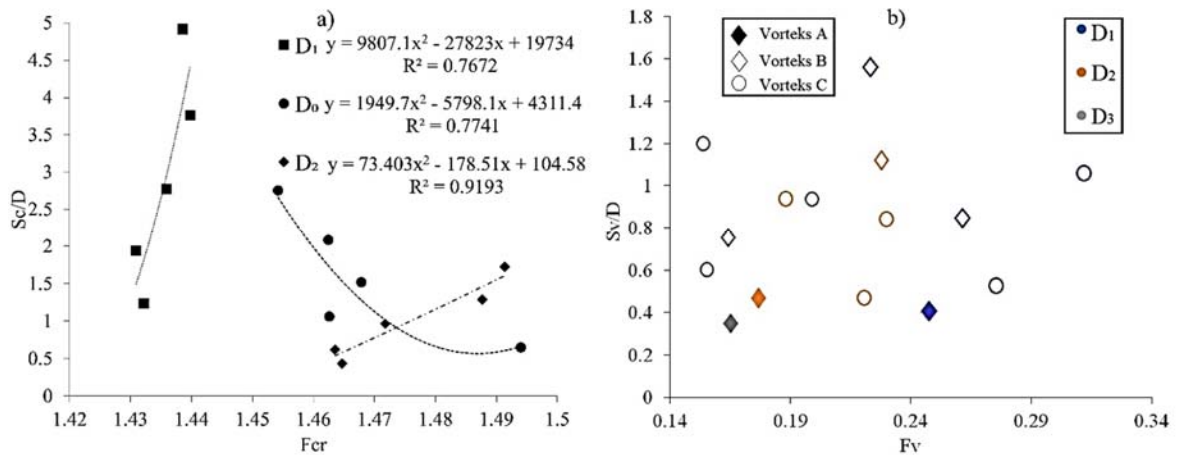
P<sub>2</sub> pompasının tüm fiziksel modellerinde de P<sub>1</sub> pompasında olduğu gibi debi ve giriş alanındaki artış W<sub>cr</sub> ve Re sayılarını düşürmüştür. Yüksek Re sayıları, Türbülanslı akışa neden oldukları için vortex oluşumunu hızlandıracaktır. Bu çalışmada, deneysel değerlerden hesaplanan W<sub>cr</sub> ve Re sayılarının küçük olması, akış sırasında vorteks sayılarının ve oluşum sıklığının azalmasını sağlayacaktır. P<sub>2</sub> pompasından elde edilen W<sub>cr</sub> ve Re değerleri D<sub>1</sub>, D<sub>0</sub> ve D<sub>2</sub> modelleri için sırasıyla W<sub>cr</sub>>790 Re>2,9x10<sup>5</sup>, W<sub>cr</sub>>500 Re>2,6x10<sup>5</sup> ve W<sub>cr</sub>>350 Re>2,3x10<sup>5</sup> olarak hesaplanmıştır.

#### 4. Simgeler (Symbols)

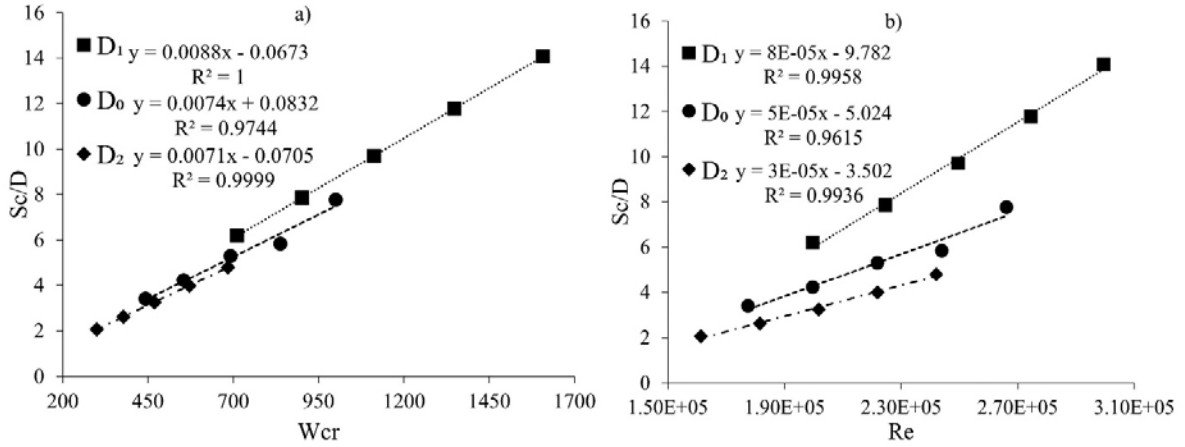
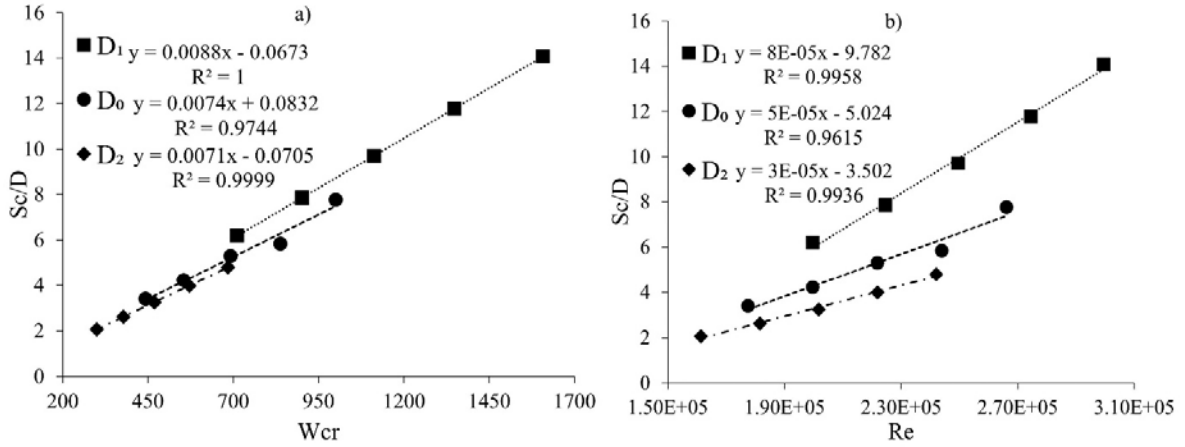
- D : Giriş çapı  
D<sub>1</sub> : Boyutu % 20 azaltılmış emme haznesi (P<sub>1</sub> için 3800 mm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub> için 7200 mm<sup>2</sup>)  
D<sub>0</sub> : Orijinal emme haznesi (P<sub>1</sub> için 4800 mm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub> için 9000 mm<sup>2</sup>)  
D<sub>2</sub> : Boyutu % 20 artırılmış emme haznesi (P<sub>1</sub> için 5800 mm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub> için 10800 mm<sup>2</sup>)  
Fr : Froude sayısı



Şekil 10. Farklı modellerdeki P<sub>1</sub> pompası için F<sub>cr</sub> - Sc/D değerleri (a) ve F<sub>v</sub> - Sv/D değerleri (b) (F<sub>cr</sub> - Sc / D and F<sub>v</sub> - Sv/D in different models of P<sub>1</sub> pump)



Şekil 11. Farklı modellerdeki P<sub>2</sub> pompası için F<sub>cr</sub> - Sc/D değerleri (a) ve F<sub>v</sub> - Sv/D değerleri (b) (F<sub>cr</sub> - Sc / D and F<sub>v</sub> - Sv/D in different models of P<sub>2</sub> pump)

Şekil 12. Farklı modellerdeki P1 pompası için (a)  $W_{cr}$  ve (b)  $Re$  değerleri ( $W_{cr}$  and  $Re$  (b) in different models of P1 pump)Şekil 13. Farklı modellerdeki P2 pompası için (a)  $W_{cr}$  ve (b)  $Re$  değerleri ( $W_{cr}$  (a) and  $Re$  (b) in different models of P2 pump)

- $F_{cr}$  : Kritik Froude sayısı  
 $F_v$  : Vorteks Froude sayısı  
 $h$  : Yükseklik, mm  
 $P_b$  : Pompa çıkış basıncı, kPa  
 $P_e$  : Vakum basıncı kPa  
 $Re$  : Reynolds sayısı  
 $S$  : Dalma derinliği, mm  
 $Sc$  : Kritik dalma derinliği, mm  
 $Sc/D$  : Bağlı kritik dalma derinliği  
 $T_1$  : Ortam sıcaklığı, °C  
 $T_2$  : Su sıcaklığı, °C  
 $W$  : Weber sayısı  
 $W_{cr}$  : Kritik Weber sayısı  
 $\Delta$  : Düşüm, mm  
 $P_1$  : 3" milli pompa  
 $P_2$  : 4" milli pompa

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, vakum ölçüm yöntemine göre belirlenen derin kuyu pompalarındaki kritik dalma derinliklerinin boyutsuz büyüklükler ile ilişkisi araştırıldı. Pompaların giriş çaplarının ( $P_1$  pompa için 3800 mm<sup>2</sup>- 4800 mm<sup>2</sup>-5800 mm<sup>2</sup>,  $P_2$  pompa için 7200 mm<sup>2</sup>- 9000 mm<sup>2</sup>-10800 mm<sup>2</sup>) tamamında vakum ölçüm yöntemine göre belirlenen kritik dalma derinliğinin ( $Sc$ ), vorteks dalma derinliği ( $S_v$ ) seviyesinin üstünde çıkması pompaların güvenli bölgede çalıştığını ve ölçüm yönteminin doğruluğunu göstermiştir. Bu çalışmada elde

edilen sonuçlar, diğer araştırmacıların deneysel verilerinden elde ettikleri ampirik formüllerle karşılaştırıldı. Belirli bir çapa sahip olmayan giriş kesit alanlarını tanımlamak için, boyutsuz sayılar kullanılarak kesit alanı çap ( $D$ ) ile ilişkilendirilmiştir.

Bağlı kritik dalma derinliği, Froude sayısı ile ilişkilendirilerek deneylerde kullanılan pompaların tüm fiziksel modellerine uygulanabilen ampirik formül olan Eş. 16 geliştirilmiştir. Bu formülasyon yardımıyla deneysel çalışmada incelenen pompaların kritik dalma derinlikleri, farklı debi ve giriş alanları için belirlenebilir.

Eswaran'ın bağlı kritik dalma derinliği için geliştirdiği eşitliğin, çalışmada kullanılan her iki pompanın fiziksel modelleri için uygulanabilir olmadığı anlaşılmıştır. Hydraulic Institu ve Ott tarafından geliştirilen eşitliklerden elde edilen bağlı kritik dalma derinliği seviyelerinin güvensiz bölgenin çok üzerinde çıkması, bu formülasyonların derin kuyu pompaları için kullanımının ekonomik olmadığı anlamına gelmektedir. Möller, Amphlett eşitlikleri ise derin kuyu pompalarının ekonomik kullanımı ve vortekslerin oluşmadığı güvenli bölgede çalışmasını sağlamaktadır. Vorteks oluşum derinliğine ve tipine pompa su giriş alanının (çapın) ve pompa çaplarının etkili olduğu tespit edilmiştir. 4" ( $P_2$ ) pompanın kılıf borusu ile arasında kalan 64274 mm<sup>2</sup>'lik alan 3" ( $P_1$ ) pompadan daha dar olduğu için suyun hareketini dolayısıyla oluşacak vorteksin tipini ve derinliğini etkilemiştir. Derin kuyu pompalarının kritik dalma derinliklerinin belirlenmesinde kullanılan boyutsuz büyüklüklere

göre, bu çalışmada analiz edilen her iki pompa' ya ( $P_1$  ve  $P_2$ ) ait orjinal modellerin, ( $D_0$  çapı) kullanılması uygundur.

#### Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK, Proje No: 213O140) tarafından desteklenerek yapılan Derin Kuyu Test Kulesin de yapılmıştır. Bu çalışmaya katkıda bulunan merhum Prof. Dr. Sedat ÇALIŞIR Hocama teşekkür ederim.

#### Kaynaklar (References)

- Nagahara T.S.T., Okamura T., Effect of the submerged vortex cavitation occurred in pump suction intake on hydraulic forces of mixed flow pump impeller, In: CAV 2001: Fourth International Symposium on Cavitation, California Institute of Technology, Pasadena, CA USA. (Unpublished) <https://resolver.caltech.edu/CAV2001:sessionB8.006>. 20-23 Haziran, 2001.
- Yıldırım N., Akay H., Taştan K., Critical submergence for multiple pipe intakes by the potential flow solution, Journal of Hydraulic Research, 49 (1), 117-121, 2011.
- Yun L., Rongsheng Z., Dezhong W., A cavitation performance prediction method for pumps Part1-Proposal and feasibility, Nuclear Engineering and Technology, 52 (11), 2471-2478, 2020.
- Huan Y.Y., Liu Y. Y., Li X.J., Zhu Z.C., Qu J.T., Zhe L., Experimental and numerical investigations of cavitation evolution in a high-speed centrifugal pump with inducer, Journal of Hydrodynamics, 33 (1), 140-149, 2021.
- Ahmad Z., Rao K., Mittal M., Critical submergence for horizontal intakes in open channel flows, Dam Engineering, 19 (2), 71-90, 2008.
- Khanarmuei M., Rahimzadeh H., Sarkardeh H., Effect of dual intake direction on critical submergence and vortex strength, Journal of Hydraulic Research, 57 (2), 272-279, 2019.
- Sarkardeh H., Minimum reservoir water level in hydropower dams, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 30 (4), 1017-1024, 2017.
- Yıldırım N., Kocabaş F., Prediction of critical submergence for an intake pipe, Journal of Hydraulic Research, 40 (4), 507-518, 2002.
- Yıldırım T., Experimental and numerical investigation of vortex formation at multiple horizontal intakes, PhD Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2020.
- Möller G., Detert M., Boes R.M., Vortex-induced air entrainment rates at intakes, Journal of Hydraulic Engineering, 141 (11). 04015026, 2015.
- Amphlet M., Air-entraining vortices at a horizontal intake. Hydraulics Research Station, 1976.
- Ott R.F., Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants, American Society of Civil Engineers, New York, NY (United States), 1995.
- Eswaran D., Ahmad Z., Mittal, M., Critical submergence at vertical pipe intakes, Dam Engineering, 18 (1), 17, 2007.
- Institute A.N.S., American national standard for rotodynamic pumps for pump intake design. Hydraulic Institute, 1998.
- Park I., Kim H.J., Seong H., Rhee H.D., Experimental studies on surface vortex mitigation using the floating anti-vortex device in sump pumps, Water, 10 (4), 441, 2018.
- Keihanpour M., Kabiri-Samani A., Effects of modern marguerite-shaped inlets on hydraulic characteristics of swirling flow in shaft spillways, Water Science and Engineering, 14 (3), 246-256, 2021.
- Domfeh, M. K., Gyamfi S., Amo-Boateng M., Andoh R., Ofos E. A., Tabor G., Free surface vortices at hydropower intakes:—A state-of-the-art review, Scientific African, 8, e00355, 2020.
- Hashid M., Hussain A., Ahmad Z., Critical submergence for side circular intake in an open channel flow, Journal of Hydraulic Research, 59 (1), 136-147, 2021.
- Jones G. M., Sanks R. L., Bosserman B. E., Tchobanoglous G., Pumping Station Design, 3rd ed. Gulf Professional Publishing, 2006.
- Çengel Y. A., Cimbala, J. M., Engin, T., Akışkanlar Mekaniği: Temelleri ve Uygulamaları, Güven Kitabevi, 2008.
- Kleynhans S., Physical hydraulic model investigation of critical submergence for raised pump intakes, Stellenbosch, Yüksek Lisans Tezi, Stellenbosch University, 2012.
- Heller V., Scale effects in physical hydraulic engineering models, Journal of Hydraulic Research, 49 (3), 293-306, 2011.
- Orhan N., Kurt M., Dalgıç ve düşey milli derin kuyu pompalarında bazı pompaj parametrelerinin karşılaştırılması, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 27, 549-556, 2021
- Anonim., Rotodinamik pompalar-Hidrolik performans Kabul deneyleri Sınıf 1 ve Sınıf 2, TS EN ISO 9906, Ankara, 2002.
- Orhan N., Dalgıç pompalarda kritik dalma derinliğinin belirlenmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2018.
- Sarkardeh H., Zarrati A.R., Roshan R., Effect of intake head wall and trash rack on vortices, Journal of Hydraulic Research, 48 (1), 108-112, 2010.
- Taştan K., Yıldırım, N., Su alma ağız giriş şeklinin hava girişli çevrinti üzerindeki ölçek etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6 (3), 492-506, 2018.
- Werth D., Frizzell, C., Minimum pump submergence to prevent surface vortex formation, Journal of Hydraulic Research, 47 (1), 142-144, 2009.
- Christiansen C., Pumping from shallow streams 2, Department of Natural Resources and Mines, W26, 3, 2005.
- Hanson B., Irrigation Pumping Plants (UC Irrigation and Drainage Specialist). Department of Land, Air and Water Resources, University of California, Davis, 126,2000.
- Tahershamsi A., Rahimzadeh, H., Monshizadeh, M., Sarkardeh, H., An experimental study on free surface vortex dynamics, Meccanica, 53 (13), 3269-3277, 2018.

