Uluslararası İleri Doğa Bilimleri ve Mühendislik Araştırmaları Dergisi
Sayı 9, S. 122-127, 6, 2025
© Telif hakkı IJANSER'e aittir
Araştırma Makalesi

IJANSER
https://as-proceeding.com/index.php/ijanser
ISSN:2980-0811

International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches
Volume 9, pp. 122-127, 6, 2025
Copyright © 2025 IJANSER
Research Article

Deneysel Akışkanlar Mekaniğinde Eğitim Amaçlı Su Tüneli Tasarımı

Hilal AKBUNAR ÇAMURDIK, Mustafa Arif ÖZGÜR

Makine Mühendisliği, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

hilal.akbunar27@gmail.com

(Received: 02 June 2025, Accepted: 04 June 2025)

(5th International Conference on Contemporary Academic Research ICCAR 2025, May 30-31, 2025)

ATIF/REFERENCE: Akbunar Çamurdık, H. & Özgür, M. A. (2025). Deneysel Akışkanlar Mekaniğinde Eğitim Amaçlı Su Tüneli Tasarımı. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(6), 122-127.

Özet **–** Su tünelleri, akışkanlar mekaniği alanında özellikle parçacık izleme, akış görselleştirme ve türbülanslı akışların analizi gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılan, kontrollü bir ortamda akışın oluşturulmasını sağlayan temel bir deney düzeneğidir. [3] Ancak, ticari su tünellerinin yüksek maliyetleri, büyük boyutları ve kurulum zorlukları, eğitim ve araştırma kurumlarında bu sistemlere erişimi önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Bu çalışmada, eğitimde kullanılmak üzere tasarlanan, düşük maliyetli bir su tünelinin tasarım ve imalat süreci ayrıntılı olarak sunulmaktadır.[3] Amaç deneysel su tünellerinin temel yapısal özelliklerini, çalışma prensiplerini ve birçok farklı mühendislik alanlarındaki kullanım biçimlerini farklı ölçüm teknikleri kullanarak kapsamlı bir biçimde incelemektir. Tasarım aşamasında kıyaslama yapılırken ortam koşullarına en uygun kullanışlı tasarım tercih edilmiştir. Açık devre prensibiyle çalışan sistem, 2 m × 0.7 m × 0.5 m boyutlarında cam bir tank, PVC merkez kanal, değişken debili bir su pompası ve akış yönlendirici elemanlardan oluşmaktadır. Yapısal elemanlarda çelik, cam malzeme ve paslanmaz çelik tercih edilerek uzun ömürlü ve stabil bir deney ortamı sağlanmıştır. Cam, akrilik veya şeffaf PVC'ye göre üstün optik netlik, çizilme ve bulanıklık direnci sunduğundan görsel deney kalitesi açısından tercih edilmiştir. İmalat sürecinde düşük maliyetli fakat etkili yapıştırıcı ve sızdırmazlık malzemeleri (silikon macunu, PVC yapıştırıcısı vb.) kullanılarak toplam maliyet 3.250 – 3.750 USD aralığında tutulmuştur. Sistem, 0.1–1 m/s arasında ayarlanabilir akış hızları ile farklı Reynolds sayılarında görsel ve nicel deneylere olanak sağlamaktadır. Tünel tasarımı CAD yazılımları (SolidWorks, AutoCAD) ile optimize edilmiş; prototip doğrulama çalışmalarıyla performansı test edilmiştir. Ayrıca, maliyet analizi sonuçları, benzer özelliklere sahip ticari sistemlere kıyasla oldukça ekonomik ve erişilebilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Sistem, taşıma esnasında oluşabilecek yapısal deformasyonları önlemek amacıyla yerinde montaj yöntemiyle kurulmuştur. Bu çalışma, düşük bütçeli araştırma ortamlarında deneysel akışkan dinamiği çalışmalarının yaygınlaştırılmasına katkı sağlamayı ve eğitimde kullanılabilirliği artırmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Su Tüneli, Akış Görselleştirme, Reynolds Sayısı, Akışkanlar Mekaniği, Modelleme, Laminer Akış.

I. GİRİŞ

Akışkanlar mekaniğine mühendislik açısından bakıldığında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Çok boyutlu durağan ve hareketli akışkan sistemleri kapsamaktadır [9]. Bu alan enerji başta olmak üzere havacılık, denizcilik, otomotiv ve çevre mühendisliği gibi birçok mühendislik alanında kritik bir rol oynar [1-2]. Akışkanlar mekaniği teorik bilgiler kadar deneysel sistemleri de kapsar. Bu sistemlerin öncüleri

rüzgar ve su tünelleridir. Rüzgar tünelleri genellikle havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılırken, su tünelleri denizcilik, enerji ve çevresel mühendislik uygulamalarında daha yaygın olarak tercih edilir. Her iki sistemde akışkan-akışkan veya akışkan-katı etkileşimlerinin gözlenmesi ve analizi için çok önemli deney sistemleridir [3]. Su tüneli deney düzeneği farklı akışkan tipleri kullanımı, akış hızı ve düşük hızlarda reynolds sayısı elde etme, küçük yapıda parça boyutları uygula alanı, akış görselleştirme ve ölçüm teknikleri, boyut ve maliyet gibi faktörlerden dolayı rüzgar tünellerinden daha avantajlıdır [3-11]. Su, havaya göre daha yoğun ve yavaş hareket ettiği için gözlem yapmak kolaydır [12]. Su tünelleri, deneysel akışkanlar mekaniğinde hem temel kavramların anlaşılması hem de uygulamalı mühendislik çözümlerinin geliştirilmesi açısından vazgeçilmez bir araçtır [9]. Akışkanlar mekaniğinde özellikle hidrodinamik analizlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan, akışkan hareketinin kontrolü bir biçimde yönlendirildiği deneysel sistemlerdir [9]. Bernolli Denklemi ve Navier-Stokes Denklemleri, su tünellerinde akış analizlerinde kullanılır. [12] Akışkanın sıkıştırılamaz ve Newtonyen olduğu kabul edilir [12]. Akış profilinin türbülans veya laminer olmasına göre deney sonuçları karşılaştırılır [12].
Su tüneli deney düzenekleri yalnızca bu yazının amacı olan eğitim amaçlı kullanımlarda değil ayrıca endüstriyel ürün geliştirme süreçlerinde de önemli ölçüde kullanılmaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Su tünellerinde temel amaç, akışkanın belirli bir hızda ve doğrultuda hareket ettirilerek test bölgesine yerleştirilen modelin üzerindeki etkilerin ölçülmesidir [3]. Bu sistemler genellikle kapalı ve açık sistem olmak üzere ikiye ayrılır. Kapalı devre su tünelleri; akışkanın sistem içinde sürekli döndüğü, dış ortamla temasın olmadığı sistemlerdir. Enerji verimliliği ve deney koşullarının tekrar edilebilmesi en önemli özellikleridir. Kapladığı alan ve maliyeti çok yüksektir. Açık devre su tünelleri ise; tercihimiz olan sistemde dış ortamdan alınan suyun filtre cihazından geçirilerek tüneli girip, deney sonrası tahliye edildiği sistemlerdir.

Su tünelleri kullanım amacına göre ise üç grupta toplanır. Araştırma amaçlı su tünelleri (profesyonel laboratuvarlarda kullanılmakta olan, yüksek hassasiyetli ölçüm cihazlarına sahip tüneller), endüstriyel uygulama tünelleri (büyük boyutlu endüstriyel ölçekli projelerin prototip testleri için kullanılan tüneller) ve bizim tercih ettiğimiz eğitim amaçlı su tünelleridir (temel ölçümler yapılabilen, düşük maliyetli üniversite laboratuvarlarında eğitim amaçlı kullanılan tüneller). Sistemin temel bileşenlerinden genel olarak tanımlaması beş bölüm olarak yapabiliriz. Sirkülasyon sistemi; akışkanı hareket ettiren pompa veya türbin sistemidir (bu sistem akışın hızını kontrol eder) [3]. Hız düzeltici filtreler (honeycomb); akışın türbülansını azaltmak ve düz bir akış profili sağlamak için kullanılır. Gözlem kutusu (test bölgesi); test parçasının yerleştirildiği ve ölçümlerin yapıldığı şeffaf cam bölmedir. Yönlendirici Kanatlar: Akışı yönlendiren ve girdap oluşumu azaltan yapılar. Enerji dağıtıcılar ve difüzör; akışkanın sistemden çıkışını düzenler, türbülansı azaltır.

Bir su tünelinin performansı akış kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle tünel tasarımda bileşenlerin yerleşimi ve hidrolik düzen kritik rol oynar. Titreşim kaynaklı her türlü veri hatası ve deney düzeneği sağlamlığı için ilk olarak statik hesap yapıldığı için sorun gözlenmemiştir. Yatay su tüneli tasarımı yapıldığı için görsel gözlemleme ve ölçüm cihazlarının entegrasyonu daha pratiktir. Eğitim amaçlı laboratuvar ortam ebatlarında olduğu için düşük maliyetlidir. Suyun yoğunluğu göz önünde tutulduğunda daha küçük modellerde bile yüksek Reynolds sayısı elde edilebilir [2].

Yatay sistemde düzenek tasarlanarak, 0.1–1 m/s arasında akış hızı içeren, test bölümü ise cam (akrilik levha veya şeffaf PVC, cama karşı daha dayanıklı olmasına rağmen görüntü kalitesi ve sıvı teması sonucu tabakanın bulanıklaşması ve en önemlisi ise zamanla meydana gelen sürtünme kuvveti kaynaklı aşınma sebebi ile tercih edilmemiştir), santrifüj pompa ve PVC boru ile sirkülasyon sistemi tasarlanan, basınç kaybı en aza düşürülerek uygun yönlendirici kanat tasarımı yapılmıştır. Uzun ömür ve doğru veri analizi için paslanmaz materyaller kullanılmıştır. Ölçüm ve akış görselleştirme yöntemlerimiz PIV (partikül

görüntüleme) ve boya enjeksiyonudur. İmalat kurulumu sırasında taşıma kaynaklı oluşacak her türlü zarar göz önünde bulundurularak yerinde kurulum tercih edilmiştir.

Su tüneli tasarımında kullanılan formüller genellikle tünelin hidrolik, hidrodinamik, yapısal ve enerji kayıpları gibi özelliklerine bağlıdır.

Reynolds sayısı (Re) ; su tünelindeki akışın laminer mi, türbülanslı mı olduğunu belirlemek için kullanılır.

$$Re = \frac{pUL}{\mu} = \frac{UL}{\upsilon} \qquad (1.1)$$

p = akışkanın yoğunluğu(kg/m^3), U=karakteristik hız (m/s) , L= karakteristik uzunluk (m) , μ= dinamik viskozite (Pa.s) , υ= kinematik viskozite (m²/s) temsil eder.

Bernoulli denklemi, akışkan enerjisini koruyan temel denklemdir.

$$P+\frac{1}{2}pU^2 + pgh \qquad (1.2)$$

P=basınç (Pa), U= hız (m/s) , g=yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²), h=yükseklik (m) 'dir.

Darcy-Weisbach Sürtünme Kaybı; su tünelinde boru ve kanal kayıpları için kullanılmıştır.

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{U^2}{2g} \qquad (1.3)$$

h_f= sürtünme kaybı (m) , f = sürtünme faktörü, L= boru uzunluğu(m), D= boru çapı (m) , U= ortalama akış hızı (m/s) 'dır.

Akış hacimsel debisi su tünelinde akışın miktarını hesaplamak içindir.

$$Q = A \times U \qquad (1.4)$$

Q = hacimsel debi (m³/s) , A=kesit alanı (m²), U= ortalama hız(m/s) ' dır.

Özellikle serbest yüzeyli akışlarda kullanıldığı için su tünelinde de akış rejimini froude sayısı ile belirleriz.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \qquad (1.5)$$

U = hız (m/s), g = yerçekimi ivmesi (9.81 m/s²) , L = karakteristik uzunluktur(m).

Akışı sağlamak için gerekli hidrolik gücün hesaplanması pompa seçimi için gereklidir.

$$P = p \times g \times Q \times H \qquad (1.6)$$

Model üzerindeki basınç dağılımı tespiti için basınç katsayısını hesaplarız.

$$Cp = \frac{P-P\infty}{\frac{1}{2}pU^2} \qquad (1.7)$$

P = yerel basınç, P∞ = serbest akış basıncı, p,U = yoğunluk ve serbes akış hızıdır.

A. Genel Bakış

Su tünelleri, hidrodinamik olayları kontrollü koşullar altında incelemek için kullanılan temel deneysel tesislerdir [7]. Araştırmacıların akış davranışını gözlemlemesine, sayısal simülasyonları doğrulamasına ve hidrolik yapılar ile modellerin test edilmesine olarak tanır [7].

Test bölgesi, test parçasının yerleştirildiği ve akışın gözlemlendiği ana kısımdır [6]. Yapılan tasarım akışın homojenliğini ve ölçü doğruluğunu artırmayı amaçlamıştır [7]. Şeffaf cam malzemeden tasarlanmıştır. Cam hesabı yapılmıştır. Emniyet katsayısı eklenerek 16 mm temperli camdan üretim sağlanmıştır. Temperli cam, klasik camlara daha dayanıklıdır. Bu cam türü; çizilmelere, darbelere ve termal streslere karşı son derece dirençlidir. Temperli cam kırıldığında, küçük, düzgün parçalara dönüşür. Olası bir istemeyen durumda daha güvenliklidir. Test bölgesinde bulunan sıvıya istenilen hızda ve sabit debide akış sağlamak için sürücü ayarlı santrifüj pompa kullanılır. Türbülansı azaltmak için petek yapılar veya düzleştiriciler yer alır. Sisteme saf su girişini ve deney sonrasında sıvının tahliye edilmesini PVC borular yardımı ile sağlanır.

Hız ölçümlerinde pitot tüpü, noktasal hız ölçümleri için kullanılır [8]. Özellikle test bölümünde referans olarak tercih edilir. LDA(Laser Doppler Anemometri), temassız ve çok hassas hız ölçümü sağlar. PIV(Particle Image Velocimetry), akışa katılan partiküllerin iki farklı noktada konularına bakarak hız vektör alanı çıkarabilir [4]. En gelişmiş ve detaylı hız haritasını sağlar.

Kuvvet ve tork ölçümlerinde yük hücreleri(load cells) kullanılır [8]. Deney parçacığı üzerine etki eden kaldırma, sürükleme gibi kuvvetler ölçülür.

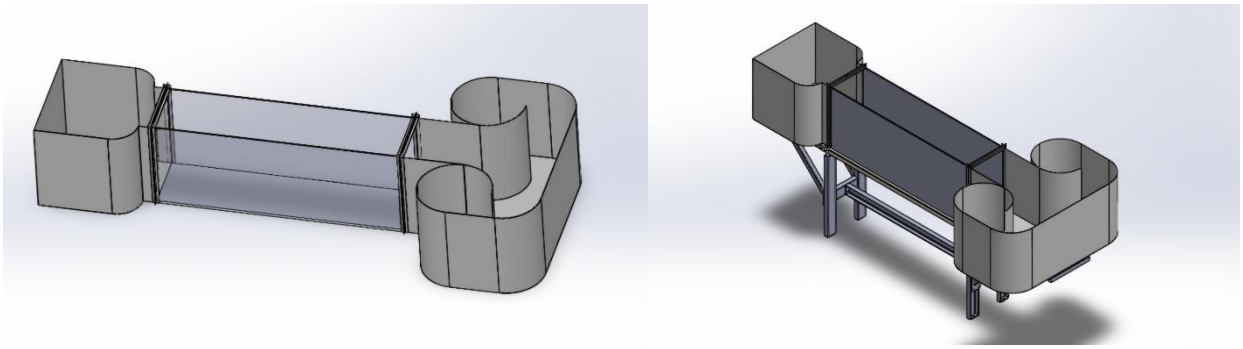
Akış görselleştirme teknikleri en çok bilenen yöntem olan boyalar ve renkli akışkanlar ile akış çizgileri ve ayrılma noktaları gözlemlenir. Thread method yöntemi ile modelin üzerine ince iplikler yerleştirilerek yüzey akışı analiz edilir. Hava kabarcığı yöntemi ile de suya hava kabarcığı verilerek iz akımları görselleştirilir.

Yüksek yoğunlukları sayesinde, benzerlik prensipleri çerçevesinde daha düşük hızlarda yüksek Reynolds sayıları elde edilebilir [12].

Gemi hidrodinamiğinde dümen ve pervane testleri, dalga direncinin azaltılması ve gemi gövde formunun optimizasyonuna yönelik araştırmalara su tünelleri imkan sağlar. Hidroelektrik türbin kanatlarında kavitasyon incelemeleri ve kanat profillerinin akış altında performans testleri yapılabilir. Denizaltı gibi sualtı araçlarında ise manevra testleri yapılabilir [1]. Gerinim ölçerler ve yük hücreleri yardımıyla kaldırma, sürükleme kuvvetleri ve momentler hassas olarak ölçülür [11].

Deney düzeneği olan su tüneli, laminer ve türbülanslı geçişleri analiz edebilir. Düşük akış hızlarında bile ölçülebilir kuvvetlerin oluşması, deneylerin hassasiyetini arttırır [11]. Şeffaf test bölümünde görsel gözlem imkanı bulunur. Maliyet açısından rüzgar tüneline göre daha ekonomiktir.

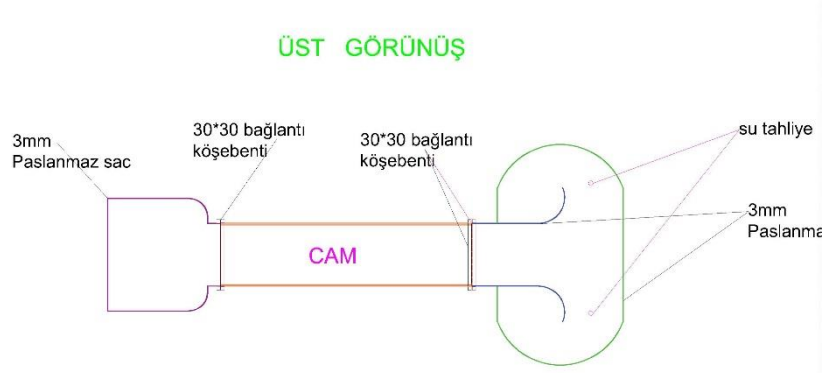
B. Tasarıma Ait Çizimler



Resim 1-2: Tasarlanan Su Tüneli 3D Solid Works Çizimleri

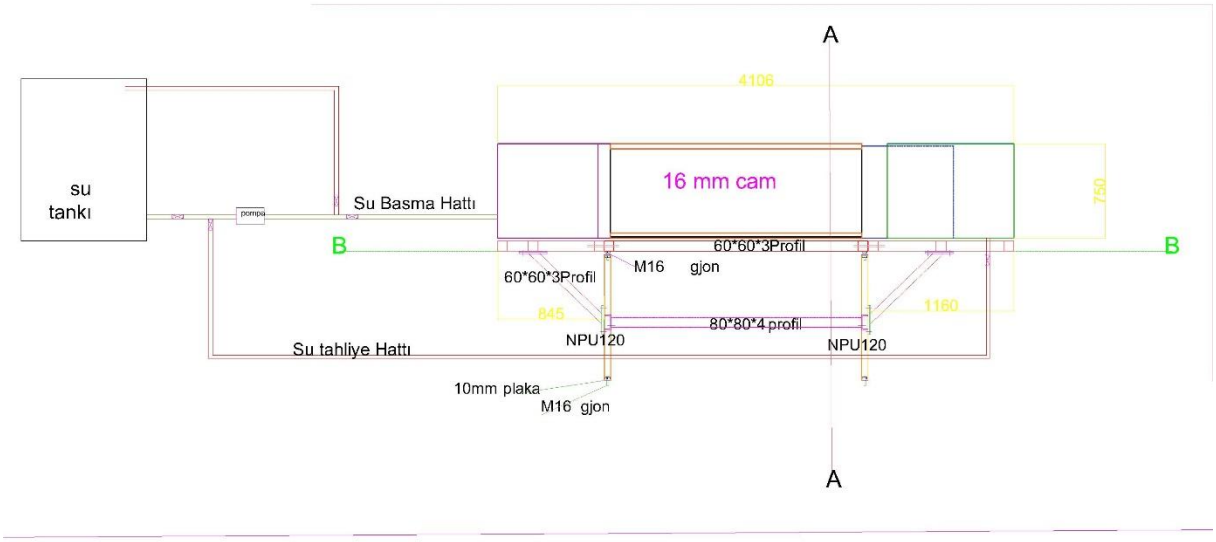
III. BULGULAR

Tasarım sürecinde elde edilen başlıca bulgular şu şekilde sıralanabilir. Tünel tasarımı fikrini karar verdiğimizde ilk olarak literatür taraması yapılmıştır. Maalesef su tüneli ile alakalı çok fazla çalışma bilgisi bulunmamaktadır. Bu deney düzenekleri konusunda zorlayıcı bir başlangıca sebebiyet vermiştir. Su tüneli eğitim amaçlarına uygun olarak imkanlar dahilinde en iyi şekilde tasarlanmıştır. Akış çeşitlerini sorunsuz bir şekilde yakalayabileceğimiz tasarımlar incelenmiş, mühendislik bilgi birikimlerimiz doğrultusunda harmanlanmış bir model üretilmiştir. Bu bulgular sonucunda tasarlanmış su tüneli, mühendislik uygulamalarında özellikle akışın kontrol edilmesi gerekli sistemlerin tasarımını anlamada faydalı olacaktır [5].



Resim 3: Tasarlanan Su Tüneli AutoCad Çizim

Eğitim amaçlı su tünellinin tasarım aşaması sonuçlanmıştır.



Resim 4: Tasarlanan Su Tüneli AutoCad Çizim

IV. TARTIŞMA

Çalışmada tasarlanan deney düzeneği tasarımı, ekonomik açıdan ve materyal dayanıklılığı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Yapılan statik hesap sonucunda su tünelinin taşıyıcı kolonlarının her türlü darbe ve basınca dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki benzer tasarımlarla karşılaştırıldığında bu model hem malzeme kullanma hem de verimlilik en önemlisi ise yapım süresinde azalma sağlamaktadır. Gelecek araştırmalarda deney düzeneğinin test edilmesi ve eğitime katkı olarak önemli adımlar olacaktır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, su tüneli tasarımına yönelik temel mühendislik ilkeleri ele alınarak, hidrolik performans, yapısal dayanıklılık ve ekonomik verimlilik kriterleri doğrultusunda kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır. Yapılan analizler uygun deney düzeneği kesit seçimi, malzeme tercihleri ve debi hesaplarının projenin başarısı açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir. Maliyet ve güvenlik açısından önemli olumlu sonuçlar doğuracağı kesinleşmiştir. Bu bağlamda sürdürülebilir ve uzun ömürlü bir su tüneli tasarımı için disiplinler arası bir yaklaşımın benimsenmesi gerekliliği ortaya koyulmuştur.

TEŞEKKÜR

Prof. Dr. Mustafa Arif ÖZGÜR başta olmak üzere Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne ve Mustafa ÇAMURDIK' a bütün destekleri için teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

[1] Simulation and experimental research on hydrodynamic performance of fully attached submarine in the surface and near the surface models: 2023, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801823011691
[2] Numerical Investigation and Water Tunnel Experiment For F35 Fighter Jet: 2020, Hacı SOĞUKPINAR, Serkan Çağ, Bülent YANIKTEPE https://dergipark.org.tr/tr/pub/adyujsci/issue/55214/725785
[3] Design and Development of Low-Cost Water Tunnel for Educational Purpose: M.Zahari and S S Dol https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/78/1/012040

[4] Effect of Permeability and Length of a Perforated Splitter Plate Downstream of the Circular Cylinder: 2024, S.Şahin/ T. Durhasan/ E.Pınar and H.Akıllı https://www.jafmonline.net/article_2519_cbf8f783ea1a418fc3ef5ecf7cb77695.pdf
[5] Dye Injection Flow Visualization Around a Rotating Circular Cylinder: 2020, Coşkun Özalp/ Cemre Polat/ D.Burak Saydam/ Mustafa Söyler. https://dergipark.org.tr/en/pub/ems/issue/56850/794683
[6] Viscous Flow Computations for the Diffuser Section of a Large Water Tunnel: Ahmet Yusuf GÜRKAN/ Çağatay Sabri KÖKSAL/ Çağri AYDIN/ Uğur Oral ÜNSAL. https://www.researchgate.net/publication/335061976_Viscous_Flow_Computations_for_the_Diffuser_Section_of_a_Large_Water_Tunnel
[7] Design of Contraction, Test Section, and Diffuser for a High-Speed Water Tunnel: 2021, Ivaylo NEDYALKOV https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/174857/174857.pdf
[8] Low Speed Water Tunnel Testing : 2014, John J. Taylor. https://scholarworks.utrgv.edu/leg_etd/978/
[9] Akışkanlar Mekaniği – Yunus Çengel, John Cimbela
[10] Fluid Mechanics – Frank M. White
[11] Flow Visualization: Techniques and Examples – G.S.Settles
[12] Fluid Mechanics Laboratory: Experiments and Theory – David e. Westbury