

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIM DÜZENLEYİCİLERİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Ahmet Çağrı BİLİR

DOKTORA TEZİ

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Danışman
Prof. Dr. Nurten VARDAR

Ocak, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIM DÜZENLEYİCİLERİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Ahmet Çağrı BİLİR tarafından hazırlanan tez çalışması 11.01.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nurten VARDAR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nurten VARDAR, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tamer YILMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Taner COŞGUN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ömer Kemal KINACI, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ali DOĞRUL, Üye
Milli Savunma Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Nurten VARDAR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Akım Düzenleyicilerin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmet Çağrı BİLİR

İmza



Bu çalışma, YÖK100/2000 Doktora Bursu ve Türk Loydu Vakfı tarafından desteklenmiştir.



Canım anneme,

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin hazırlanması süresince bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, hayatıma dokunan ve her daim yanımda olan tez danışmanım sayın Prof. Dr. Nurten VARDAR'a canı yürekten teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarımda karşılaştığım her zorlukta bana yol gösteren, hep yanımda olan ve beni cesaretlendiren değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali DOĞRUL'a sonsuz teşekkür ederim. Linsasüstü eğitimim süresince yaptığım her çalışmamda desteğini hissettiğim, her daim vizyonu ve samimiyeti ile yolumu aydınlatan değerli arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Emre KAHRAMANOĞLU'na en derinden teşekkürlerimi sunarım.

Endüstriyel çalışmalarımı ve deneyimlerimi akademik hayatla harmanlamam konusunda her daim desteğini hissettiğim Marsis Dış Tic. ve Gemi San. Ltd. Şti. Genel Müdürü Sn. İlker ÖZYILDIZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Sadece eğitim serüvenimde değil, hayatımın her döneminde yanımda olan, beni büyüten, bana güvenen, varlığıyla huzur bulduğum ve hakkını asla ödeyemeyeceğim canım anneme tüm kalbimle teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca doktora çalışmam süresince bilimsel toplantılara katılmamı ve ihtiyaç duyduğum her türlü akademik kaynağa ulaşmamı sağlayan, doktora burs programı kapsamında beni destekleyen Yüksek Öğretim Kurumu'na ve Türk Loydu Vakfı'na teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Çağrı BİLİR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	2
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	8
2 AKIM DÜZENLEYİCİLERİN TASARIMI, SINIFLANDIRILMASI VE ENDÜSTRİYEL BİR SİSTEM ÜZERİNDE UYGULANMASI	9
3 AKIM DÜZENLEYİCİLERİN DENEYSEL YÖNTEMLE İNCELENMESİ	24
3.1 Deneyde Kullanılan Ekipmanlar	25
3.2 Deney Düzeneği ve Deneysel Sonuçlar	27
4 AKIM DÜZENLEYİCİLERİN SAYISAL YÖNTEMLE İNCELENMESİ	31
4.1 Matematiksel Model.....	32
4.2 Sonlu Hacimler Yöntemi	33
4.2.1 RANS Denklemleri.....	34
4.2.2 Reynolds-Gerilme Denklemi	35
4.2.3 Türbülans Kinetik Enerjisi Transport Denklemi	36
4.2.4 Türbülans Modeli (Standart k- ω)	36
4.2.5 Duvar Fonksiyonu.....	38
4.2.6 Ardışık Çözüm Metodu	40
4.3 Hesaplama Hacmi, Sınır Koşulları ve Ağ Yapısı	41
4.4 Sonuçlar.....	43
4.4.1 Belirsizlik Değerlendirmesi.....	43
4.4.2 Deney ile Sayısal Sonuçların Doğrulanması.....	46
4.4.3 Farklı Tipte Akım Düzenleyicilerin Karşılaştırılması.....	48

4.4.4 Akım Düzenleyici Uzunluğunun Performansa Etkisi	57
5 SONUÇ VE ÖNERİLER	65
KAYNAKÇA	69
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	75



SİMGE LİSTESİ

L	Akım düzenleyici boyu
V	Akış hızı
φ	Akışkanın herhangi bir özelliği
P	Basınç
Π_{ij}	Basınç gerinimi korelasyon tensörü
S_L	Bir skalere ait herhangi bir çözümde elde edilen en düşük değer
S_U	Bir skalere ait herhangi bir çözümde elde edilen en yüksek değer
k	Boyutsuz basınç kayıp katsayısı
u_i'	Çalkantı hız vektörü
D	Çap
P_2	Çıkış basıncı
μ	Dinamik viskozite
ε_{ij}	Farklı çözümler arasındaki fark
s_{ij}	Gerilme oranı tensörünü
P_1	Giriş basıncı
p	Görünür mertebe
ε_i	Her bir senaryo için yüzde bağıl hata miktarı
e_a^{ij}	Herhangi bir çözüme ait bağıl hata
φ_i	Herhangi bir çözüme ait skaler değer
φ_{ij}^{ext}	Herhangi bir çözüme göre ekstrapole edilmiş değer
G_k	k 'dan kaynaklı ortalama hız gradyeni kinetik enerji üretimi
Γ_k	k 'nın difüzivitesi
S_φ	Kaynak terimi
u	Kinematik viskozite
m	Kütle
S	Ortalama strain tensörü

τ_{ij}	Ortalama viskoz tensör bileşeni
T	Periyot
Rn	Reynolds sayısı
r	Sıklaştırma faktörü
ρ	Su yoğunluğu
C_F	Sürtünme katsayısı
U_K	Toplam belirsizlik değeri
k- ω	Türbülans kinetik enerjisi ve kayıp oranı
Y_k	Türbülansstan dolayı k'ya dayalı kayıp
Y_ω	Türbülansstan dolayı ω 'ya dayalı kayıp
σ_k	Türbülans Prandtl sayısı
σ_ω	Türbülans Prandtl sayısı
C_{ijk}	Türbülans taşınım tensörü
∂t_{ji}	Viskoz gerilme tensörü
ε	Viskoz kayıp terimi
Γ_ω	ω 'nın difüzivitesi
G_ω	ω 'dan kaynaklı ortalama hız gradyeni kinetik enerji üretimi
u^+	Yakın duvar hızı
R	Yakınsama kriteri
ϵ_{ij}	Yayılma tensörü
g	Yerçekimi ivmesi
t	Zaman
Δt	Zaman adımı
$\overline{U_i}$	Zaman ortalamalı hız vektörü

KISALTMA LİSTESİ

BV	Fransız Loydu (Bureau Veritas)
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CPU	Merkezi İşlem Birimi
DLH	Devlet Liman Hizmetleri
FIFI	Yangın Söndürme (Fire- Fighting)
GCI	Ağ Yakınsama İndeksi
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HYS	Harici Yangın Söndürme
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
ITTC	Uluslararası Çekme Tankı Konferansı
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier Stokes
SHY	Sonlu Hacimler Yöntemi
SIMPLE	Yarı Örtülü Basınç İlişkili Eşitlikler Yöntemi
TKE	Türbülans Kinetik Enerjisi
TL	Türk Loydu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Tube Bundle, Etoile ve Law's akım düzenleyicileri temsili görselleri ...	10
Şekil 2.2 Yangın söndürme gemisinin açık deniz yangınına müdahalesi	15
Şekil 2.3 Römorkör gemisinin Haydarpaşa Garı yangınına müdahalesi	15
Şekil 2.4 Römorkör gemisinin Galatasaray Üniversitesi yangınına müdahalesi .	16
Şekil 2.5 Su topu parçaları; gövde, boru hattı, nozul	17
Şekil 2.6 Akım düzenleyici performansının gözlemlendiği endüstriyel ekipman tasarımı.....	19
Şekil 2.7 Özgün akım düzenleyici tasarımı	19
Şekil 2.8 Zanker (ISO tipi) akım düzenleyici tasarımı.....	20
Şekil 2.9 Tube Bundle (ISO tipi) akım düzenleyici tasarımı.....	21
Şekil 2.10 Zanker (ISO tipi) akım düzenleyici tasarımı ve su topu üzerinde gösterimi.....	22
Şekil 2.11 Tube Bundle (ISO tipi) akım düzenleyici tasarımı ve su topu üzerinde gösterimi.....	22
Şekil 2.12 Özgün akım düzenleyici tasarımı ve su topu üzerinde gösterimi	23
Şekil 3.1 Prototip özgün akım düzenleyici	25
Şekil 3.2 Akım düzenleyici performansının gözlemlendiği prototip ekipman	26
Şekil 3.3 Dizel motor ve santrifüj pompa	26
Şekil 3.4 Deney düzeneğine ait şema.....	28
Şekil 3.5 Deney düzeneğine ait resim	28
Şekil 3.6 Deney sırasında debi ölçümü ile ilgili alınan görsel.....	29
Şekil 3.7 Deney sırasında suyun atma mesafesi ile ilgili alınan görsel.....	29
Şekil 4.1 Türbülanslı sınır tabaka	39
Şekil 4.2 Sınır şartları	41
Şekil 4.3 Ağ yapısı	43
Şekil 4.4 Deneysel ve sayısal verilerin karşılaştırılması	47
Şekil 4.5 200mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırması.....	50
Şekil 4.6 31.5mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırması.....	51
Şekil 4.7 200mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından karşılaştırma.....	52

Şekil 4.8 31.5mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından karşılaştırma.....	53
Şekil 4.9 Akım düzenleyici bulundurmayan su topunun akım hatları	55
Şekil 4.10 31.5mm Zanker akım düzenleyicili su topu akım hatları.....	55
Şekil 4.11 200mm Zanker akım düzenleyicili su topu akım hatları.....	56
Şekil 4.12 31.5mm Tube Bundle akım düzenleyicili su topu akım hatları.....	56
Şekil 4.13 200mm Tube Bundle akım düzenleyicili su topu akım hatları.....	57
Şekil 4.14 31.5mm özgün akım düzenleyicili su topu akım hatları	58
Şekil 4.15 50mm özgün akım düzenleyicili su topu akım hatları	59
Şekil 4.16 100mm özgün akım düzenleyicili su topu akım hatları	59
Şekil 4.17 200mm özgün akım düzenleyicili su topu akım hatları	60
Şekil 4.18 Özgün akım düzenleyici uzunluğunun debi üzerindeki etkisi.....	61
Şekil 4.19 Özgün akım düzenleyici uzunluğunun debi üzerindeki etkisi.....	62
Şekil 4.20 Özgün akım düzenleyici uzunluğunun boyutsuz basınç kayıp katsayısı üzerindeki etkisi.....	63

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Tüp demeti (Tube Bundle) yapısındaki farklı akım düzenleyici plakaların boyutsuz basınç kayıp katsayıları	111
Tablo 2.2 Izgara (Vanes/Screens) yapısındaki farklı akım düzenleyici plakaların boyutsuz basınç kayıp katsayıları	111
Tablo 2.3 Delikli plaka (Perforated Plate) yapısındaki farklı akım düzenleyici plakaların boyutsuz basınç kayıp katsayıları	111
Tablo 2.4 Bureau Veritas HYS sistemi kuralı.....	133
Tablo 2.5 Türk Loydu HYS sistemi kuralı.....	133
Tablo 2.6 Zanker tipi akım düzenleyici ampirik geometrik özellikleri	21
Tablo 3.1 Özgün akım düzenleyicili su topuna ait deney sonuçları.....	300
Tablo 4.1 Belirsizlik hesabı için kullanılan analiz setlerinin özellikleri.....	466
Tablo 4.2 Zaman adımı ve eleman sayısı için hesaplanan debi ve belirsizlik değerleri	466
Tablo 4.3 Deneyssel, sayısal çalışmalardan elde edilen debi mukayesesi.....	48
Tablo 4.4 Farklı akım düzenleyici tiplerinde sayısal analizlere ait test matrisi ...	49
Tablo 4.5 200mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırma	50
Tablo 4.6 31.5mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırma	511
Tablo 4.7 200mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından karşılaştırma	533
Tablo 4.8 31.5mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından karşılaştırma	544
Tablo 4.9 Farklı uzunluklardaki özgün akım düzenleyiciler için sayısal analizlere ait test matrisi.....	58
Tablo 4.10 Farklı uzunluklardaki özgün akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından mukayesesi	622
Tablo 4.11 Farklı uzunluklardaki özgün akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırılması.....	644

Akım Düzenleyicilerin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi

Ahmet Çağrı BİLİR

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nurten VARDAR

İç akışlarda karmaşık hacim geometrisi, redüser, difüzör, dirsek, T bağlantısı, vana ve fitting gibi montaj elemanları akış rejiminin bozulmasına ve türbülansa neden olabilmektedir. Tüm bunlar iç akışlarda basınç kaybına ve verim düşümüne sebep olmaktadır. Bu verim kaybı, daha yüksek kapasitede pompa kullanımına yani bir başka deyişle pompanın daha yüksek basınçta ve debide kullanılmasına neden olmaktadır. Bu durum daha yüksek güçte motor seçimine, dolayısıyla da daha fazla yakıt sarfiyatına sebebiyet vermektedir. Tüm bunlar da hem ekonomik hem de çevresel açıdan zarara yol açmaktadır. Bu zararların asgari düzeye indirilmesi amacıyla akım düzenleyiciler uzun yıllardır endüstrinin pek çok alanında boru içi akışlarda akımın düzenlenmesi için kullanılmaktadır.

Akımın düzenlenmesi döngüsel, girdaplı ve dalgalı akım hatlarının daha düzgün hale getirilmesidir. Akımın düzenlenmesine gaz, yağ, su ve kimyasallar gibi kütsel ve hacimsel debinin önemli olduğu boru içi transfer proseslerinde ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doktora tezi kapsamında farklı akım düzenleyici plakalar tasarlanmış, bu plakaların genel performansı sayısal ve deneysel yöntemlerle irdelenmiş ve sonuçlar birbiriyle mukayese edilerek daha iyi performansa sahip akım düzenleyici plaka belirlenmiştir.

Literatür çalışmasında akış ölçümlerinin doğruluğu için akım düzenleyicilerin yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca ISO, 5167 standardında çeşitli akım düzenleyici plaka tasarımlarını göstermekte, akış ölçüm hatalarıyla başa çıkarak ölçümlerin doğruluğunu artırmak amacıyla akım düzenleyicilerin kullanımını önermektedir.

Tube Bundle ve Zanker plakasının yanısıra özgün bir akım düzenleyici tasarlanarak denizcilik endüstrisinde kullanılan bir akış ekipmanı içine sayısal ve deneysel çalışmalar için yerleştirilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği sonuçlarının yapılan deney çalışması sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu ve sayısal analiz çalışmalarının güvenli bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Sayısal analiz sonuçlarında özgün akım düzenleyicinin Tube Bundle ve Zanker plakasına göre debi, basınç, boyutsuz basınç kayıp katsayısı ve akım hatlarının düzenlenmesi bakımından daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bu sonuçların akabinde özgün akım düzenleyicisi farklı uzunlukluklarda tasarlanarak sayısal analiz çalışmaları farklı giriş koşulları için genişletilmiş ve plaka uzunluğunun akım hatlarının düzenlenmesine olan etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boru iç akış, akım düzenleyici, basınç kaybı, hesaplamalı ve deneysel akışkanlar mekaniği, yangın söndürme

Experimental and Numerical Investigation of Flow Conditioners

Ahmet Çağrı BİLİR

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Nurten VARDAR

Complex flow volume geometry, assembly elements such as reducer, diffuser, elbow, tee, valve and fitting cause disturbance of flow regime and turbulence. This loss of efficiency leads to the use of higher capacity pumps, in other words, the pump to be used at higher pressure and flow. This situation leads to higher power engine selection and therefore more fuel consumption. All of these cause both economic and environmental damage. In order to minimize these damages, flow regulators have been used for years in many areas of industrial projects to regulate the flow in pipe flows.

Regulation of the flow is the elimination of swirl, vortex and fluctuating streamlines and making them smoother. Flow regulation is greatly needed in in-pipe transfer processes where mass and volumetric flow is important, such as gas, oil, water and chemicals. Within the scope of this doctoral thesis, different flow conditioner plates were designed and the overall performance of these plates was investigated numerically and experimentally.

In the literature studies, it has been clearly seen that flow regulating structures are extensively used for the accuracy of flow measurements. In addition, the International Standard Organization (ISO) shows various flow regulator plate designs in the ISO-5167-3 "orifice plates" standard published and recommends

the use of flow regulators in order to cope with flow measurement errors and increase the accuracy of measurements.

In addition to the Tube Bundle and Zanker flow regulators with different geometries in the ISO standard, a unique flow regulator was designed and placed in a flow equipment used in the maritime industry for experimental and numerical studies. Then, it has been concluded that CFD results are in good agreement with the experimental results and it is a safe tool for numerical analysis studies.

In the numerical analysis results, it was seen that the unique flow conditioner had better performance than Tube Bundle and Zanker in terms of flow, pressure, dimensionless pressure loss coefficient and regulation of streamlines. After these results, the unique flow regulator was designed in different lengths, numerical analysis studies were extended for different input conditions and the effects of plate length on the regulation of streamlines were examined.

Keywords: Pipe internal flow, flow conditioner, pressure drop, computational and experimental fluids dynamic, fire-fighting

Akışı düzenlemek, kontrol altına almak ve yönlendirmek çok eski zamanlardan günümüze uzanan bir konudur. Öyle ki su kemerleri, su savakları ve daha pek çok alanda insanlık tarihinde, insanların akımı düzenlemeye dair çabalarını gösteren tarihi kanıtlar günümüzde de görülmektedir. Her ne kadar akım düzenleyiciler şekil olarak birbirinden çok farklı görünseler de, tümü ortak bir amaç için kullanılmaktadır, bu da akımın düzenlenmesidir. İç akış, dış akış, akışkanın cinsi ve akış hacmi geometrisi gibi pek çok farklı değişkeni yönetmek akım düzenleyicilerin işinin çok da kolay olmadığını göstermektedir. Buna bir de akış içerisindeki dalgalanma, girdap ve döngülü akış gibi farklı türbülans özelliklerinin giderilmesi konusu da dahil olduğunda, tamamen ihtiyaca ve hizmete özel akım düzenleyicilerin tasarlanması kaçınılmazdır. Bu da günümüzde farklı sektörlerde kullanılan akım düzenleyicilerin yüksek çeşitliliğinin sebebini açıklamaktadır.

Akım düzenleyiciler akışın sözde tam gelişmiş olmasını veya farklı bir deyişle laminarizasyonunu sağlar. Laminarizasyon akışın türbülanslı halden laminar hale geçişi olarak tanımlansa da, esas olarak akım düzenleyicilerin akıştaki türbülansı azaltmak, akım hatlarını ve akışı düzenlemek gibi ana görevleri vardır ve her zaman akışın tam laminar hale getirilmesine ihtiyaç olmayabilir. Pek çok mühendislik çalışmasında olduğu gibi akımı düzenlemek de tamamen bir optimizasyon çalışmasını gerektirir. Akım düzenleyiciler bir yandan istenen özelliklerde akışı düzenlemeyi ana misyon edinse de diğer yandan akışın ana karakteristiğini bozmadan ve mücadele edilen basınç kaybı ve akış hızı gibi kriterleri aşmadan tamamen probleme özgü optimum çözümü sunmalıdırlar. Zira çözüm olarak kullanılan bu ürünlerin çevrime ilave bir problem getirmesi istenmez. Bu nedenle akım düzenleyicilerinin kesit geometrisinin yanında uzunluklarının da optimize edilmesi gerekmektedir.

On yıllardır standart hale getirilen, çeşitli kaynaklarda ampirik olarak formülize edilen ve yaygın bir şekilde kullanılan akım düzenleyiciler literatürde bulunmaktadır ve bu standardize edilen akım düzenleyiciler çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Öyle ki Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO) yayınladığı ISO-5167-3 [1] standartında çeşitli akım düzenleyici plaka tasarımlarını göstermekte, akış ölçüm hatalarıyla başa çıkarak ölçümlerin doğruluğunu artırmak amacıyla orifis plakaları başlığı altında çeşitli ampirik formüllerle standardize edilen akım düzenleyicilerin kullanımını tavsiye etmektedir. Buna rağmen, yine literatürde ve endüstriyel uygulamalarda pek çok özgün ve probleme özel uyarlanmış akım düzenleyiciler de bulunmaktadır. Akıştaki problem çeşitliliği arttıkça her türden probleme uygulanabilen özgün akım düzenleyici çalışmaları da gün geçtikçe artmaktadır.

Literatür çalışmalarında doğruluk ve hassasiyetin önemli olduğu proseslerde deneysel çalışmalar yapılıyor olsa da hızlı ve kolay tekrarlanabilirlik ve daha düşük maliyetli olması sebebiyle ampirik yöntemler ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulamaları ile de çalışmalar yürütülmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan iş istasyonları, araştırmacıların HAD yöntemleri ile genel olarak sonlu hacimler yöntemine dayanan çözücülerin (ticari, özgün ya da açık kaynak), yüksek kapasiteli bilgisayarlarda her türden akışkan problemine uygulanmasına imkan tanımaktadır. Yüksek doğrulukla her türden akışkan problemine uygulanabilen bu yöntemlerin kullanım sıklığı da gün geçtikçe artmaktadır. Öyle ki artık bu tür ticari yazılımlar, yüksek sadakatli sayısal çözücü olarak adlandırılmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

Akım düzenleyici plakalar ve akışın düzenlenmesine ilişkin literatür detaylı olarak incelendiğinde önceki bölümde bahsedildiği gibi çalışmaların hangi yöntemler ile gerçekleştirildiği incelenerek bir sınıflandırma yapılabilir. Bu çalışmada akım düzenleyiciler ile ilgili genel literatür, uygulanan yöntem üzerinden gerçekleştirilen bir sınıflandırma ile özetlenecektir.

İlk olarak yapılan bazı deneysel çalışmalar özetlenecek olup, devamında kullanılan sayısal yöntemlere ilişkin literatür özetlenerek bu kısım son bulacaktır.

İlerleyen teknoloji sayesinde farklı teknikler ortaya çıksa da deneysel çalışmalar halen en güvenilir kaynak olarak gösterilebilir. Bu sebeple literatür detaylı incelendiğinde geçmişten bu yana yapılmış pek çok deneysel çalışmayla karşılaşmak mümkündür.

Karmaşık bir akış profilinin çok yollu bir ultrasonik akış ölçerin performansı üzerindeki etkisini araştırmak için Brown ve Griffith [2] deneysel olarak farklı akım düzenleyici tasarımlarını incelemiş ve ultrasonik akış ölçerlerle kullanılması amaçlanan yeni bir akım düzenleyici tasarımı önermiştir. Deneyde yaptıkları ölçümlere göre, yeni tasarlanan akım düzenleyici ile elde edilen akımın düzenlenmesine dair sonuçlar Laws tipindeki akım düzenleyici plakaya eşdeğer bulunmuştur, ancak bunu basınç kaybının yarısından daha azıyla sağlamayı başarmışlardır.

Akım düzenleyicilerin kullanılması yalnızca akış ölçer performansını iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda boru tesisatı maliyetini de düşürür. Xiong ve arkadaşları [3] farklı tipteki akım düzenleyicileri farklı kalınlıklarda tasarlamışlar ve akabinde bu tasarım farklılığın akım düzenleyici performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak karşılaştırmak için bir çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışma özelinde delikli plakaların tüp demetinden daha verimli olduğunu göstermişlerdir. Benzer bir karşılaştırmalı deneysel çalışma Laribi ve arkadaşları [4] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmaya göre, her akım düzenleyici belirli bir akış parametresini etkiler. Hız profilini düzenlemek konusundaki en iyi performans Laws delikli plakalar ile elde edilmiştir. Akış içindeki girdapların düzenlenmesi için en iyi sonuçlar tüp demeti tarafından elde edilirken, genel türbülans yoğunluk profilinin düzenlenmesinde Etoile plakasının daha uygun olduğu gösterilmiştir. Farklı akım düzenleyicilerin birlikte kullanımıyla oluşturulan bir kombinasyonunun akış parametrelerini olumlu etkileyebileceği ve akımın düzenlenmesinde daha verimli olabileceği sonucuna varılmıştır.

Laws ve Quazzane [5], akım düzenleyici performansını hız, akım hattı profilleri ve türbülans yoğunluğu gibi parametreler üzerinden inceleyerek, akış kalitesini gözlemlemek için farklı akım düzenleyici tipleri ve uzunlukları ile detaylı bir deneysel çalışma yapmışlardır. Akım düzenleyici plaka uzunluklarının plaka verimliliklerini etkilediğini göstermişlerdir. Ayrıca Laws ve balpeteği (honeycomb) akım düzenleyici plakalarının Zanker'e göre daha iyi performans sergilediğini gözler önüne sermişlerdir.

Ahmed Hadi Razali ve arkadaşları [6] boru akışında akım düzenleyicilerinin kesit alanlarının, boru iç kesitine olan oranlarının (porosity) akımın düzenlenmesine etkisini araştırmak için deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Daha yüksek akış geçirgenliğinin daha az basınç düşüşüne neden olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca sınır koşullarında akışkanın giriş hızı arttığında basınç düşüşünün de arttığını belirtmişlerdir.

Özetlenen deneysel çalışmalar göz önüne alındığında yatırım ve işletme maliyetinden kaynaklı olarak bu yöntem tasnif edilen yöntemler arasındaki en pahalı yöntemdir. Ayrıca bu tarz çalışmalarda elde edilmek istenen çıktıya göre yeni bir ölçüm sistemi tasarlamak, bu ölçüm sistemindeki belirsizlikler, ölçüm aletlerindeki kalibrasyonun deney boyunca sürekliliğinin sağlanması gibi zorluklar bu yöntemlerin dezavantajları olarak gösterilebilir. Genel olarak deney çıktılarının hız, debi ve basınç olduğu düşünülürse, her türden hidrodinamik probleme ilişkin genel bir bakış açısına güvenli bir şekilde erişilebilmeye imkan vermesi ise deneysel yöntemin en önemli avantajı olarak öne çıkmaktadır.

Son yıllarda bilgisayar teknolojisi hızla gelişmektedir ve bu gelişmeyle birlikte boru içindeki viskoz akışı sonlu hacimler olarak belirtilen yöntem (SHY) ile ayırıştırarak çözebilen türlü hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) uygulamaları, her çeşit akışkanlar mekaniği probleminde olduğu gibi akımın düzenlenmesi alanındaki problemlerde de sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Akım düzenleyicilerin etkilerini ve performansını HAD yaklaşımları ile inceleyen pek çok çalışma literatürde kendine oldukça geniş bir alanda yer bulmakta ve bu çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

Chen ve Liu [7], yapmış oldukları sayısal analiz çalışmasında bir girdap üreticisinin bulunduğu akış alanında bir Etoile akım düzenleyicisinin performansını araştırmış ve Etoile plakasının anormal akış alanının düzenlenmesine yardımcı olduğunu bulmuşlardır. Bu çalışmanın devamında araştırmacılar yeni ve özgün bir akım düzenleyici tasarlamış ve belirli bir Reynolds sayısı aralığında Etoile akım düzenleyici ile karşılaştırıldığında yeni tasarımın daha iyi performans sergilediğini göstermişlerdir.

Lahadi ve diğerleri [8], yaptıkları sayısal analiz çalışmasında, bir boru akışında bulunan fraktal grid'in türbülans yoğunluğu ve basınç düşümü etkilerine dayanan bir çalışma sunmuştur. Farklı gözenekliliğe (porosity), bir başka deyişle akış geçirgenliğine sahip üç plaka karşılaştırmış ve yüksek akış geçirgenlik oranına sahip plakanın daha yüksek türbülans yoğunluğunu azaltabileceğini göstermişlerdir.

Pramiyanti ve arkadaşları [9] ayrıca üç farklı uzulukta delikli plakalar ile sayısal bir çalışma yürütmüştür. Sonuçlar, delikli plakanın girdapları ortadan kaldırmak ve iç akışlar için standart bir hız profili oluşturmak için kullanılabileceğini göstermiştir.

Zaryankin ve arkadaşları [10], borulardaki yüksek basınçlı su akışında yaygın olarak kullanılan akım düzenleyicileri sayısal olarak araştırmışlardır. Daha sonra yüksek basınçlı akışın neden olduğu dinamik yükü azaltmak için belirli akış düzenleyici geometrileri önermişlerdir. Yeni tasarladıkları konfigürasyonların verimliliği HAD yöntemleri ile değerlendirmiş ve mevcut modellerle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, yeni konfigürasyonların, yeni akış düzenleyici tasarımı ile daha iyi akış düzenleme performansı sayesinde dinamik yüklerde önemli miktarda bir azalma gösterdiğini göstermişlerdir.

Wan ve arkadaşları [11] bir akış alanında AMCA akım düzenleyici yerleştirilerek ve akım düzenleyici olmadan yaptığı sayısal analiz çalışmalarında akım düzenleyicinin etkilerini incelemiştir.

Görüldüğü üzere akım düzenleyicilerin akımın düzenleme performansını hesaplamak için HAD yaklaşımları oldukça sık bir biçimde kullanılmaktadır [12-

14]. Bu çalışmaların dışında akım düzenleyicilerin performansının HAD ile incelendiği ve sonuçların yapılan deneysel veriler ile kıyaslandığı pek çok çalışma da literatürde bulunabilir.

Askari ve arkadaşları [15], NEL, Spearman ve Mitsubishi gibi iyi bilinen akış düzenleyiciler ile sayısal ve deneysel bir çalışma yürütmüştür. Araştırmacılar çalışmanın sonunda sayısal analizler ve deney çalışmaları arasında validasyonu sağlamış ve tasarladıkları yeni akım düzenleyici plaka ile optimum performansı elde etmişlerdir. Buna benzer bir çalışma Bayazıt ve arkadaşları [16] tarafından yürütülmüştür. Bir kare havalandırma kanalında farklı Reynolds sayılarında basınç düşüşüne neden olan ve akımın düzenlenmesini sağlayan akım düzenleyici plakasının gözeneklilik (porosity) ve uzunluk etkilerini araştırmışlardır. Analizler sayısal olarak gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda optimum performansa sahip akım düzenleyici üretilmiştir.

Akım düzenleyici plaka performansını karşılaştıran bir diğer sayısal ve deneysel çalışma Çarpınoğlu ve Özahi tarafından yapılmıştır [17]. Bir hava kompresörü sistemine Etoile, delikli plaka (perforated plate) ve tüp demeti (Tube Bundle) akım düzenleyicileri yerleştirip farklı Reynolds sayısında basınç kayıplarını ve türbülans yoğunluğunu araştırdılar. Test edilen tüm Reynolds sayısı koşulları için tüp demeti minimum basınç kayıplarına sahipken, delikli plakanın maksimum basınç kayıplarına sahip olduğunu göstermişlerdir.

Liu ve diğerleri [18], boru akışında küresel vananın neden olduğu türbülans etkisini ortadan kaldırmak için ISO tipi standart akım düzenleyici plakaların açısını değiştirerek sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonunda araştırmacılar kendi tasarladıkları plakanın standart ISO tipi plakalardan daha iyi performans gösterdiğini sunmuşlardır.

Chen ve arkadaşları [19], ultrasonik gaz debimetresinin ölçüm doğruluğu üzerindeki akış bozukluklarının etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmış ve karakteristik parametrelerin ölçüm doğruluğu üzerindeki fiziksel mekanizmasını araştırmışlardır. Açık bir şekilde, akım düzenleyicisiz akışı karşılaştırarak akım

düzenleyicilerin karmaşık akış üzerinde önemli derecede olumlu bir etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Uluslararası Standartlar Teşkilatı (ISO) akış ölçüm hatalarını en aza indirmek maksadıyla Gallagher, K-Lab, Nova, Tube Bundle ve Zanker gibi çeşitli akım düzenleyici tasarımlarını çeşitli ampirik ifadelerle standardize etmiş ve boru içi akışlarda kullanımlarını önermiştir. Tasarım tanımları, test koşulları ve tolerans değerleri ISO 5167-3 [1] standartı üzerinde gösterilmektedir.

Buna paralel olarak literatürde bulunan akım düzenleyicisi çalışmalarının önemli derecede büyük bir çoğunluğu [20-27] akış ölçüm hatalarıyla başa çıkmak ve alınan verilerin doğruluğunu artırmak suretiyle akış ölçer performansını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmalar genellikle ISO tipi veya literatürde yaygın olarak kullanılan farklı tipteki ve uzunluktaki akım düzenleyici plakaların bir endüstriyel uygulama içerisindeki etkilerini, performans mukayesesini sayısal ve veya deneysel olarak incelenmesini içermektedir.

Bununla birlikte literatür özetinde bahsedildiği üzere boru içi karmaşık akışın düzenlenerek akış performansını iyileştirmek maksadıyla farklı endüstriyel uygulamalar için de akım düzenleyici çalışmaları bulunmaktadır. Jeong ve arkadaşları [28] bir arabanın egzoz borusundaki akışın düzenlenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Farklı tipteki perfore akım düzenleyiciler tasarlayarak, sayısal analizler yapmışlar ve model üzerindeki Reynolds sayısı ile basınç düşümü arasındaki ilişkiyi farklı modeller için mukayese etmişler ve problem için en uygun olanı önermişlerdir.

Hooman [29] havacılık ve uzay mühendisliği alanında yaptığı doktora tez çalışmasında çok ölçekli fraktal ızgara kaynaklı akışın yakın iz bölgesindeki türbülanslı akışı deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada fraktal yapılar sayesinde isteğe özel uyarlanmış akım hatlarının oluşturulabileceği gösterilmiştir.

Malavasi ve arkadaşları [30] ise farklı uzunluk ve geometrilere sahip delikli perfore akım düzenleyicilerin bulunduğu bir boru içerisindeki akışta akım düzenleyicinin kavitasyon etkilerini sayısal ve deneysel olarak incelemiş ve sonuçları birbirleri ile mukayese etmişlerdir.

1.2 Tezin Amacı

Farklı tipteki akım düzenleyici plakaların genel akımı düzenleme performansını sayısal yolla incelemek, probleme özel kullanılabilir özgün metodolojiler ortaya koymak ve özgün çözümler geliştirmek bu doktora tezinin amacıdır. Bunun yanında denizcilik endüstrisinde kullanılan bir ürün için deneyler yaparak, deneysel sonuçları sayısal sonuçlarla mukayese etmek, sayısal çalışmaları farklı tipteki akım düzenleyiciler için de genişletmek ve bunların arasında mukayese yaparak akım düzenleyicilerin birbirine göre avantaj ve dezavantajlarını gözler önüne sermektir.

1.3 Hipotez

Akım düzenleyicilerin performansını inceleyebilmek adına var olan en güvenilir yöntemlerin başında deneysel yöntemler gelmektedir. Ancak bu alanda yapılacak olan deneysel çalışmalar için gerekli tesis altyapısının oluşturulmasındaki yatırım maliyeti, ölçüm sistemlerinin hazırlanması, işletme maliyeti, uzman personel temini gibi nedenler bu yöntemleri zaman zaman ulaşılamaz bir konuma yerleştirmektedir. Bu sebeple bu alanda yapılan çalışmalarda deneysel yöntemlere alternatif olarak sayısal yöntemlerin kullanılması, deneysel yöntemlerdeki bu zorlukları ciddi oranda azaltmaktadır. Bu yöntem hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımları olabilmektedir. Yöntemlerin tamamı doğru bir şekilde sonuç verdiğini ispatlayabilmek için deneysel veriye ihtiyaç duysa da, birkaç senaryo için yapılan ispatın ardından farklı senaryolar rahatlıkla yukarıda bahsedilen zorluklar olmadan incelenebilmektedir. Bu durum da sayısal yöntemleri deneysel çalışmalar için iyi bir alternatif haline getirmektedir.

Bu sayısal yöntemlerden biri olan ve pek çok doğrusal olmayan etkiyi göz önüne alarak hesaplama imkânı sunan HAD yaklaşımları hız, debi, basınç ve akım hattı gibi istenen kesitte alınabilen değerler sayesinde akım düzenleyicilerin performansını deneysel yöntemlere göre hızlı, düşük maliyetli ve yeterli bir doğrulukla hesaplayabilir.

AKIM DÜZENLEYİCİLERİN TASARIMI, SINIFLANDIRILMASI VE ENDÜSTRİYEL BİR SİSTEM ÜZERİNDE UYGULANMASI

Bu bölümde çeşitli akım düzenleyici plakaların farklı özelliklere göre sınıflandırılması ve farklı akım düzenleyici tasarımlarının akış alanı üzerindeki etkileri hakkında genel bilgiler verilecektir.

Akım düzenleyiciler; boru içi akışta bulunan döngülü ve girdaplı akışı önemli ölçüde değiştirir, akış profili simetrisini düzeltmeye ve bozulmaları ortadan kaldırmaya yardımcı olur. Ayrıca akım düzenleyiciler çok daha kısa boru hattı üzerinde akış ölçerlerin sıvı veya gaz ayırt etmeksizin daha doğru, düşük belirsizlikte ve hızlı tekrarlanabilir şekilde kullanımını da olanak sağlar. Montajın etkileri, girdap ve döngülü akış, akış profilindeki bozulmalar, titreşim ve gürültü akış ölçüm hatalarına sebebiyet vermektedir. Bunların tümü, ölçüm hatalarının nedenini oluşturan farklı kombinasyonlarla birleşir. Haliyle probleme özgü çözüm yöntemleri de farklı ve özelleşmiş olmalıdır. Bu nedenle akış rejimine göre özelleşmiş uygun tipte bir akım düzenleyici kullanılmalıdır.

Endüstride pek çok standardize edilmiş akım düzenleyici bulunmaktadır. Akım düzenleyiciler girdap, hız profili ve türbülans yapısını düzeltme yeteneklerine göre 3 genel sınıfa ayrılabilir.

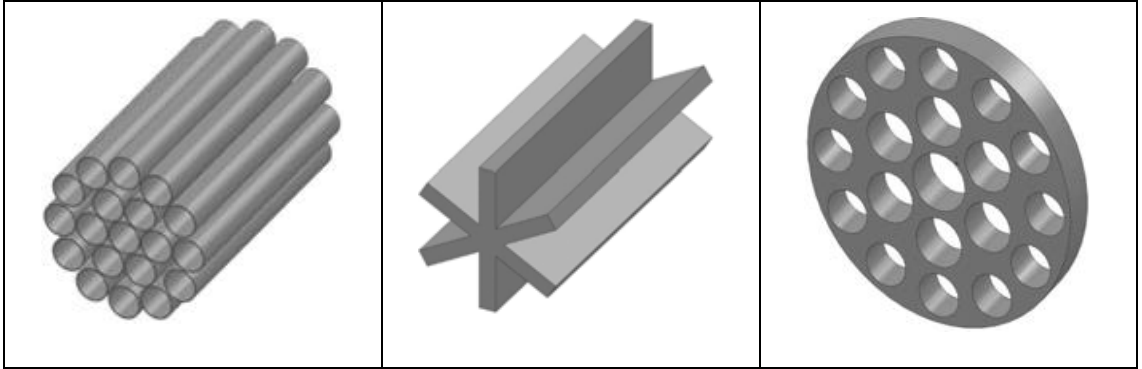
Birinci sınıf akım düzenleyiciler, akışı bir dizi paralel kanala bölerek öncelikle girdaba karşı koymak için tasarlanmıştır. Bunlara örnek olarak A.G.A., radial tube bundles (açısal tüp demetleri), A.G.A. hexagonal tube bundles (hekzagonal tüp demetleri), ISO type tube bundles (ISO tipi tüp demetleri), AMCA honeycomb (bal peteği formu) ve Etoile akım düzenleyiciler gösterilebilir.

İkinci sınıf akım düzenleyiciler, akışı tek veya bir dizi delikli plakadan geçirerek eksenel simetrik bir hız profili dağılımı oluşturmak üzere tasarlanmıştır. Sprengle ve Mitsubishi akım düzenleyiciler de bu grup içerisinde örnek verilebilir.

Üçüncü sınıf akım düzenleyiciler, akım düzenleyicilerin gözenekliliği sayesinde "sözde tam gelişmiş" bir hız profili dağılımı oluşturmak ve genel türbülans yapısını düzeltmek üzerine tasarlanmıştır. Zanker, Sens & Teule, Bosch & Hebrard, K-Lab ve Laws tasarımları bu gruba dahil olan akım düzenleyiciler arasındadır.

Her ne kadar akım düzenleyici plakaların akımı düzenleme özellikleri farklı olsa ve yukarıda görüldüğü gibi bu özelliklerine göre sınıflandırılmış olsalar da, akım düzenleyiciler mekanik tasarım benzerliklerine göre de ayrı bir sınıflandırılmaya tabi tutulabilirler. Bu mekanik tasarım sınıflandırmasına göre akım düzenleyiciler tüp demetleri (Tube Bundles), ızgaralar (Vanes/Screens) ve delikli plakalar (Perforated Plates) olarak 3 sınıfa ayrılır. Sırasıyla tüp demetlerine A.G.A., ISO tipi Tube Bundle, Sens & Teule, Bosch & Hebrard, PG&E tipi akım düzenleyiciler örnek olarak verilirken, ızgaralar için Etoile, AMCA ve Vortab, delikli plakalar için ise Sprengle, Bellinga, Zanker, Mitsubishi, Laws, Nova, Spearman ve Gallagher plakalar bu sınıflandırmada örnek olarak gösterilebilir.

Her bir sınıflandırmadan birer örnek vermek için sırasıyla; tüp demetleri (Tube Bundle), ızgara (Izgara (Vanes/Screens) yapısındaki Etoile ve Law's delikli plaka (Perforated Plate) akım düzenleyicilerine ait temsili görseller Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Tube Bundle, Etoile ve Law's akım düzenleyicileri temsili görselleri

Akım düzenleyiciler akım hatlarını düzenlerken, akışta bir miktar basınç kaybı meydana gelmektedir. Akış bozulmalarını düzeltmenin yanında akım düzenleyici performans kriterlerinden bir diğeri de akımı düzenlerken sebep olduğu basınç kaybı miktarıdır. Akım düzenleyicilerin mümkün olan en az basınç kaybına sebep

olması istenmektedir. Akım düzenleyicilerin performansına ilişkin genel bir sonuca ulaşmak için boyutsuz basınç katsayısı (k) Eşitlik 2.1 yardımı ile hesaplanabilir. Burada V, ρ , P_1 ve P_2 sırasıyla giriş hızını (m/s), su yoğunluğunu (kg/m^3), giriş ve çıkış basıncını (Pa) temsil etmektedir.

$$k = 2 \frac{P_2 - P_1}{\rho V^2} \quad (2.1)$$

Tablo 2.1, 2.2 ve 2.3’de farklı sınıflandırmalarla akım düzenleyici plakaların boyutsuz basınç kayıp katsayıları (k) gösterilmektedir [31]. Bunlar sırasıyla tüp demetleri (Tube Bundle), ızgara yapısındaki akım düzenleyiciler (Vanes/Screens) ve delikli plaka (Perforated Plates) yapısındaki akım düzenleyiciler olarak sıralanmıştır.

Tablo 2.1 Tüp demeti (Tube Bundle) yapısındaki farklı akım düzenleyici plakaların boyutsuz basınç kayıp katsayıları

Akım Düzenleyici Türü	k
A.G.A	1
ISO	2
Sens & Teule	10
Bosch & Hebrard	10
PG&E	2

Tablo 2.2 Izgara (Vanes/Screens) yapısındaki farklı akım düzenleyici plakaların boyutsuz basınç kayıp katsayıları

Akım Düzenleyici Türü	k
Etoile	1
AMCA	8
Vortab	0.8

Tablo 2.3 Delikli plaka (Perforated Plate) yapısındaki farklı akım düzenleyici plakaların boyutsuz basınç kayıp katsayıları

Akım Düzenleyici Türü	k
Sprenkle	15
Bellinga	20
Zanker	6
Mitsubhishi	2
Laws	0.8 ila 2.5
NOVA	2.6
Spearman	3
Gallagher	1.2

Literatür bölümünde çeşitli örneklerinden bahsedildiği üzere, akım düzenleyiciler genellikle bir endüstriyel sistem üzerinde uygulanmış ve akım düzenleyici performansı yapılan sayısal ve veya deneysel çalışmalarla kıyaslanmış ve endüstriyel probleme en uygun çözüm türetilmeye çalışılmıştır.

Akımın düzenlenmesini esas konu alan bu doktora tezi kapsamında farklı tipte akım düzenleyicilerin performans çalışması endüstriyel bir ürün olan, gemilerde harici yangın söndürme (HYS) sistemlerinde kullanılan su topu içerisindeki akış ele alınarak genişletilmiştir. Literatürde su topu akışı ve akım düzenleyicilerin su topu içerisindeki performans etkisini konu alan az sayıda çalışma bulunmaktadır.

Hou ve arkadaşları [32] bir su topu nozulu içindeki akışı sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, konik nozul açısını basınç ve hız dağılımları açısından optimize etmişlerdir. Benzer bir çalışma Hu ve arkadaşları [33] tarafından yapılmıştır. Bir su topunun jet akış özelliklerini ve yapısal optimizasyonunu sayısal olarak araştırmışlardır. Akış üzerindeki etkileri gözlemlemek için farklı kesit geometrileri ve giriş basıncı değerleri karşılaştırılmıştır. Tasarımı optimize ettikten sonra deneysel çalışma yapılmış ve sayısal analiz sonuçlarıyla validasyonu sağlamışlardır. Choudhury ve Rodriguez [34], sayısal yöntemlerle su topu tasarımının uygun akışı için optimizasyona odaklanan bir araştırma yaptılar. Bu optimizasyon çalışması sırasında farklı tasarımların basınç düşümü bakımından mukayesesini göstermiştir.

Yukarıda daha önce belirtildiği gibi su topu akış karakteristiği ve içerisinde akışın düzenlenmesini hakkında literatürde eksiklik bulunmaktadır. Bu motivasyon kapsamında içerisinde kompleks akış bulunan bir endüstriyel su topu tasarlanmış, içerisine farklı akım düzenleyiciler yerleştirilerek farklı giriş basınçları altında sayısal ve deneysel çalışmalar yürütülmüştür.

Doktora tezindeki sayısal ve deneysel çalışmaların yürütüldüğü akım düzenleyicilere ve su topu tasarımına değinmeden önce, su topunun kullanıldığı HYS sistemi tanımak gerekir.

HYS sistemi römorkörler, askeri gemiler, lojistik destek gemileri ve özellikle yangın söndürme gemilerinde bulunur ve gemilerin, açık deniz platformlarının,

limanların ve kıyı bölgelerin yangından korunmasını sağlamak için kullanılmaktadır. HYS sistemleri temelde mekanik olarak bir güç kaynağı (ana makina/dizel jeneratör), borular, vanalar, pompalar ve su topundan oluşur. Sistem, ana makinadan veya yangın sistemine özel dizel jeneratörden güç alır ve çeşitli vanalar ve pompalar kullanılarak su topuna yönlendirilir.

Su topunun atış mesafesi ve attığı su debisi yangın söndürmede en önemli unsurlardan biridir. Bu nedenle IACS üyesi olan denizcilik klas kuruluşları, suyun belirli bir debide, belirli bir yatay ve düşey mesafeye atılması için kurallar koymuştur. Her klas kuruluşu HYS sistemi için kendi kural setinine göre sistemi sınıflandırmış ve kurallar koymuş olsa da ufak farklılıklar dışında teknik isterler birbirine çok benzemektedir. Tablo 2.4’de kategorize edilen Bureau Veritas (BV) HYS sistemi kuralları [35], Tablo 2.5’de ise kategorize edilen Türk Loydu (TL) HYS sistemi kuralları [36] gösterilmiştir.

Tablo 2.4 Bureau Veritas HYS sistemi kuralı

Parametreler	FIFI I	FIFI II	FIFI III
Su topu adedi	2	3	4
Su topu kapasitesi (m ³ /h)	1200	2400	2400
Pompa adedi	1	2	2
Toplam pompa kapasitesi (m ³ /h)	2400	7200	9600
Su atma yüksekliği (m)	45	70	70
Su atma mesafesi (m)	120	150	150

Tablo 2.5 Türk Loydu HYS sistemi kuralı

Parametreler	FIFI I	FIFI II	FIFI III
Su topu adedi	2	3	3
Su topu kapasitesi (m ³ /h)	1200	2400	3200
Pompa adedi	1	2-4	2-4
Toplam pompa kapasitesi (m ³ /h)	2400	7200	9600
Su atma yüksekliği (m)	45	70	70
Su atma mesafesi (m)	120	150	150

Bu doktora tezi kapsamında sayısal ve deneysel çalışmaları yapılarak üzerinde akım düzenleyici performansı yapılacak su topu FIFI I notasyonunda belirtilmektedir. Görüleceği üzere FIFI 1 notasyonuna göre teknik gereklilikler ve kurallar her iki klas kuruluşunda da aynıdır. Ancak FIFI II ve FIFI III için toplam geminin debi kapasitesi ve suyu atma mesafesi aynı olsa da, su topu ve pompa adetleri arasında farklılıklar bulunmaktadır.

Ulusal ve uluslararası pek çok açık deniz bölgelerinde ve kıyı yapılarında çeşitli nedenlerle yangınlar meydana gelmektedir. Dünyanın dört bir yanında gemiler, yıllardır birçok kıyı ve açık deniz yangınlarına HYS sistemi ile müdahale etmektedir. Bunun en önemli avantajı hem sınırsız su kaynağı olarak deniz suyunun kullanılması hem de yüksek debi ve yüksek suyu atma mesafesi ile yangını söndürmede daha büyük ve emniyetli katkı sağlamasıdır. Özellikle şehir merkezinde bulunan kıyı yapılarındaki yangına müdahalelerde hem sınırlı su kapasitesine sahip olması hem de trafik ve çeşitli nedenlerle kıyı yapısına erişimin kolay sağlanamaması nedeniyle itfaiye araçları tercih edilmemektedir ve bunun yerine yangın söndürme gemileri kullanılmaktadır.

Şekil 2.2, [37] 2010 yılında Meksika Körfezi'nde BP petrol platformunda meydana gelen yangına müdahale eden yangın söndürme gemilerini göstermektedir. Bu yangın, aynı zamanda “Deepwater Horizon petrol sızıntısı” olarak da adlandırılıyor ve tarihin en büyük çevre felaketlerinden ve açık deniz yangınlarından biri olarak kabul ediliyor. Şekil 2.3' de [38] 2010 yılında bir kıyı yapısı olan İstanbul Haydarpaşa Garı'nda çıkan yangına, römorkör gemilerinin HYS sistemleri ile müdahale ettiği görülmektedir. Gemiler yüksek su debisi ve yüksek atma mesafesi kabiliyetleri sayesinde emniyetli bir şekilde yangını 3 saat gibi kısa bir sürede kontrol altına alabilmişlerdir. Şekil 2.3' de 2013 yılında yine bir kıyı yapısı olan İstanbul Galatasaray Üniversitesi'nin Ortaköy Beşiktaş'taki 142 yıllık tarihi kampüsünde çıkan yangına, Kıyı Emniyeti'ne ait 5 yangın söndürme gemisinin HYS sistemleri ile müdahale ettiği görülmektedir. Bu yangına hem karadan hem de gemilerle denizden hibrit bir şekilde müdahale edilmiştir. Buna rağmen yangın 5 saat gibi bir sürede söndürülebilmektedir.



Şekil 2.2 Yangın söndürme gemisinin açık deniz yangınına müdahalesi



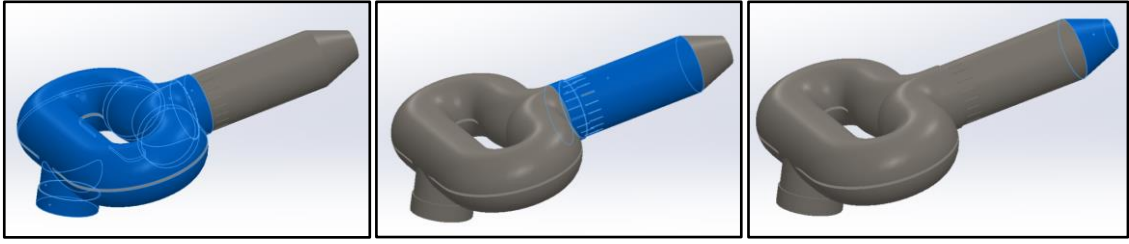
Şekil 2.3 Römorkör gemisinin Haydarpaşa Garı yangınına müdahalesi



Şekil 2.4 Römorkör gemisinin Galatasaray Üniversitesi yangınına müdahalesi

HYS sistemlerinde atış mesafesine ek olarak suyun akış kalitesi de önemlidir. Su topunun dışındaki suyun pulvarize olması istenmemektedir, bu nedenle su su topu içinde homojenleştirilmelidir. HYS sistem tasarımında çeşitli geometrik bileşenler (redüser, difüzör, dirsek, T bağlantısı, fitting) kullanılmaktadır ve bu bileşenler akışta basınç kaybına ve türbülansa neden olmaktadır. Türbülans girdaba, akım ayrılmasına ve döngülü akışa neden olur. Akıştaki bu dengesizlikle daha büyük pompa kapasitesi ve enerji tüketimine neden olur. Bu sebeplerden dolayı su topu içindeki akış düzenlenmelidir.

Denizcilik endüstrisinde kullanılan tüm makinelerin tasarımları stabilizasyon, kolay kullanım ve daha düşük güç talebi sağlamak için boyut ve ağırlık açısından titizlikle optimize edilmelidir. Bu çalışmada akım düzenleyici eklenen su topundaki akış BV kurallarına uygun olarak hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Bu nedenle bu doktora tezi kapsamında sayısal ve deneysel olarak incelenecek akım düzenleyici plakaların tasarımına geçmeden önce, akım düzenleyici performanslarının üzerinde inceleneceği endüstriyel ürün olan su topu geometrisi tanımlanmalıdır. Su topu temelde üç ana parçadan oluşur: gövde, boru hattı, nozul ve su topu içerisinde su sırasıyla bu parçalardan geçer. Şekil 2.5, su topu akış hacmi ana bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 2.5 Su topu parçaları; gövde, boru hattı, nozul

Gövde, su topunun suyla temas eden ilk kısmıdır. Esas olarak tek borulu gövde ve ayrılmış gövde olmak üzere iki gövde tasarım seçeneği vardır. Ayrılmış gövde, gövdenin sonunda tekrar birleşen iki boru hattına bölünür. Ayrılmış gövde, tek borulu gövde ile karşılaştırıldığında daha ucuz üretim, daha kolay bakım ve işlevsel çalışma sağlar. Tek borulu gövde daha az basınç düşüşüne neden olurken, ayrılmış gövde daha fazla sürtünme yüzey alanı nedeniyle daha fazla basınç kaybına ve akışın ayrılmasından kaynaklanan girdap, döngüsel akış ve dalgalanma gibi karmaşık akış etkilerine neden olur. Bu çalışmada yüksek dayanımlı mukavemet özellikleri ve kolay üretimi nedeniyle ayrılmış gövde geometrisi kullanılmıştır.

Boru hattı, nozul ve gövde arasında bulunur. Su topunda laminarizasyon için düz bir boruya ihtiyaç duyulur ve istenilen su atma mesafesinin sağlanması için suyu düzenli bir akış olarak nozula iletir. Ancak özellikle ayrılmış gövde tasarımlı su topunda boru hattı tek başına laminarizasyon için yeterli değildir. Daha uzun boru hattının daha iyi laminarizasyon ve bunun da daha iyi suyu atma mesafesi sağladığı bilinse de su topu üzerinde kullanılabilecek boru uzunluğu endüstriyel bir ürün olması sebebiyle limitlidir. Bu nedenle, su topundaki karmaşık akışın üstesinden gelmek için boru hattına bir türbülans azaltıcı yerleştirilmiştir. Bu doktora tezinde, farklı tipte ve uzunlukta akım düzenleyiciler tasarlanmış ve çeşitli sayısal ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Boru hattı uzunluğu yaklaşık boru çapının 3 katı olarak belirlenmiş olmasına rağmen laminarizasyonu sağlamak için yeterli olmamıştır. Bu nedenle, karmaşık akışı düzenlemek için akım düzenleyiciler tasarlanmış ve boru hattına yerleştirilmiştir.

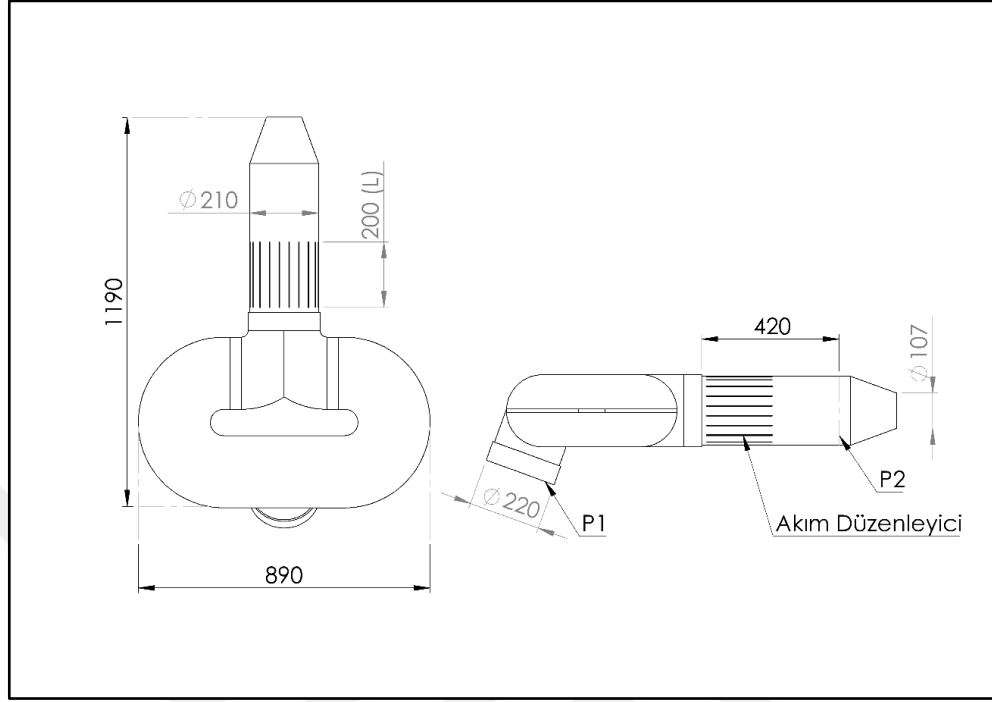
Nozul, suyun su topundan çıkmadan önceki son bölümüdür. Pelton, ters pelton, konveks, konkav ve farklı açılara sahip konik nozul gibi pek çok nozul tasarımı

bulunmaktadır. Bilir ve arkadaşları [40] aynı çıkış çapına sahip beş farklı tipte su topu nozulu tasarlamış ve sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Hız ve basınca ek olarak reaksiyon kuvveti değerlerini karşılaştırarak çalışmanın sonunda aynı sınır koşulları için minimum reaksiyon kuvvetine sahip ve en yüksek debide akışı sağlayan konik nozulu önerdiler.

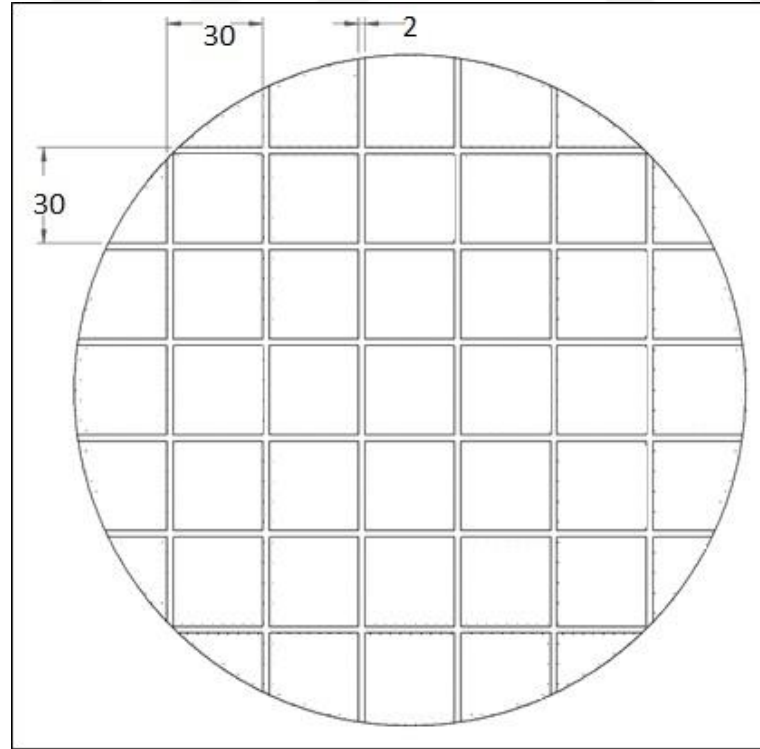
Akım düzenleyici tasarımları çok amaçlıdır ve farklı uygulama gereksinimlerine uygun olarak plaka uzunluğunda, delik sayısında, basınç kaybında ve hız profilinde değişikliklere izin verir. ISO tarafından tavsiye edilen akım düzenleyicilere rağmen, güçlü eğrilik ve rotasyona sahip daha karmaşık geometrilerdeki akım düzenleme işlemi, daha spesifik ve özelleştirilmiş bir akım düzenleyici tasarımına ihtiyaç duyar. Bu nedenle su topu için farklı uzunluklarda özgün bir akış düzenleyici tasarımı tasarlanmıştır.

Şekil 2.6'da akım düzenleyicilerin performansının gözlemleneceği bir endüstriyel ekipman olan su topu tasarımı gösterilmiştir. Bu bölümde sunulacak olan akım düzenleyici tasarımları bu ekipman içine yerleştirilerek çeşitli sayısal incelemeler ve mukayeseler yapılmıştır. Şekil 2.7'de ise kare kesitlere sahip özgün akım düzenleyici tasarımı gösterilmiştir. Şekil 2.6'da ve Şekil 2.7'de görüleceği üzere 210 mm çapındaki su topu boru hattına eklenen özgün akım düzenleyici, 2 mm et kalınlığına sahip plakalarla bölünmüştür ve her bir kare kaset 28x28 mm ölçülere sahiptir. L ile gösterilen ifade akım düzenleyicinin boyunu temsil etmektedir. Akım hattındaki dalgalanmayı (fluctuation) azaltmak için öncelikli olarak çok kısa bir yapı yerine mevcut tasarım boru çapına yakın bir değer olan 200 mm uzunluğunda yapılmıştır. Su topu akış giriş çapı 220mm iken, su topunun çıkış çapı 107mm'dir. Su topu gövdesinden, nozul diye belirtilen su topu uç kısmına olan mesafe 1190mm iken, su topu dış gövde mesafesi 890mm'dir. Şekil 2.7'de ise kare kesitlere sahip özgün akım düzenleyici tasarımı gösterilmiştir. Su topu ürününün uzaktan kontrol ve manuel olarak sağa sola ve yukarı aşağı dönme kabiliyetlerine sahiptir. Ayrıca su topu kimi zaman jet akış sağlarken, kimi zaman da sis (fog) atışını sağlamak durumundadır. Bu nedenle ekipman üzerinde pek çok elektronik ve mekanik yapılar bulunmaktadır. Bu doktora tezi kapsamında akım

düzenleyicilerin akış üzerindeki etkisi araştırıldığından Şekil 2.6'da gösterilen tasarım su topunun yalnızca akış hacmini göstermektedir.



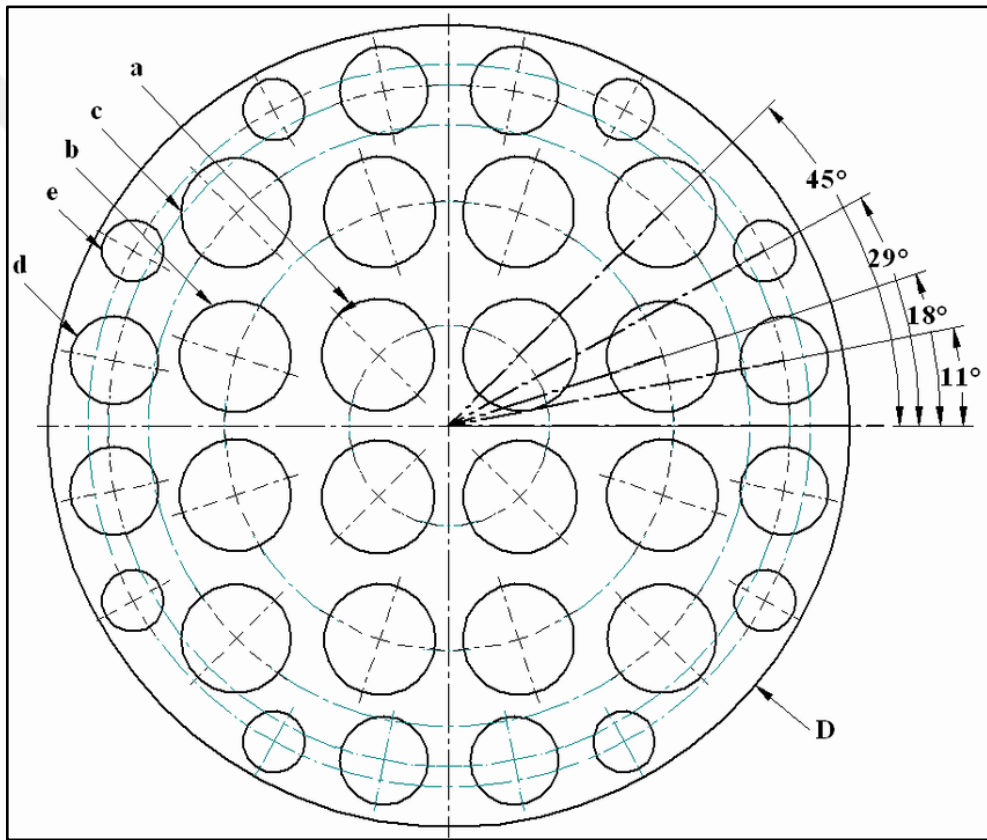
Şekil 2.6 Akım düzenleyici performansının gözlemlendiği endüstriyel ekipman tasarımı



Şekil 2.7 Özgün akım düzenleyici tasarımı

Benzer çalışma ISO standardında yer alan Zanker ve Tube Bundle akım düzenleyici plakaları için de yapılmıştır ve tasarımlar standartın içeriğinde tariflendiği şekilde yapılmıştır. Şekil 2.8’de ISO standartında yer alan Zanker tasarımı, Tablo 2.6’da ise Zanker tasarımına ait ampirik geometrik formüller gösterilmiştir. Zanker tasarımında farklı çaplarda delikler bulunmakta ve akış yönündeki eksen merkezinde yoğunlukta daha büyük çapta, cidar çevrelerinde daha düşük çapta dairesel kesitlerden oluşmaktadır.

Benzer şekilde Şekil 2.9’da ise ISO standartında yer alan Tube Bundle tasarımı ve bu tasarımına ait ampirik geometrik formüller gösterilmiştir.



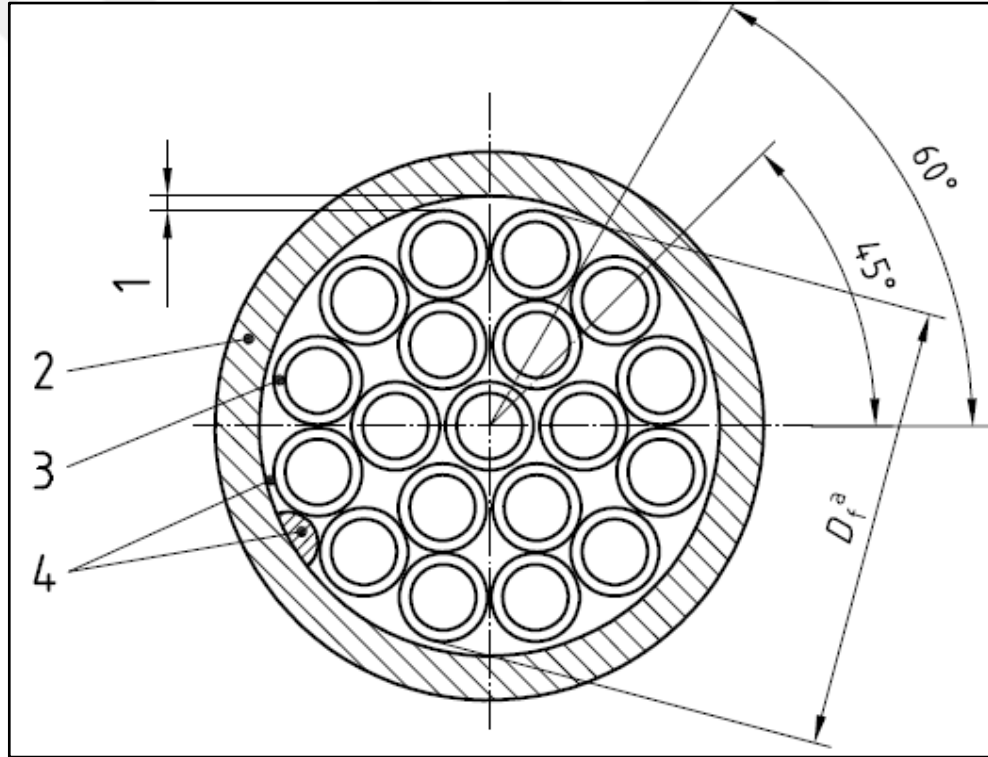
Şekil 2.8 Zanker (ISO tipi) akım düzenleyici tasarımı

Zanker akım düzenleyiciler adını plakanın tasarımcısı olan Klaus J. Zanker’dan alır. Literatürde daha çok gaz akışlarında yaygın olarak kullanıldığı görülse de, sıvı akışlarında da uygulamalarına rastlanmıştır. Zanker akım düzenleyici plakası Şekil 2.8’de gösterilmiştir ve simetrik dairesel bir modelde düzenlenmiş 32 delikten oluşur. Deliklerin boyutları, boru iç çapının (D) bir fonksiyonudur ve

aşağıdaki gibi olmalıdır. Akım düzenleyicinin boyu ise (L) ile tariflenmiştir. Çapı 100mm'den küçük akım düzenleyiciler için her bir delik toleransı $\pm 0,1\text{mm}$ 'dir.

Tablo 2.6 Zanker tipi akım düzenleyici ampirik geometrik özellikleri

Delik adı	Delik sayısı	Delik merkezi açısı	Delik çapı	Delik merkezi ölçüsü
a	4	45°	0.141D	0.25D
b	8	18°	0.139D	0.56D
c	4	45°	0.1365D	0.75D
d	8	11°	0.11D	0.85D
e	8	29°	0.077D	0.9D
Standart plaka uzunluğu	$0.12D \leq L \leq 0.15D$			

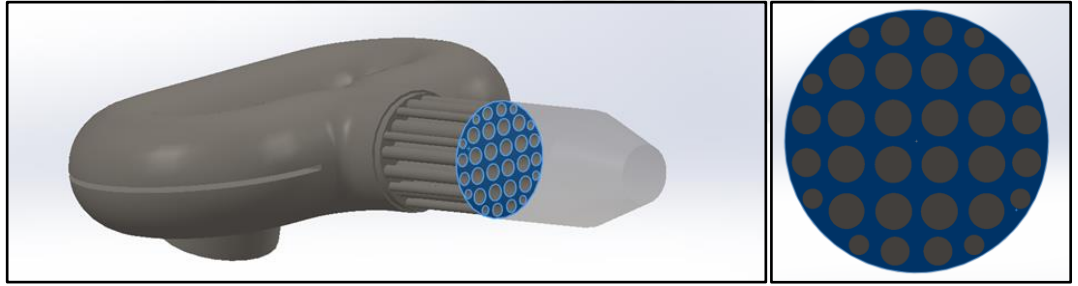


Şekil 2.9 Tube Bundle (ISO tipi) akım düzenleyici tasarımı

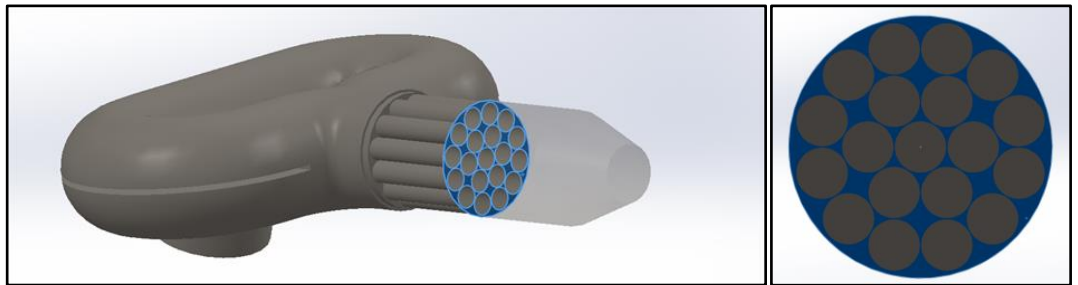
Tube Bundle akım düzenleyici plakası Şekil 2.9'da gösterilmiştir ve birbiri ile aynı çapta ve paralel uzunlukta 19 boru demetinden oluşur. Her bir borunun duvar kalınlığının $0.025D$ 'ye eşit veya bu değerden daha küçük olması istenmektedir. Akım düzenleyici boyutları, boru iç çapının (D) bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi olmalıdır. Akım düzenleyicinin boyu ise (L) ile tariflenirken, akım düzenleyici

dış çapı D_f^a ile gösterilmiştir ve $0.95D \leq D_f^a \leq D$ olmalıdır. Şekil 2.8’de bulunan 1 numara akım düzenleyici ile boru arasındaki boşluğu, 2 numara boru cidarını, 3 numara akım düzenleyici boru demetinin et kalınlığını, 4 numara ise merkezleme için ara parça opsiyonunu göstermektedir.

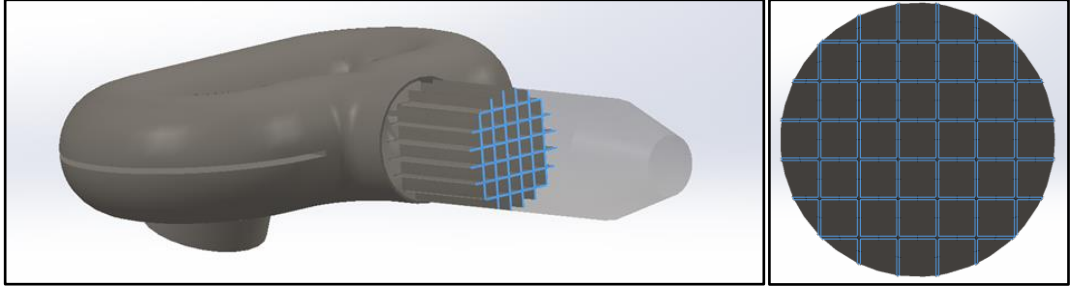
Bu doktora tezi kapsamındaki akım düzenleyici tasarımı için ISO standartlarında yer alan Zanker standart plaka uzunluğu denklemine göre (Plaka Uzunluğu = $0.15 \times$ Plaka çapı), tüm akım düzenleyicilerin çapı su topu boru iç çapıyla uyumlu olacak şekilde 210mm, plaka kalınlıkları da 31.5 mm olarak tasarlanmıştır. Su topu akışındaki akım düzenleyici plakaların uzunluk etkisini görmek ve mukayese edebilmek için Zanker ve Tube Bundle da özgün tasarıma uygun olarak 200mm kalınlıkta yeniden tasarlanmıştır. Akım düzenleyici tasarımları karşılaştırıldıktan sonra, özgün tasarım için uzunluk çalışması 50 mm ve 100 mm ile genişletilmiştir. Zanker, Tube Bundle ve özgün akım düzenleyici tasarımları ve su topu üzerinde gösterimi sırasıyla; Şekil 2.10, 2.11 ve 2.12’de gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Zanker (ISO tipi) akım düzenleyici tasarımı ve su topu üzerinde gösterimi



Şekil 2.11 Tube Bundle (ISO tipi) akım düzenleyici tasarımı ve su topu üzerinde gösterimi



Şekil 2.12 Özgün akım düzenleyici tasarımı ve su topu üzerinde gösterimi

AKIM DÜZENLEYİCİLERİN DENEYSEL YÖNTEMLE İNCELENMESİ

Deneysel çalışmalar özellikle doğruluk ve hassasiyetin önemli olduğu proseslerde yoğun olarak yürütülmektedir. Her ne kadar yüksek maliyet, uzun çalışma zamanı gerektirmesi ve kalibrasyon ve ölçüm hataları gibi riskleri bulunsada, deneysel çalışmalar günümüzde hala en güvenilir yöntemlerin başında gelmektedir.

Bu bölümde akım düzenleyicinin akışa olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için öncelikle akım düzenleyici bulundurmayan bir su topu gerçek ölçekte prototip olarak imal edilmiş ve test edilmiştir. Akım düzenleyici bulundurmayan su topu suyu yatay mesafede istenen atış mesafesine ulaştıramadan su pulvarize olduğu için su topu içerisinde akımın düzenlenmesi ihtiyacı yapılan bu ön deneyde açıkça görülmüştür.

Bu sorunun üstesinden gelmek için, tasarım bölümünde detaylı bir şekilde ölçüleri verilen 210mm çapında ve 200mm uzunluklu özgün akım düzenleyici bire bir gerçek ölçekte prototip olarak üretilmiş ve su topu içine yerleştirilerek akım düzenleyicinin su topu içerisindeki etkilerini araştırmak için deneysel çalışmalara devam edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda akım düzenleyici bulunduran su topunun suyu pulvarize olmadan yüksek yoğunlukta yangın mahaline gönderdiği görülmüştür. Akım düzenleyicinin suyun fırlatılması konusundaki olumlu etkileri gözlendikten sonra, test çalışmalarına detaylı olarak farklı giriş basıncı koşullarında devam edilmiştir. Deneylerdeki olası ölçüm hatalarının önüne geçmek için her bir giriş koşulunda testler tekrarlanarak ilenlenmiştir.

Bu doktora tezi kapsamında yapılan tüm deneysel çalışmalar Devlet Liman Hizmetleri alanında, üçüncü gözlemciler olan denizcilik klas kuruluşlarından Bureau Veritas (BV) ve Türk Loydu (TL) sörveyörleri gözetiminde İstanbul Tuzla'da gerçekleştirilmiştir.

3.1 Deneyde Kullanılan Ekipmanlar

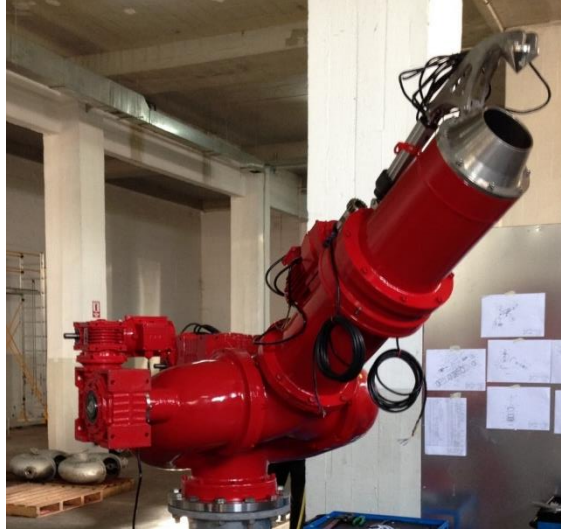
Akım düzenleyicinin performans deneylerinde çok sayıda elektrik ve mekanik ekipman kullanılmıştır. Basınç ve debi değerlerini ölçmek için farklı tiplerde dijital ve ultrasonik debimetreler ve manometreler kullanılmıştır. Akım düzenleyici performans deneyleri sırasında kullanılan debimetre, manometre, tekerlekli metre ölçer gibi tüm ölçü aletleri deney öncesinde kalibre edilmiştir.

Bu doktora tez çalışması süresince yapılan deneysel çalışmalarda kullanılmış olan bazı ürünlere ait görseller aşağıda paylaşılmıştır. Prototip imalatı yapılan özgün akım düzenleyici Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Akım düzenleyici flanşlarından doğrudan su topu gövdesine bağlantı yapılabilir.



Şekil 3.1 Prototip özgün akım düzenleyici

Şekil 3.2’de akım düzenleyici performansının üzerinde gözlemleneceği prototip ekipman olan su topu gösterilmiştir. Şekil 3.1’de gösterilen akım düzenleyici, bu endüstriyel ekipmanın içerisine yerleştirilmiştir. Ürüne ait boyutsal bilgiler Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Ürünün fabrikada sızdırmazlık ve fonksiyon testleri yapıldıktan sonra, akım düzenleyici etkisinin araştırılması için sahada testleri yapılmıştır.



Şekil 3.2 Akım düzenleyici performansının gözlemlendiği prototip ekipman

Pompalar akışın iletilmesini sağlayan, akış devrelerinin en önemli ekipmanlarından biridir. Pompa kapasitesinin ve buna uygun motor gücünün belirlenmesi önemli bir husustur. Bu deneyler FİFİ I notasyonu içerisindeki teknik gereklilikler göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu nedenle pompa akım düzenleyicili su topunu test edebilecek kapasitede seçilirken, motor ise bu pompa kapasitesini çalıştırabilecek güçte seçilmiştir. Şekil 3.3’de deney sırasında kullanılan pompa ve dizel motor akuple halde gösterilmiştir.



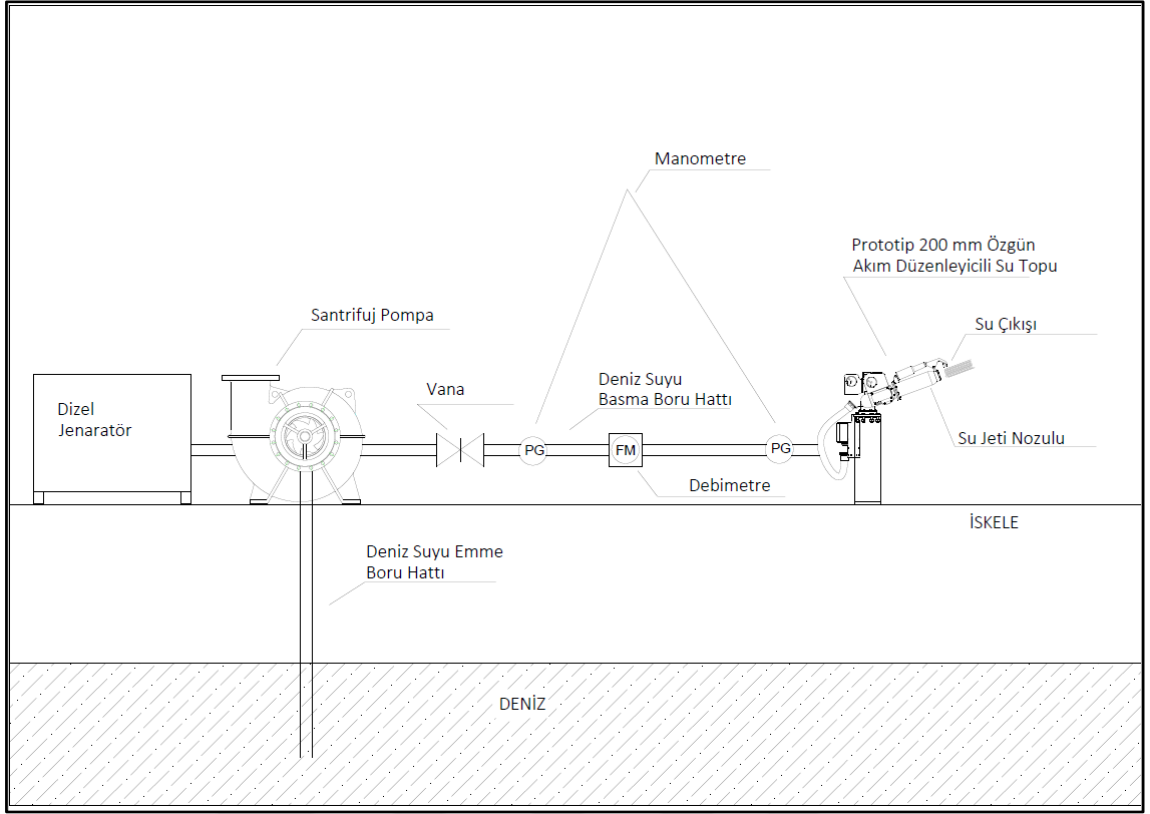
Şekil 3.3 Dizel motor ve santrifüj pompa

Manometreler farklı aralıklarda basıncı ölçümleyebilme kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle manometreler ihtiyaç olan basınç aralığında tercih edilmelidir. Bu sayede daha hassas bir ölçüm yapılması sağlanır. Bu doğrultuda deneyler esnasında 0-16bar aralığında ölçüm yapabilen manometreler tercih edilmiştir. Testlerde kullanılan tüm ölçü aletleri kalibre edilmiş olmasına rağmen, deney esnasında aynı hatta ancak farklı noktalara yerleştirilen manometreler sayesinde ölçüm cihazlarının da çapraz kontrolü sağlanmıştır. Çeşitli çevresel faktörlerden manometrelerin olumsuz etkilenmesi ve veya arızalanması gibi hususlar hassas olarak izlenmiş ve böylece test sonuçlarının güvenilirliği sağlanmıştır.

DeneySEL ölçüm sonuçları, daha önce Tablo 2.4 ve Tablo2.5’de gösterilen HYS sistemi denizcilik sınıflandırma kuralına [35, 36] uygun olarak su topu debisi ve suyun yatay ve dikey fırlatma mesafesi açısından elde edilmiştir. Deneylerde suyun hemen su topu girişinde ölçülen farklı giriş basınç değerlerine karşılık gelen hacimsel debi değerleri ve suyu fırlatma mesafeleri denizcilik klas kuruluşlarının sörveyörleri gözetimi eşliğinde kayıt altına alınmıştır.

3.2 Deney Düzeneği ve DeneySEL Sonuçlar

Deney düzeneği Şekil 3.4’de şematik olarak gösterilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan ana kalemler sırasıyla; 1 adet 825 kW dizel jeneratör, 1 adet 10 bar basınç çıkışında 1200 m^3/h kapasiteli santrifüj pompa, debi ve basınç ölçümleri için kalibrasyonları yapılmış olan dijital debimetre, manometre, vana, boru hattı ve tam ölçekli bir su topunun prototipidir. Santrifüj pompa deniz suyunu dizel jeneratör sayesinde emerek boru hattına iletir. Konu boru hattından sonra deniz suyu su topuna gelerek atmosfere fırlatılır ve bu sayede su yangın alanına ulaşır. Vana vasıtasıyla akış debisi ve basıncı ayarlanarak, istenilen giriş basıncı değeri sağlandığından emin olunduktan sonra her bir giriş basıncı için deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlar not edilmiştir. Şekil 3.5’de gerçek test düzeneği görseli paylaşılmıştır.



Şekil 3.4 Deney düzeneğine ait şema



Şekil 3.5 Deney düzeneğine ait resim

Deney düzeneği, gemilerdeki HYS sistemi uygulamasına oldukça benzer şekilde kurgulanmıştır. Deneyler sırasında alınan görseller Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Bu görsellerden de anlaşılacağı üzere özgün akım düzenleyici

bulunan su topuyla yapılan deney çalışmalarında suyun pulvarize olmadan yoğun bir şekilde yangın mahaline gitmek üzere fırlatıldığı görülmektedir.



şekil 3.6 Deney sırasında debi ölçümü ile ilgili alınan görsel



şekil 3.7 Deney sırasında suyun atma mesafesi ile ilgili alınan görsel

Su topunun prototipi deneyler sırasında hem dikey hem de yatay yönlerde sabitlenmiştir. Su topunun suyu zemine paralel yönde en fazla mesafeye

atabilmesi için deneyler su topu zeminle farklı açılarda yerleştirilerek deneyler genişletilmiştir. Bunlar 0° ila 75° arasındaki farklı açılardır. Deney sonuçları su topu atış borusunun zeminle 35°'lik bir açıda durmasının en iyi atma mesafesini sağladığını göstermiştir. Bu nedenle bundan sonra tüm deneyler 35°'lik açıda yapılmış ve sonuçlar buna göre elde edilmiştir. Deneylerden gözlemlenen bu bilgiler doğrultusunda diğer deneysel çalışmalar da aynı koşullarda yürütülmüştür. Deneyler 6bar, 7bar, 8bar, 9bar ve 10bar olarak farklı basınç değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Daha önce de ifade edildiği gibi deneylerde suyun farklı giriş basınçlarında su topunun geçirdiği debi ve suyu fırlatma değerleri denizcilik klas kuruluşlarının yetkili sözveyörleri gözetiminde kaydedilmiştir.

200mm uzunluklu özgün akım düzenleyici plaka bulunduran su topu ile yapılan deney çalışmasına ait sonuçlar Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Özgün akım düzenleyicili su topuna ait deney sonuçları

Giriş basıncı [bar]	Debi [m ³ /h]	Atma mesafesi [m]
6	930	90
7	990	100
8	1075	110
9	1130	115
10	1200	130

Deney çalışmalarında giriş basıncı arttıkça su topu debisinin ve su atma mesafesinin arttığı açık bir şekilde görülmüştür. Akım düzenleyici bulunmayan su topunda su pulvarize olup istenen atış mesafesini sağlayamazken, akım düzenleyici konulduktan sonra su topu HYS sistemi klas kuralında belirtilen “su topu 1200m³/h debide suyu en az 120 metreye ulaştırmalıdır” kuralını sağlamıştır. Akım düzenleyici sayesinde ürün istenen teknik gereklilikleri sağlayan akım düzenleyicili su topu, denizcilik klas kuruluşları Bureau Veritas (BV) ve Türk Loydu (TL) tarafından marine tip onay sertifikası almaya uygun görülmüştür.

AKIM DÜZENLEYİCİLERİN SAYISAL YÖNTEMLERİN İNCELENMESİ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri özellikle son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte her çeşit problemin çözümü için kullanılabilir hale gelmiştir. Bu bölümde farklı akım düzenleyici plakaların performansı sonlu hacimler yöntemine dayanan ticari bir yazılım yardımıyla sayısal olarak hesaplanacaktır. Sayısal yöntemlerden elde edilen sonuçların belirsizliği uygun bir yöntemle belirlenerek sayısal çalışmadaki toplam belirsizlik miktarı hesaplanacaktır. Daha sonra deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile doğrulanan sayısal analizler genişletilerek farklı geometri ve parametrelerin problemin çözümüne olan etkileri detaylı olarak irdelenecektir.

Bu amaçla öncelikle 200mm uzunluklu akım düzenleyiciye sahip su topu kullanılarak HAD yöntemiyle analizler gerçekleştirilecektir. Seçilen akım düzenleyici için farklı giriş basınçları ve debi değerleri elde edilecek ve deneysel veriler ile karşılaştırılacaktır.

Akım düzenleyicilerin performansını HAD ile incelemek adına 3 farklı akım düzenleyici modeli kullanılmıştır. Bunlar özgün akım düzenleyiciye ek olarak ISO standartında yer alan Zanker ve Tube Bundle geometrileridir. Bu geometrilerin tamamı öncelikle 200mm uzunluğunda tasarlanarak akış analizleri yapılmıştır. Sonrasında ise ISO standartının önerdiği ampirik uzunluk ifadesi göz önünde bulundurularak her bir akım düzenleyici 31.5mm olarak tasarlanmış ve sayısal analizler bu uzunluktaki akım düzenleyiciler kullanılarak yinelenmiştir. Buna ilaveten akım düzenleyicinin etkisini görebilmek adına bir de akım düzenleyicisiz bir su topu tasarlanmış ve bunun için de aynı giriş koşullarında sayısal analizler tekrarlanmış ve tüm analiz sonuçları birbiriyle mukayese edilmiştir.

Çalışmanın sonraki bölümünde ise akım düzenleyici plaka uzunluğunun performansa olan etkisini gözlemlemek için özgün akım düzenleyici plakalar 50mm ve 100mm uzunluğunda tasarlanmış ve sayısal analizler

gerçekleştirilmiştir. Bu da su topu içerisinde özgün akım düzenleyicilerin plakasız, 31.5mm uzunluklu, 50mm uzunluklu, 100mm uzunluklu ve 200mm uzunluklu olacak şekilde plaka uzunluğunun akışa olan etkilerini incelenmesine ve mukayese edilmesine olanak sağlamıştır. Akım düzenleyicilere dair kesit özellikleri Bölüm 2’de detaylı olarak anlatılmıştır. Tüm hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri STAR- CCM+ ticari paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.1 Matematiksel Model

Sürekli akışın sağlandığı devre hesabı problemini belirten bazı yönetici denklemler bulunmaktadır. Konu denklemler tüm akışkan problemlerinin çözümleri için temel olarak kullanılmaktadır. Bu doktora tezinde kullanılan HAD çözüm aracı da bu denklemleri esas alarak akışkan problemlerini çözmektedir. Bu başlık altında bahsi geçen temel denklemler açıklanacak, bu doktora tezi çalışmasında kullanılmış olan sayısal yöntemlere konu denklemler belirtilecektir.

4.1.1 Akışkanlar Mekaniği Denklemleri

Akışkanlar mekaniği problemlerindeki esas yönetici denklemler integral veya diferansiyel şekilde ifade edilebilir. Bu denklemlerin düzgün geometriler için analitik çözümleri zaman zaman mümkün olmasına rağmen, karmaşık geometrilerde bu yönetici denklemlerin analitik çözümünü elde etmek bir hayli zordur. Bu sebeple ilgili problemi çözebilmek adına kullanılan teori ve yöntemlere göre bazı sadeleştirmeler ve/veya uygun kabuller yapılmak suretiyle bu denklemler iteratif olarak çözülebilmektedir. Bu bölümde bu yönetici ve esas denklemler yapılan sadeleştirmeler ve kabullerle birlikte açıklanacaktır.

Bu doktora tezinde ele alınan akış problemi özelliği gereği, probleme konu akışın sıkıştırılamaz olduğu kabulüyle çalışmalar yapılmıştır. Korunum denklemleri enerji, kütle ve momentum korunumu olarak temelde 3 denklemi ifade etmektedir. Ancak bu tez çalışmasındaki problem gereği enerjinin korunumu denklemi dikkate alınmayacaktır.

En genel haliyle korunum denklemleri Eşitlik 4.1 de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi \vec{V}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte ϕ simgesi akışkana ait her hangi bir özelliği ifade ederken, S_ϕ simgesi kaynak terimini temsil etmektedir. ϕ simgesinin yerine sıcaklığa ait ilgili terim yazılırsa enerjiye ait korunum denklemi elde edilir. [41].

Eşitlik 4.1 de ϕ yerine 1 yazıldığında temel korunum denklemlerinden kütle korunum denklemi elde edilir.

Sürekli ve sıkıştırılamaz akış için kütle korunumu denklemi Eşitlik 4.2 deki gibi ifade edilir.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.2)$$

Temel korunum denklemlerinden bir diğeri olan momentumun korunumu denklemleri Eşitlik 4.1 de ϕ yerine hız terimi yazılması durumunda elde edilir. Hızın vektörel ve 3 boyutlu bir büyüklük olduğu düşünüldüğünde momentum korunum denklemlerinin 3 hız bileşeni için ayrı ayrı türetilebileceği rahatlıkla anlaşılabılır. Eşitlik 4.3a, Eşitlik 4.3b ve Eşitlik 4.3c de 3 ayrı hız bileşeni için 3 ayrı eksen de momentumun korunumu denklemleri en genel haliyle diferansiyel formda ve kartezyan koordinat sistemi için gösterilmiştir. Bu 3 denklem Navier Stokes denklemleri olarak da bilinmektedir.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \quad (4.3a)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \quad (4.3b)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \quad (4.3c)$$

4.2 Sonlu Hacimler Yöntemi

Bu doktora çalışmasındaki sayısal analizlerin tamamı yönetici denklemleri sonlu hacimler yöntemini (SHY) kullanarak ayrıklaştıran ticari bir paket program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi karmaşık

geometriler için ilgili yönetici denklemlerin analitik çözümü bulunmamaktadır. Bu sebeple ilgili denklemler belirli bir hesaplama hacminin sonlu sayıda elemana bölünmesiyle iteratif şekilde çözülebilir. Akış terimleri her bir küçük sonlu hacim üzerinde hesaplanır ve diverjansları alınır. Kütlenin korunumu ise her bir sonlu hacimdeki giren ve çıkan akının miktarının eşitlenmesiyle sağlanmış olur. [42]

Ancak bu metodoloji çerçevesinde ilgili denklemlerin çözülebilmesi için RANS denklemleri de denilen Reynolds ortalama özel bir form kullanılır. Dolayısıyla sayısal çözücülerde yönetici denklemlerden momentumun korunumu denklemi artık RANS denklemine dönüşmüş olur.

4.2.1 RANS Denklemleri

Reynolds ortalaması alınmış momentum korunum denklemleri tensör ve diferansiyel formda aşağıdaki gibi ifade edilebilir. [44]:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.4 de son terim olan ∂t_{ji} , viskoz gerilme tensörü olarak ifade edilir. İlgili tensör Eşitlik 4.8 kullanılarak hesaplanabilir.

$$t_{ji} = 2\mu s_{ij} \quad (4.5)$$

μ moleküler viskoziteyi temsil ederken, s_{ij} ise gerilme oranı tensörünü temsil etmektedir. [43]

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.6)$$

Daha önce de belirtildiği üzere bu doktora tez çalışmasındaki tüm sayısal analizler akışın türbülanslı olduğu kabulü ile gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla Eşitlik 4.4 de verilen RANS denklemleri içerisindeki hız terimi ortalama hız bileşenine ilaveten bir çalkantı hız bileşeni eklenerek ifade edilmelidir. [44] Bir başka deyişle hız bileşeni Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8 kullanılarak ifade edilebilir.

$$u_i(x,t) = U_i + u_i'(x,t) \quad (4.7)$$

$$U_i(x,t) = \frac{1}{T} \int_t^T u_i(x,t) dt \quad (4.8)$$

Burada U_i zaman ortalamalı hız bileşenini temsil ederken, u_i' çalkantı bileşenini tensör formda temsil etmektedir. Hız terimlerinde belirtilen değişikliğin Eşitlik 4.4 de yerine yazılmasıyla momentum korunum denklemi (RANS) genel halde kapalı formda Eşitlik 4.9 da belirtildiği şekilde ifade edilebilir.

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2\mu S_{ji} - \overline{\rho u_j' u_i'} \right) \quad (4.9)$$

Burada $\overline{u_i' u_j'}$ terimi zaman içindeki ortalama değeri, $-\overline{\rho u_j' u_i'}$ terimi Reynolds-gerilme tensörü olarak ifade edilebilir.

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_j' u_i'} \quad (4.10)$$

4.2.2 Reynolds-Gerilme Denklemi

Önceki kısımda da belirtildiği üzere RANS denklemlerindeki son terim Reynolds gerilme tensörü olarak ifade edilir ve bu terim çalkantı hızlarının zamana bağlı olan ortalamasını belirtmektedir [45]. Açıklanan çalkantı terimlerinin ortalamaları alınarak gerekli düzenlemeler yapılırsa Reynolds gerilme denklemleri Eşitlik 4.11 deki gibi gösterilebilir. [44]

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{ik} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \epsilon_{ij} - \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + C_{ijk} \right] \quad (4.11)$$

Burada;

$$\Pi_{ij} = \overline{\frac{p'}{\rho} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)} \quad (4.12)$$

$$\epsilon_{ij} = 2\nu \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} \quad (4.13)$$

$$C_{ijk} = \overline{\rho u_i' u_j' u_k'} + \overline{p' u_i'} \delta_{jk} + \overline{p' u_j'} \delta_{ik} \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.11 türbülans kapama denklemlerinin temeli olarak gösterilebilir. [46]. ϵ_{ij} yayılma tensörü, C_{ijk} türbülans taşınım tensörünü gösterirken, Π_{ij} simgesi basınç-gerinimi korelasyon tensörünü belirtmektedir [47].

4.2.3 Türbülans Kinetik Enerjisi Transport Denklemi

Eşitlik 4.11 de $i=j$ kabulü ile [46] elde edilebilen ve ilk kez Tennekes ve Lumley [48] tarafından önerilen türbülans kinetik enerjisi (TKE) denklemi Eşitlik 4.15 de gösterilmektedir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i' u_j'} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u_j'} \right) \quad (4.15)$$

Eşitlik 4.15 de denklemin sol bölümdeki ilk ifade k 'da oluşan zamana bağlı değişen miktarı gösterirken, ikinci ifade k 'nın konveksiyonla taşınım miktarını belirtmektedir. Eşitliğin sağ tarafında kalan ifadeler sırasıyla türbülans üretimi, k 'da oluşan kayıp miktarı, viskoz gerilme nedeniyle k 'nın taşınımı, Reynolds gerilme nedeniyle k 'nın taşınımını ve basınç nedeniyle k 'nın taşınımını olarak ifade edilmektedir [46]. Eşitlik 4.15 yardımıyla temsil edilen türbülans kinetik enerjisi denkleminde viskoz kayıp terimi ϵ ile temsil edilmiştir ve bu terimin kinetik enerji üzerinde negatif bir etki yarattığı rahatlıkla anlaşılabilir. Viskoz kayıp terimi Eşitlik 4.16 yardımıyla hesaplanabilir.

$$\epsilon = \nu \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \quad (4.16)$$

4.2.4 Türbülans Modeli (Standart k- ω)

Problemin çözümünde HAD yöntemleri kullanılırken toplamda 4 yönetici denklem (3 momentum korunumu denklemi, 1 kütle korunumu denklemi) bulunmasına rağmen türbülans çalkantı terimleriyle birlikte toplamda 10 adet bilinmeyen bulunmaktadır. İlgili denklem sayısının bilinmeyen sayısından az olması sebebiyle

problemin iteratif olarak çözülebilmesi için bir türbülans modeline ihtiyaç duyulmaktadır.

HAD çözüm programlarında kullanılan 2 denklemlilik türbülans modelleri içerisinde en çok kullanılan modellerinden birisi standart k- ω türbülans modelidir. Bu türbülans modeli D.C. Wilcox [43, 49] tarafından geliştirilmiştir. Bu modelde türbülans kinetik enerjisi kayıp oranı (ω) ile türbülans kinetik enerjisi (k) için taşınım denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.17 ve Eşitlik 4.18 de belirtilen G_ω türbülans kinetik enerji kayıp oranının (ω) üretimini gösterirken, G_k ortalama hız gradyanlarından kaynaklı kinetik enerji üretimini ifade etmektedir. Γ_ω ile Γ_k ω ve k'nın difüzyivitelerini simgelemektedir. Türbülans kaynaklı k ve ω için kayıpları ise Y_ω ve Y_k göstermektedir. [46].

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (4.19)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (4.20)$$

σ_k ve σ_ω türbülans Prandtl sayıları olup (k ve ω için) türbülans viskozitesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/k}{1 + Re_t/R_k} \right) \quad (4.21)$$

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (4.22)$$

$$R_k = 6 \quad (4.23)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta}{3_i} \quad (4.24)$$

$$\beta_i = 0.072$$

K- ω türbülans modeli ve yüksek Re sayılı akışlar için $\alpha^* = \alpha_0^* = 1$ olarak dikkate alınır.

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial x_i}{\partial x_j} \quad (4.25)$$

Boussines yaklaşımı bağlamında G_k 'yı değerlendirilirse;

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (4.26)$$

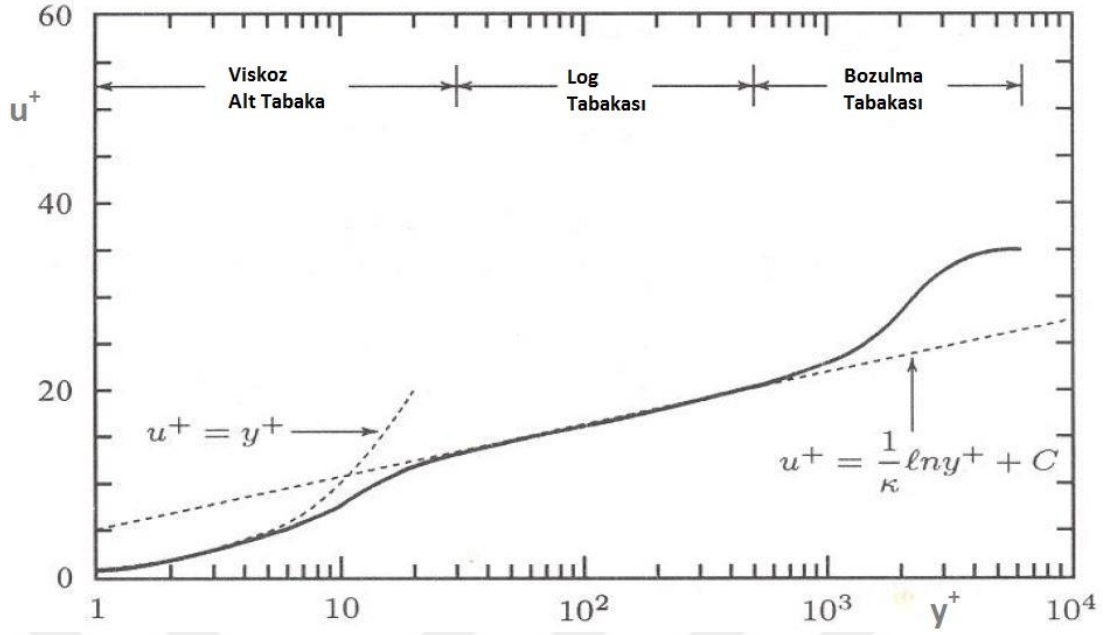
S ise ortalama rate of strain tensörü olarak adlandırılır.

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (4.27)$$

Türbülanslı akış problemlerinin çözümünde türbülans modeli kullanılmalıdır. Akım düzenleyici yapıların ve su topunun geometrisi gereği akış pek çok noktada ayrışıp sonra tekrar birleşmektedir. Bu nedenle bu doktora tezi çalışmasında türbülans modeli olarak ayrışan akışlarda k- ϵ modeline göre daha başarılı olduğu ispatlanmış [50], [51] ve görece yine k- ϵ modeline göre daha fazla bilgisayar hafızasına ve CPU zamanına ihtiyaç duymasına [52] rağmen k-w türbülans modeli kullanılmıştır. Tek fazlı akış, ayrık akış (*segregated flow*) modeli kullanılarak modellenmiş, taşınım terimleri ikinci mertebeden ayrıklaştırılırken zaman ile ilgili terimler ise birinci mertebeden ayrıklaştırılmıştır. Basınç ile hız arasındaki ilişki için tahmin eden-düzelten SIMPLE algoritması kullanılmıştır [50].

4.2.5 Duvar Fonksiyonu

Türbülanslı iç akışlarda, bu akışı en iyi şekilde ifade etmenin yanısıra duvar etrafında oluşan sınır tabakayı da iyi bir şekilde temsil etmek sayısal çözümün doğruluğunu artıran önemli etmenlerden biridir. Şekil 4.1'de [44] yakın duvar hızı (u^+) değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Türbülanslı sınır tabaka

Şekil 4.1 de temsili olarak gösterildiği gibi $5 > y^+ > 0$ kısmi alanında yakın duvar hızı laminar sınır tabakası için Eşitlik 4.28 ile elde edilebilir.

$$u^+ = y^+ \quad (4.28)$$

Şekil 4.1 de $5 < y^+ < 30$ olan bölge geçiş rejimi de denilen türbülanslı akışa laminar akıştan geçişi göstermektedir. Konu bölgede net bir çözüm bulunmamaktadır. [44]

Şekil 4.1 deki bir sonraki bölge olan $300 > y^+ > 30$ olan bölgede akış türbülanslı akışa benzer özellikleri göstermektedir. Konu bölge için duvar dibi hızı Eşitlik 4.29 kullanılarak hesaplanabilir.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C \quad (4.29)$$

Bu eşitlikte yüzeyin pürüzsüz olması durumunda $C = 5.0$ olarak kabul edilirken, Karman sabiti ise $\kappa = 0.41$ olarak dikkate alınmaktadır. [44]

Yapılan doktora tezi çalışması kapsamında literatürde mevcut problemlerde de çalışılan bölge olan $300 > y^+ > 30$ olan bölgede çalışmalar yürütülmüştür. Yine

benzer çalışmalar dikkate alınarak düşük veya yüksek fark etmeksizin tüm y^+ sayıları için geliştirmiş olan bir fonksiyon kullanılmış, y^+ değerin istenen aralıkta kalması, konu fonksiyonla hesaplanabilen ağ boyutuyla elde edilmiştir [44].

$$U^* = \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \quad (4.30)$$

Eşiklik 4.30 da U_P , k_P ve y_P sırasıyla P olarak belirtilen cidara yakın bir noktadaki ortalama hızı, P noktasındaki türbölans kinetik enerjisini ve P noktasının cidara mesafesini ifade etmektedir.

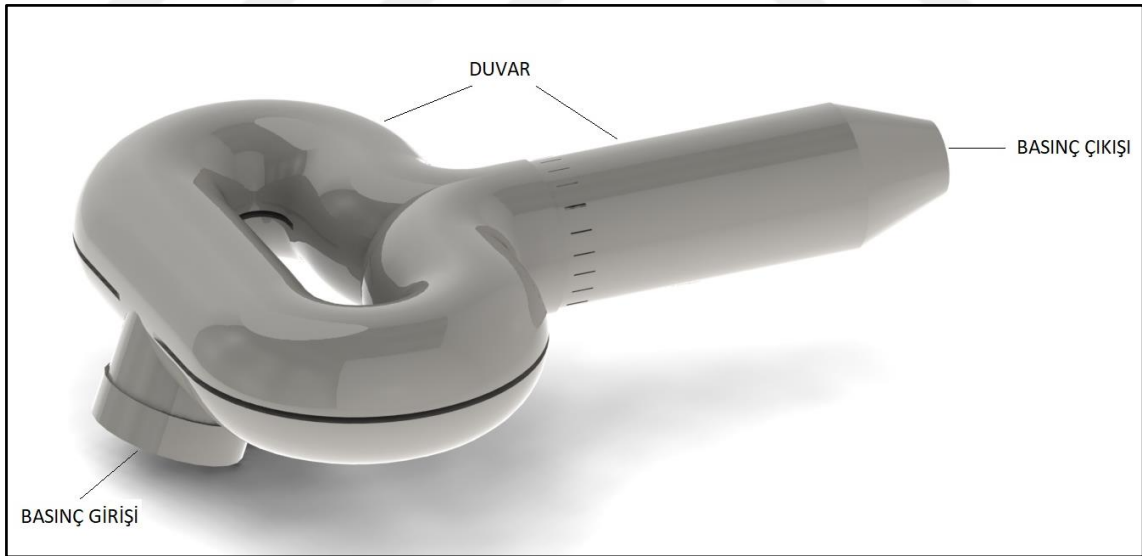
4.2.6 Ardışık Çözüm Metodu

Bu doktora tezinde çözücü olarak tercih edilen viskoz akışkanlar için HAD çözücüsünde var olan ardışık (segregated flow) çözüm metodu tercih edilmiştir. Çözüm metoduna ilişkin aşamalar şu şekilde listenebilir [53] ve bu aşamalar, belirlenen yakınsaklık değeri sağlanana kadar tekrar edilmelidir.

- Mevcut çözümde bulunan parametrelerden viskozite, ısı ve yoğunluk vb akışkan özellikleri ile türbölans viskozitesi parametrelerinin güncellenmesi,
- Güncellenen değerler yardımı ile konu momentum denklemlerinin çözülmesi,
- Basınç düzeltme denkleminin elde edilmiş olan hız alanı ve kütleel debi yardımıyla çözülmesi,
- Bir önceki adımda elde edilmiş olan basınç düzeltmesi ile kütleel debi, basınç ve hız alanının düzenlenmesi,
- Skaler büyüklükler için denklemlerin çözümü, (enerji, türbölans vb)
- Eşitliklerin yakınsaklık kontrolünün sağlanması

4.3 Hesaplama Hacmi, Sınır Koşulları ve Ağ Yapısı

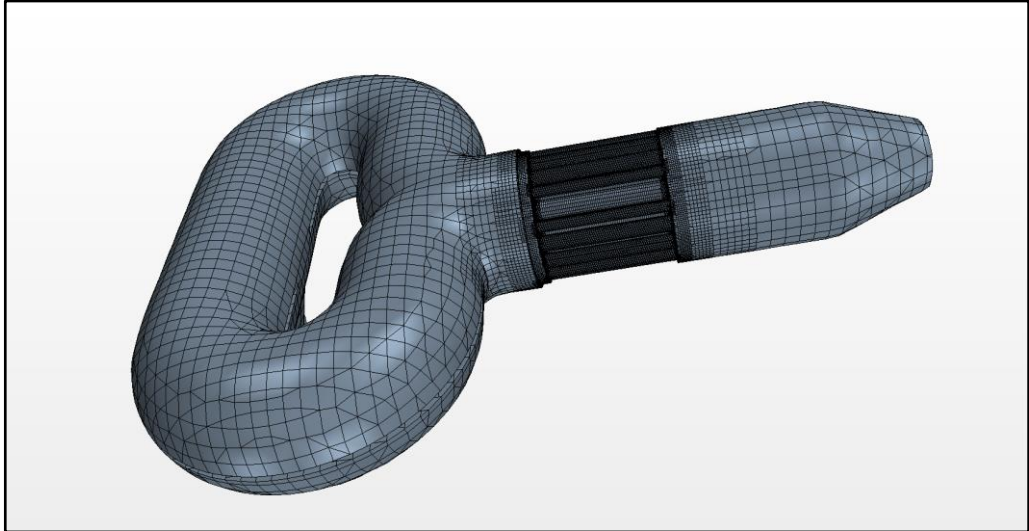
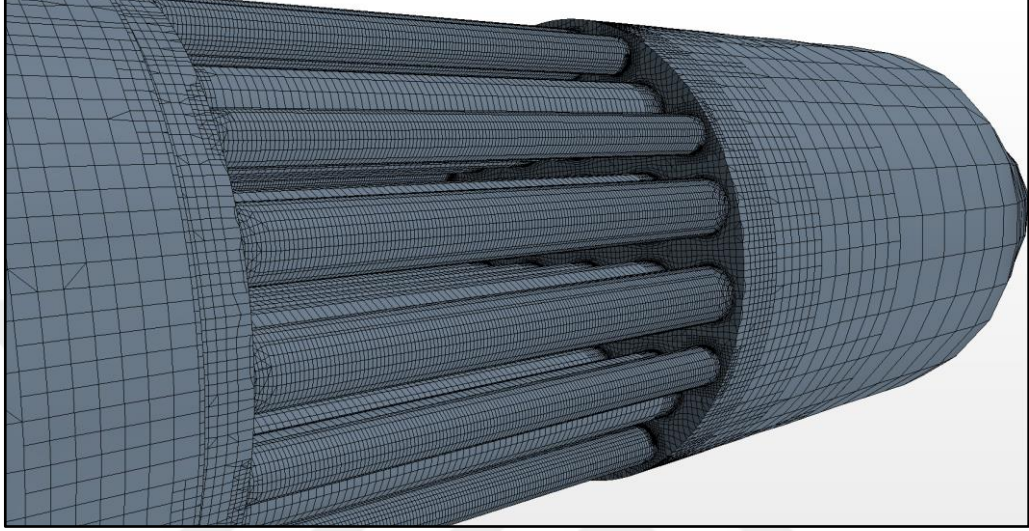
Bir HAD analizinde hesaplama hacmi ve sınır koşullarının doğru ve makul bir şekilde belirlenmesi problemin doğru bir şekilde temsil edilebilmesi için hayati önem taşımaktadır. Problem bir iç akış olduğundan sayısal analizler yalnızca su topu içerisinde modellenerek gerçekleştirilmiştir. Hesaplama hacmi gövde, boru ve nozul dahil olmak üzere su topunun içinde oluşturulmuştur. Deneysel veriler sadece basınç ölçümlerine dayandığından gövdeye giriş basınç girişi (pressure inlet-total pressure), nozul çıkışı ise basınç çıkışı (pressure outlet-total pressure) olarak tanımlanmıştır. Kalan yüzeyler ise kaymaz duvar (no-slip wall) olarak belirlenmiştir. Basınç girişi akışın uniform olarak su topuna girdiği kabul edilerek yapılmıştır. Yapılan sayısal analiz çalışmalarında ayrışan ve birleşen akış hacmi geometrilerinde tercih edilen türbülans modeli olan standart $k-\omega$ kullanılmıştır. Türbülans yoğunluğu (turbulence intensity) 0.01 ve türbülans viskozite oranı (turbulent viscosity ratio) 10 olarak seçilmiştir. Türbülansa dair diğer özellikler analiz programı içerisinde standart (default) olarak seçilmiştir. Şekil 4.2’de bahsi geçen sınır şartları gösterilmektedir.

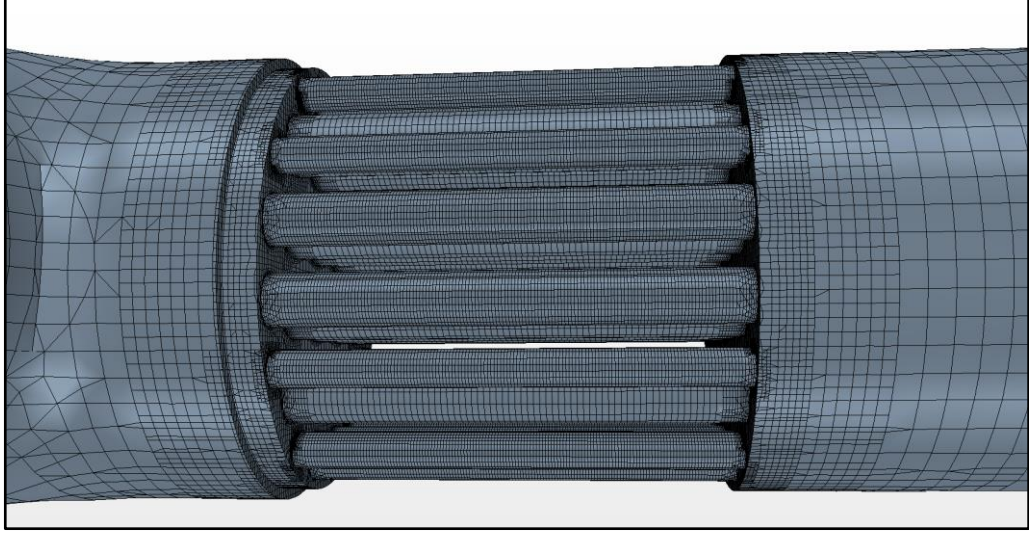


Şekil 4.2 Sınır şartları

Sonlu hacim yöntemine dayalı altı yüzlü elemanlar kullanılarak hesaplama hacmi ayrıklaştırılmıştır. Duvar yüzeylerine yakın bölgelerde prizma katmanları oluşturulmuş ve prizma katmanı içindeki akışı modellemek için y^+ duvar

fonksiyonları kullanılmıştır. Çeşitli çalışmalar tarafından önerildiği gibi y^+ 30 ile 300 arasında tutulmuştur [54]. Prizma katmanına ek olarak, yukarı ve aşağı akış bölgelerdeki akışı doğru bir şekilde temsil etmek için boru içindeki akım düzenleyicinin etrafında bölgesel ağ iyileştirmesi yapılmıştır. Şekil 4.3’de ise ağ yapısı örnekleri gösterilmiştir.





Şekil 4.3 Ağ yapısı

4.4 Sonuçlar

Bu bölümde, özgün akım düzenleyici tasarımı için GCI yöntemi kullanılarak sayısal belirsizlik belirlenmiştir. Daha sonra 200mm uzunluklu özgün akım düzenleyiciden elde edilen sayısal sonuçlar, sayısal yöntemin doğruluğunu görmek için deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonrasında özgün akım düzenleyici performansı, ISO 5167-3'te [1] tavsiye edilen 2 farklı akım düzenleyici olan Zanker ve Tube Bundle ile sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Son olarak, özgün akım düzenleyici uzunluğunun su topu içindeki performansı üzerindeki etkisi sayısal olarak araştırılmıştır.

4.4.1 Belirsizlik Değerlendirmesi

Sayısal yöntem çoğunlukla ağ bağımlılığı çalışmaları yapılarak kontrol edilir. Ancak bu yaklaşımın dışında sayısal belirsizliğin belirlenmesi gerekmektedir [55]. Bu tez çalışmasında uygulanan sayısal yöntemin belirsizliğini hesaplayabilmek için literatürde sıklıkla kullanılan ve AIAA [49, 56] ve ITTC [57] tarafından da önerilen GCI (Grid Convergence Index) yöntemi kullanılmıştır. Temelde Richardson ekstrapolasyonuna [58] dayanan bu yöntem ilk olarak Roache [59, 60] tarafından ortaya atılmış, sonrasında gerekli görülen düzenlemelerle çeşitli çalışmalar tarafından tekrar ele alınmıştır [61, 62]. Sayısal yönteme ilişkin

belirsizliği hesaplayabilmek adına elik ve arkadaşları [63] tarafından sunulan metodoloji takip edilmiştir.

Bu tez çalışmasında yapılan sayısal analizlerdeki toplam belirsizliğin ağ yapısı ve zaman adımıdan kaynaklandığı kabul edilmiştir. Bir başka belirsizlik kaynağı olan iteratif belirsizlik ise diğerlerine göre nispeten küçük olmasından ötürü ihmal edilmiştir. Belirsizliği hesaplayabilmek adına hem zaman adımı hem de ağ yapısı için 3 farklı analiz seti oluşturulmuştur. Her bir belirsizlik kaynağı için sıkladıştırma faktörü literatürdeki çalışmalar da dikkate alınarak $\sqrt{2}$ olarak belirlenmiştir. Bu noktada belirsizlik değerlerini ayrıık olarak hesaplayabilmek için, bir belirsizlik kaynağı sıkladıştırılırken diğerinin sabit tutulduğu belirtilmelidir. Bir başka deyişle ağ yapısı sıkladıştırılırken zaman adımı sabit tutulurken, zaman adımı sıkladıştırılırken ağ yapısı sabit tutulmuştur. Böylece her iki kaynağa (ağ yapısı ve zaman adımı) ilişkin belirsizlik değerlerinin münferit olarak hesaplanması sağlanmıştır. Bu çalışmada belirsizlik hesabı için takip edilen metodoloji şu şekilde özetlenebilir:

- φ_3 , φ_2 ve φ_1 sırasıyla seyrek, orta ve sık ağ yapısı ya da zaman adımına ilişkin herhangi bir skaler değerı göstermek koşuluyla yakınsama faktörü (R) Eşitlik 4.31 yardımı ile bulunur.

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\varphi_3 - \varphi_2} \quad (4.31)$$

- Yakınsama faktörünün 0 ila 1 arasında olması çözümün monotonik olarak yakınsadığını gösterir ve metodoloji uygulanabilir hale gelir. Yakınsama faktörünün 0 ila -1 arasında hesaplanması çözümün salınımlı bir şekilde yakınsadığını gösterir. Bu durumda farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Yakınsama faktörünün 1'den büyük ya da -1'den küçük olması durumları ise çözümün monotonik ya da salınımlı olarak ıraksadığını gösterir.
- Monotonik yakınsama kriteri sağlandığı takdirde görünen mertebe (p) Eşitlik 4.32 yardımı ile hesaplanabilir. Burada sabit bir sıkladıştırma faktörü için q değerinin 0 çıkacağı belirtilmelidir.

$$p = \frac{\ln \left| \frac{1}{R} + q \right|}{\ln(r_{21})} \quad (4.32)$$

- Ekstrapole edilmiş değer ve bağıl hata Eşitlik 4.33 ve Eşitlik 4.34 kullanılarak şu şekilde hesaplanabilir.

$$\phi_{21}^{ext} = \frac{r^p \phi_1 - \phi_2}{(r_{21}^p - 1)} \quad (4.33)$$

$$e_a^{21} = \left| \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1} \right| \quad (4.34)$$

- Son olarak zaman adımı ya da ağ yapısı için belirsizlik değeri Eşitlik 4.35 kullanılarak hesaplanabilir.

$$GCI_{FINE}^{21} = \frac{1.25 e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad (4.35)$$

- Önceki adımlarda da belirtildiği üzere yakınsama kriteri hesabına göre salınımlı yakınsamaya sahip bir çözüm seti için ise Eşitlik 4.36 ve Eşitlik 4.37 kullanılarak belirsizlik değeri hesaplanabilir. Burada F_s değeri emniyet payı olarak nitelendirilebilir ve bu çalışmada 3 olarak kabul edilmiştir.

$$E = \frac{\phi_3 - \phi_1}{1 - r^p} \quad (4.36)$$

$$U_N = |E| \cdot F_s \quad (4.37)$$

Bu tez çalışmasında daha önce de belirtildiği üzere belirsizlik hesabı için 3 ayrı analiz seti oluşturulmuş ve belirsizlik kaynağı olarak ağ yapısı ve zaman adımı belirlenmiştir. Tablo 4.1'de belirsizlik hesabı için oluşturulan analiz setlerine ilişkin eleman sayısı ve zaman adımı bilgileri gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Belirsizlik hesabı için kullanılan analiz setlerinin özellikleri

Analiz Türü	Eleman Sayısı (-)	Zaman Adımı (s)
Sık	4.3×10^5	0.010
Orta	3.2×10^5	0.014
Seyrek	2.5×10^5	0.020

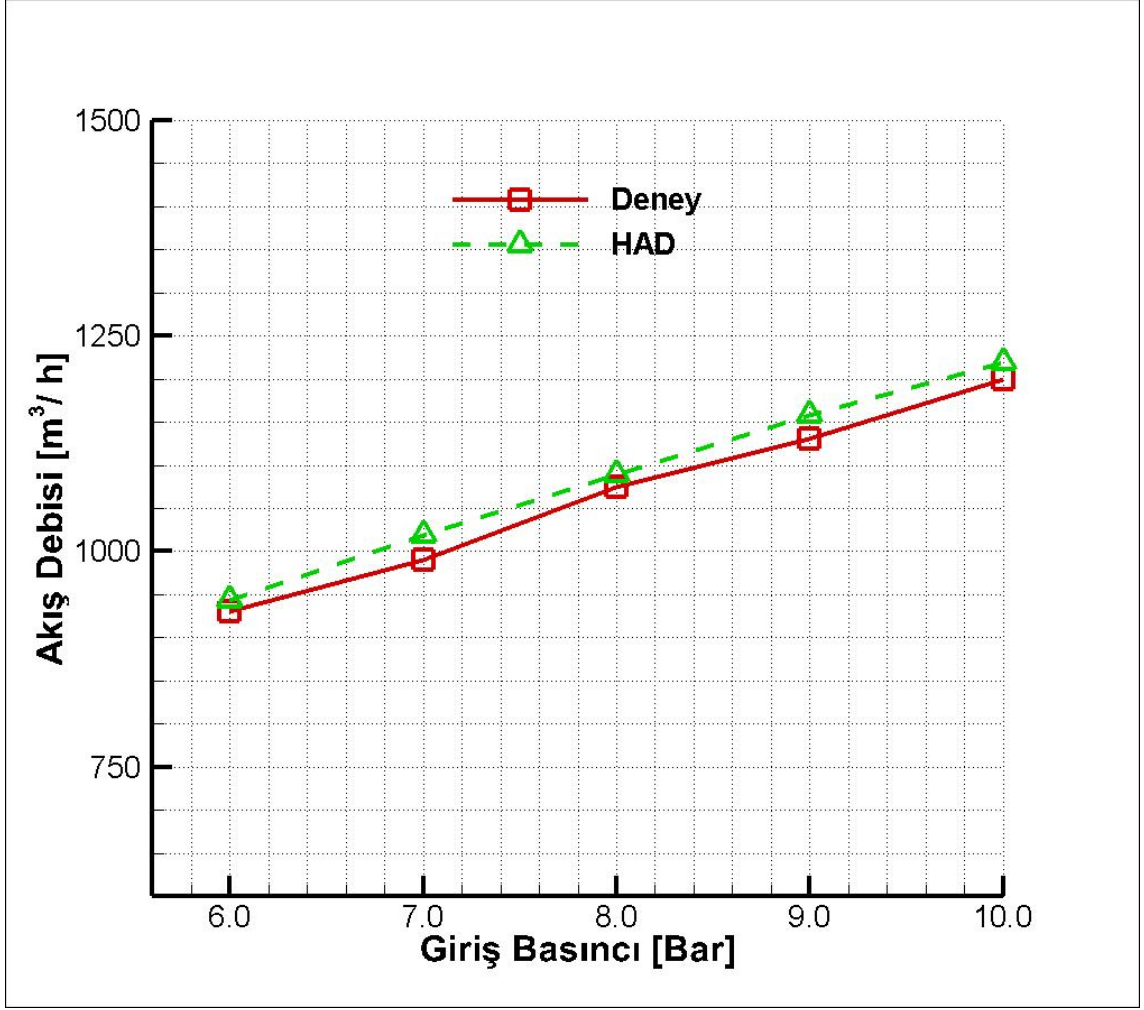
Belirsizlik değeri 200 mm uzunluklu özgün akım düzenleyicinin yerleştirildiği su topu mekanizması için 10 bar giriş basıncında gerçekleştirilmiş, belirsizlik için ölçülecek skaler değer ise çıkış debisi olarak belirlenmiştir. Belirsizlik hesabında zaman adımına ilişkin yakınsama faktöre 0 ila 1 arasında hesaplanmış ve dolayısıyla belirsizlik değeri Eşitlik 4.32 - 4.35 takip edilerek hesaplanmıştır. Ağ yapısı belirsizlik hesabında ise salınımlı bir yakınsama değeri elde edilmesinden ötürü belirsizlik hesabı Eşitlik 4.36 ve Eşitlik 4.37 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.2 Zaman adımı ve eleman sayısı için hesaplanan debi ve belirsizlik değerleri

Analiz Türü	Ağ Yapısı için elde edilen çözüm	Zaman Adımı için elde edilen çözüm
$Q_{SIK} (m^3/h)$	1219.7	1219.7
$Q_{ORTA} (m^3/h)$	1232.4	1222.8
$Q_{SEYREK} (m^3/h)$	1087.3	1228.3
$U_N (%)$	0.466	0.410

4.4.2 Deney ile Sayısal Sonuçların Doğrulanması

Daha önce de belirtildiği gibi, deneyler Tuzla'da Devlet Liman Hizmetleri (DLH) alanında denizcilik klas kuruluşları olan BV ve TL sörveyörleri gözetiminde gerçekleştirilmiştir. Genel bir bakış açısına ulaşmak ve sayısal sonuçların doğruluğunu sağlamak için deneyler farklı giriş basınçları için tekrarlanmıştır. 200 mm uzunluklu özgün akım düzenleyicili su topu için gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçların sayısal sonuçlar ile mukayesesi Şekil 4.4'te gösterilmektedir



Şekil 4.4 Deneysel ve sayısal verilerin karşılaştırılması

Şekil 4.4'e bakıldığında hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında her iki eğrinin genel eğiliminin neredeyse aynı olduğu söylenebilir. Bunun yanında HAD sonuçları tüm giriş basınçlarında deneyden elde edilen debi miktarlarından bir miktar daha yüksek sonuçlar üretese de iki yöntem arasındaki bağıl farklar tüm giriş basınçları için %2.90'ın altındadır. Tablo 4.3'de her iki yöntemden elde edilen sonuçlar listelenmiş ve deney ile HAD arasındaki bağıl fark gösterilmiştir. Bu sonuçlar ışığında sayısal modelin deneyi oldukça başarılı bir şekilde temsil ettiği rahatlıkla söylenebilir.

Tablo 4.3 Deneysel, sayısal çalışmalardan elde edilen debi mukayesesi

Giriş Basıncı [bar]	Deney [m ³ / h]	HAD [m ³ / h]	Fark [%]
6	930	942.7	1.36
7	990	1018.7	2.89
8	1075	1089.1	1.31
9	1130	1157.5	2.43
10	1200	1219.7	1.64

Hem deneysel hem de sayısal çalışmalarda giriş basıncı arttıkça su sopu debisinin ve su atma mesafesinin arttığı açık bir şekilde görülmüştür. Akım düzenleyici bulunmayan su topunda su pulverize olup istenen atış mesafesini sağlayamazken, akım düzenleyici bulunduran su topu HYS sistemi klas kuralında belirtilen “su topu 1200m³/h debide suyu en az 120 metreye ulaştırmalıdır” kuralını [35,36] sağlamıştır. Akım düzenleyici sayesinde istenen teknik gereklilikleri sağlayan akım düzenleyicili su topu, denizcilik klas kuruluşları Bureau Veritas (BV) ve Türk Loydu (TL) tarafından marine tip onay sertifikası almaya uygun görülmüştür.

4.4.3 Farklı Tipte Akım Düzenleyicilerin Karşılaştırılması

Sayısal yöntemin deneylerle doğrulanmasından sonra, daha önce bahsedildiği gibi farklı tipte akım düzenleyiciler için sayısal analizler tekrarlanmıştır. Tablo 4.4’de yapılan sayısal çalışmalara ait test matrisi belirtilmiştir.

Makul bir karşılaştırma yapabilmek için Bölüm 4.3’de detaylı bir şekilde açıklanan sınır koşulları özdeş olarak tüm analizlerde kullanılmış ve ağ yapısı stratejisi birbirine benzer olacak şekilde oluşturulmuştur. Akım düzenleyicinin etkisine ilişkin genel bir sonuca ulaşmak için her analiz için debi değerleri ve boyutsuz basınç kayıp katsayısı (k) hesaplanmıştır. V, ρ ve P_1 ’in sırasıyla giriş hızını (m/s), su yoğunluğunu (kg/m³) ve giriş basıncını (Pa) temsil ettiği Eşitlik 2.1 kullanılarak k hesaplanabilir. P_2 ’nin eksenel yönde plakaların başlangıcından itibaren 2 boru

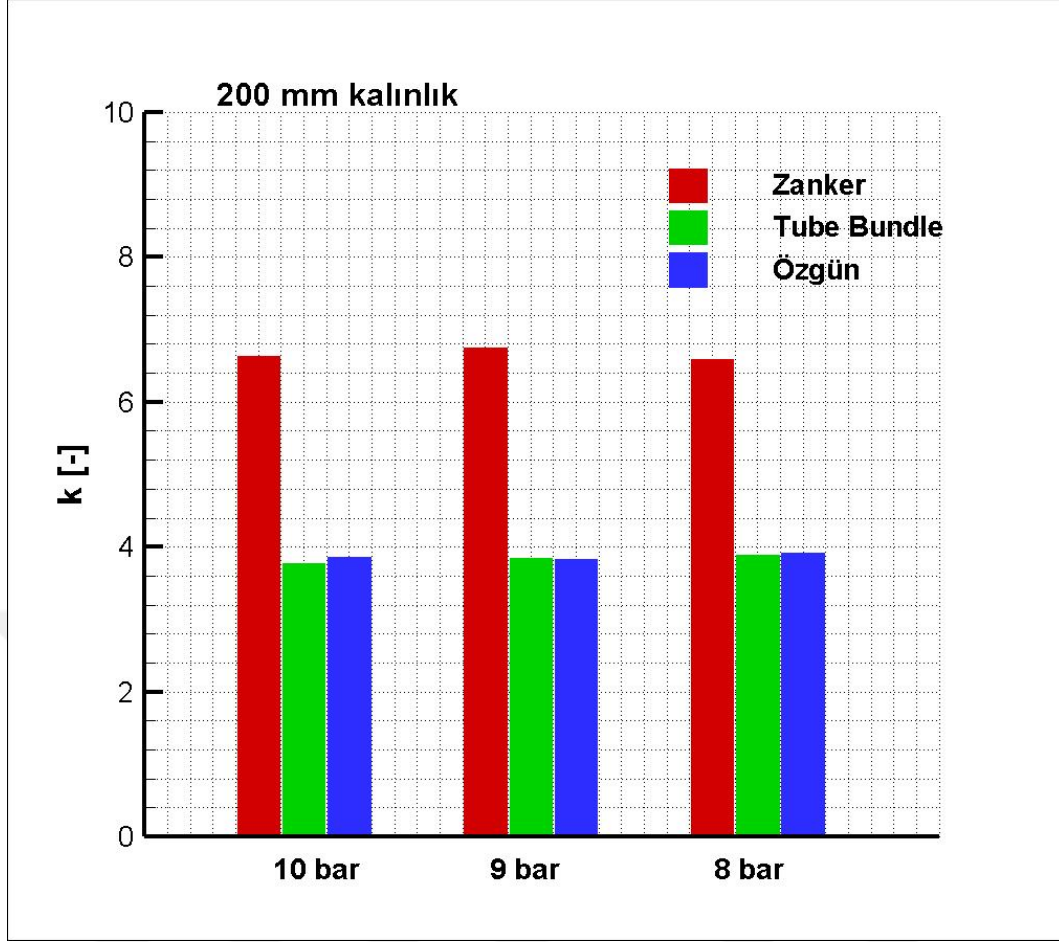
apından (420mm) sonra len ortalama basıncı gösterdiğine dikkat edilmelidir. Şekil 2.5’de P_1 ve P_2 değerlerinin okunduğu kesitler gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Farklı akım düzenleyici tiplerinde sayısal analizlere ait test matrisi

Akım Düzenleyici	Plaka Uzunluğu [mm]	Giriş Basıncı [bar]
<i>Zanker</i>	31.5 200	8, 9, 10
<i>Tube Bundle</i>	31.5 200	8, 9, 10
<i>zgn</i>	31.5 200	8, 9, 10

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da 8bar, 9bar ve 10bar giriş basınçları ve sırasıyla 200mm uzunluklu ve 31.5mm uzunluklu akım düzenleyiciler için boyutsuz basınç kayıp katsayısı karşılaştırması gösterilmiştir. Zanker’in boyutsuz kayıp katsayı değerleri en büyük iken diğer akım düzenleyicilerin sonuçları birbiri ile benzerdir. Tube Bundle boyutsuz basınç kayıp katsayısı sonuçları özgün akım düzenleyiciden 8bar ve 10bar için biraz daha düşük olmasına rağmen, diğer durumlar için özgün akım düzenleyicinin sonuçları daha düşüktür. Böylece genel perspektifte özgün akım düzenleyicinin kayıp katsayısı açısından Zanker ve Tube Bundle akım düzenleyicisine göre daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.

Hem Şekil 4.5’de hem de Şekil 4.6’da açıkça görüleceği üzere Zanker akım düzenleyici, Tube Bundle ve özgün akım düzenleyiciden dramatik bir oranla ayrışmıştır. Bu majör farklılık, uluslararası bir standart içerisinde önerilmiş olsa dahi, her akım düzenleyicisinin her problemde ve kullanım alanında uygun sonuçlar vermeyeceğini göstermiştir. Ayrıca bu sonuçlar her düzenleyicinin probleme ve kullanılacağı alana özgü tasarlanması gerektiğini ispatlar niteliktedir.

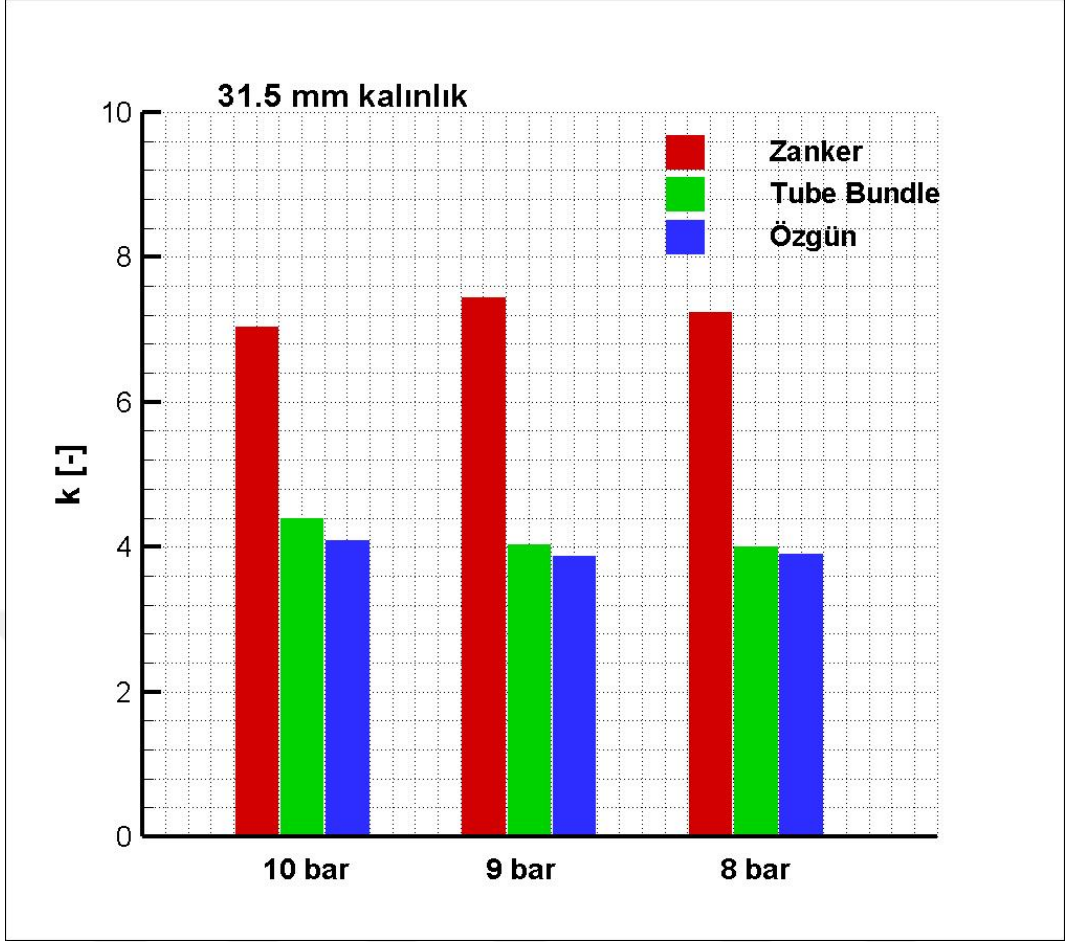


Şekil 4.5 200mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırması

Tablo 4.5’de 200mm uzunluktaki akım düzenleyiciler için sayısal analizlerden elde edilen boyutsuz basınç kaybı katsayısı sonuçları paylaşılmıştır.

Tablo 4.5 200mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırma

Basınç (bar)	Zanker (k)	Tube Bundle (k)	Özgün (k)
10	6.63	3.78	3.85
9	6.74	3.84	3.82
8	6.60	3.88	3.91



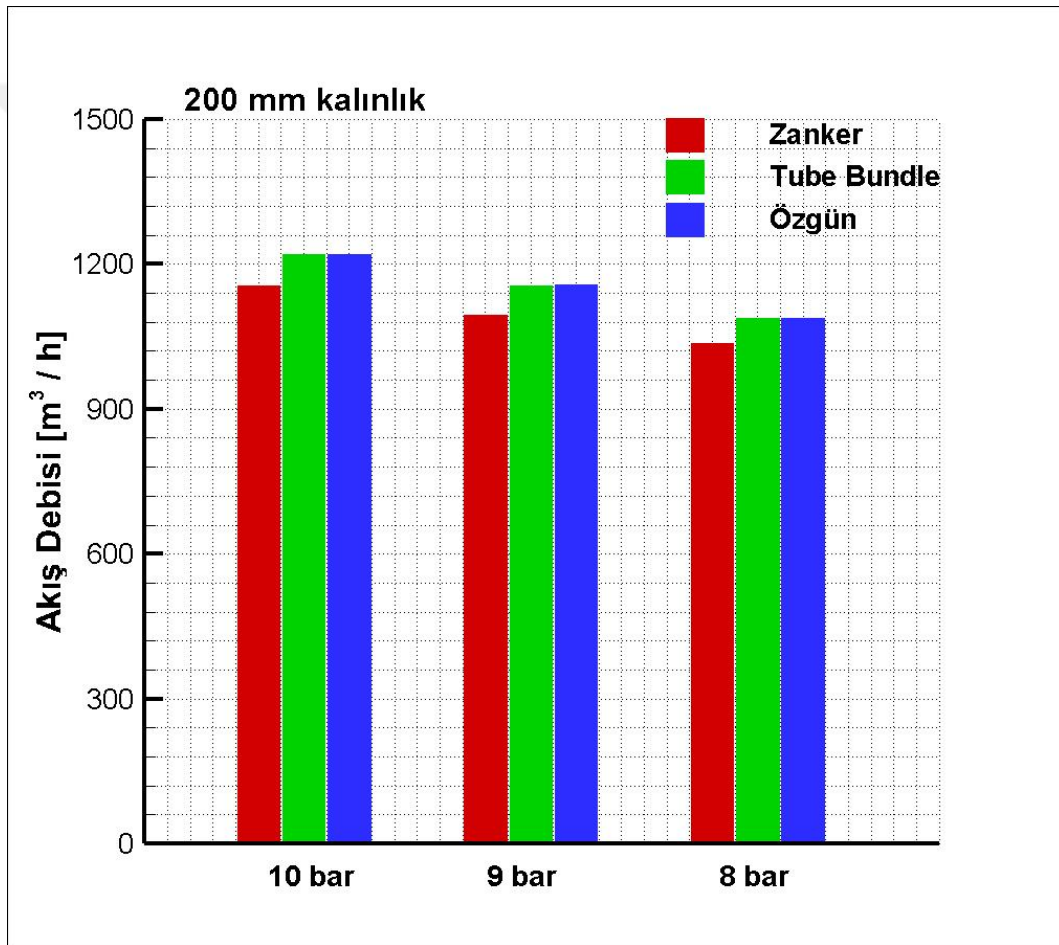
Şekil 4.6 31.5mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırması

Tablo 4.6'da benzer şekilde 31.5mm uzunluktaki akım düzenleyiciler için de sayısal analizlerden elde edilen boyutsuz basınç kaybı katsayısı sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 4.6 31.5mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırma

Basınç (bar)	Zanker (k)	Tube Bundle (k)	Özgün (k)
10	7.04	4.39	4.08
9	7.44	4.03	3.87
8	7.23	4.00	3.90

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 akım düzenleyicilerin bir su topu için diğer önemli performans parametresi olan debi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.7 ‘de farklı giriş basınçları için 200 mm lik plaka uzunluğuna sahip sonuçlar gösterilirken, benzer bir mukayese 31.5 mm için Şekil 4.8’te gösterilmektedir. Özgün akım düzenleyicinin, 31.5 mm uzunlukta tüm giriş basınçlarında maksimum debi değerlerini sağladığı görülmektedir. Özgün plakayla Tube Bundle arasındaki debi farkları tüm giriş basınçları için çok küçük olsa da Zanker tüm test koşullarında minimum debiye sahiptir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 ile Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de benzer sonuçlar çıkarılabilir.

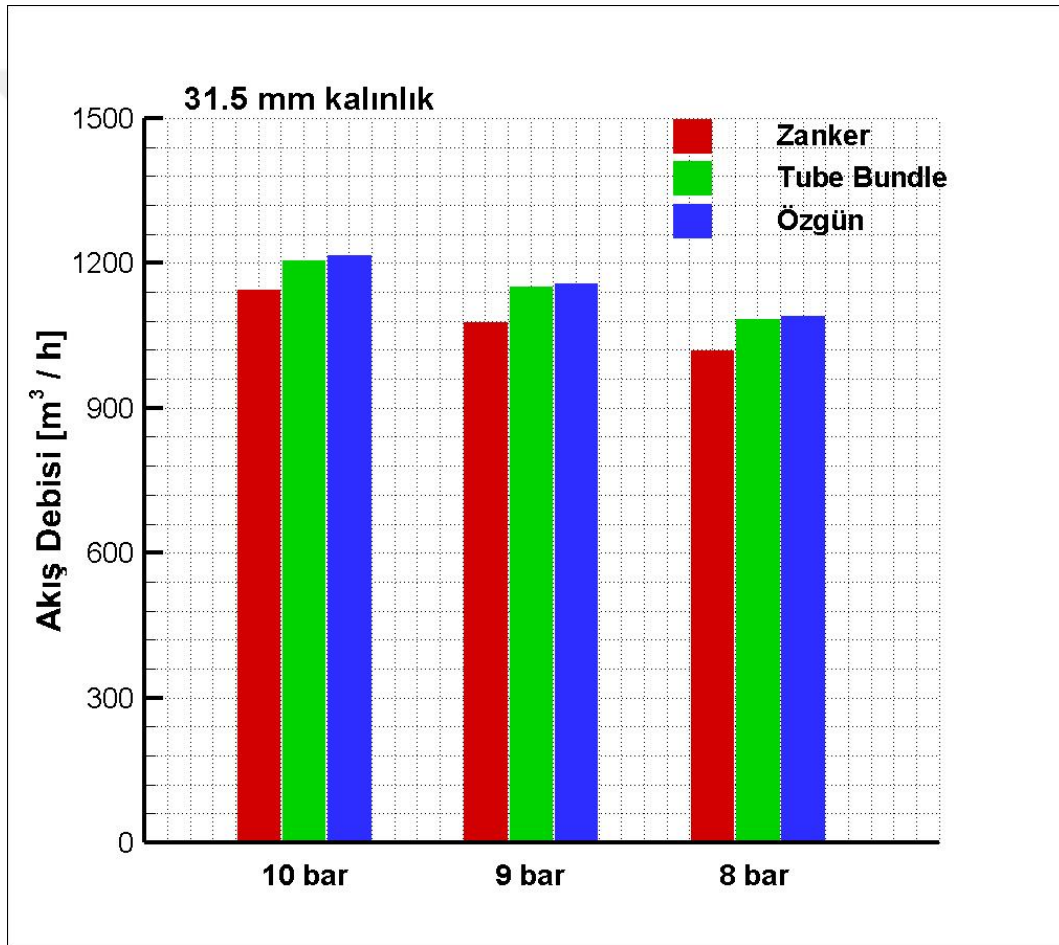


Şekil 4.7 200mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından karşılaştırma

Tablo 4.7’de 200mm uzunluktaki akım düzenleyiciler için sayısal analizlerden elde edilen debi sonuçları belirtilmiştir. Tüm bu çalışmalar farklı tipteki ve uzunluktaki plakaların su topu üzerindeki performansını kıyaslama imkanı sunmuştur.

Tablo 4.7 200mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından karşılaştırma

Basınç (bar)	Zanker (m ³ /h)	Tube Bundle (m ³ /h)	Özgün (m ³ /h)
10	1155.77	1220.17	1219.74
9	1094.18	1156.43	1157.48
8	1035.45	1089.18	1089.01



Şekil 4.8 31.5mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından karşılaştırma

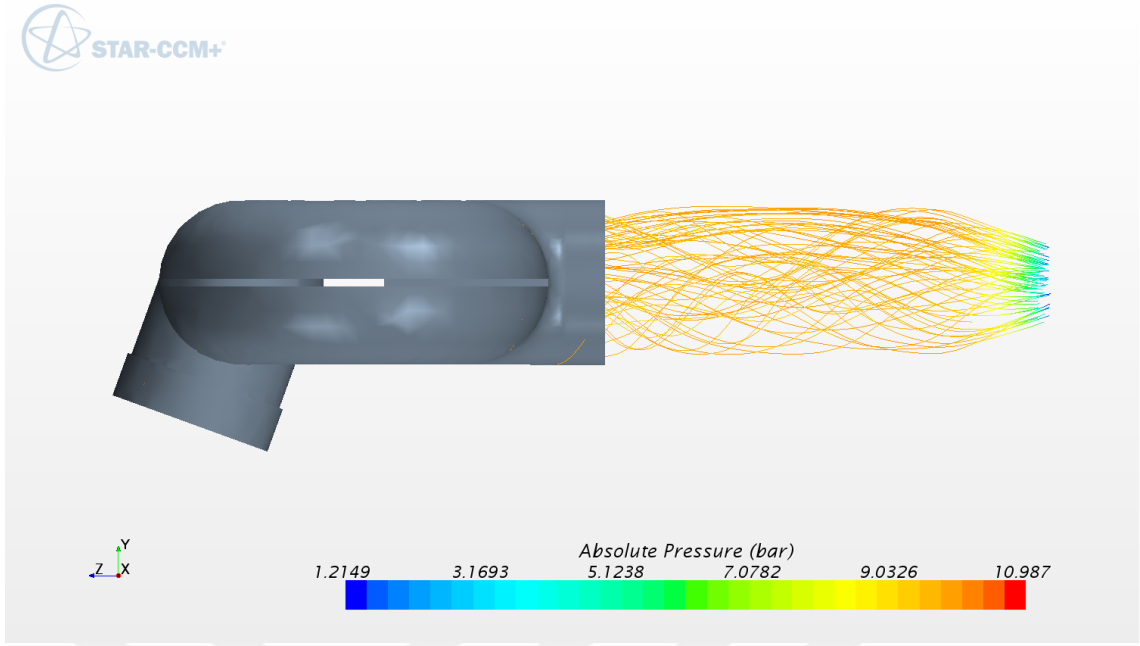
Tablo 4.4’de gösterilen test matrisine göre yapılan sayısal analiz çalışmalarının sonucuna göre özetle, özgün akım düzenleyici tasarımı genel olarak debi göz önüne alındığında Zanker ve Tube Bundle’dan daha iyi sonuçlara sahiptir.

Boyutsuz basınç kayıp katsayısı ve debi sonuçlarına göre Zanker akım düzenleyici plaka HYS sistemlerinde akım düzenlemek için uygun değildir. Tablo 4.8’de benzer şekilde 31.5mm uzunluktaki akım düzenleyiciler için de sayısal analizlerden elde edilen debi sonuçları gösterilmiştir.

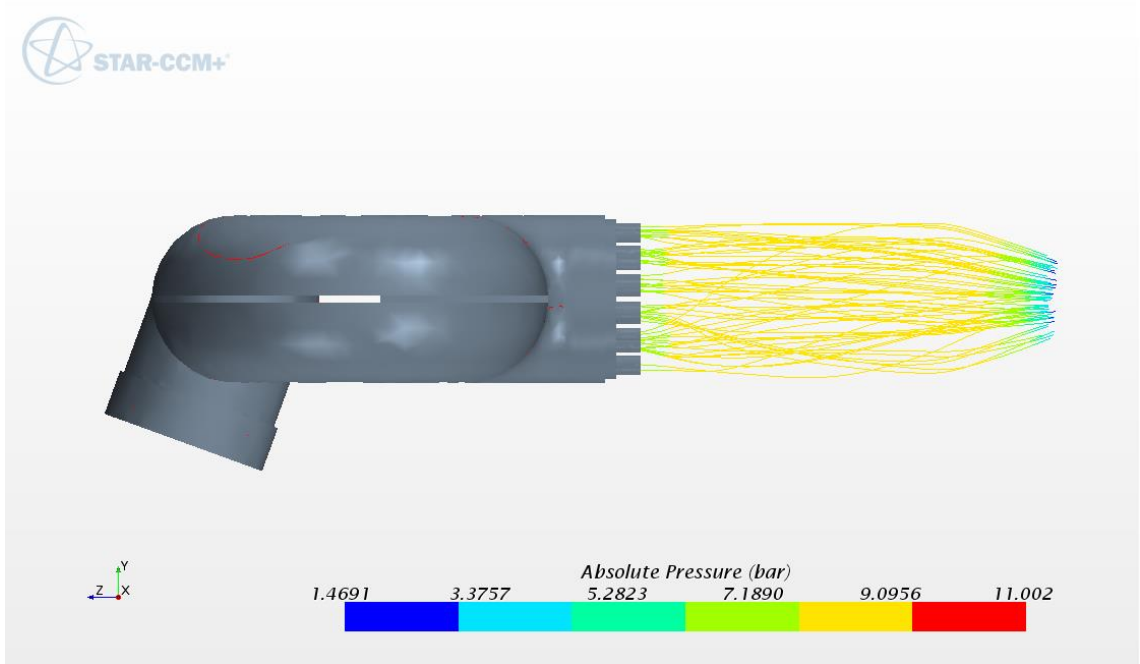
Tablo 4.8 31.5mm uzunluklu farklı akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından karşılaştırma

Basınç (bar)	Zanker (m ³ /h)	Tube Bundle (m ³ /h)	Özgün (m ³ /h)
10	1144.67	1205.28	1215.27
9	1076.66	1150.07	1157.37
8	1019.42	1084.61	1090.46

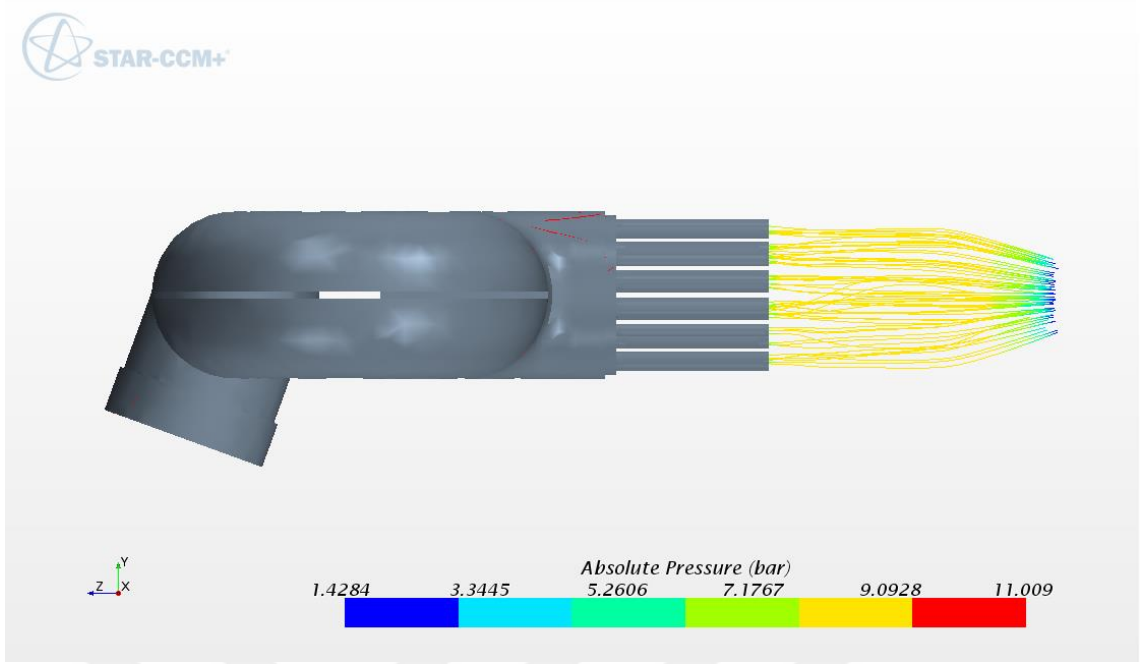
Farklı tipteki akım düzenleyicilerin akım hatları üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. 10 bar giriş basıncında akım düzenleyici plaka buludurmaya su topuna ait akım hatları Şekil 4.9’da gösterilirken, 200mm ve 31.5mm plaka uzunluklu Zanker ve Tube Bundle plakalar için benzer koşullarda akım hatları Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de gösterilmektedir. Akım hatları sonuçlarında görüldüğü gibi akım düzenleyicinin varlığı, plaka uzunluğundan ve tipinden bağımsız olarak su topu içindeki akışı düzenlemek için oldukça olumlu bir etkiye sahiptir. Farklı akım düzenleyici tipleri arasında özgün akım düzenleyici en iyi performansı gösterirken, Zanker plakanın akım hatlarının düzenlenmesi konusunda en kötü performansı gösterdiği görülmüştür.



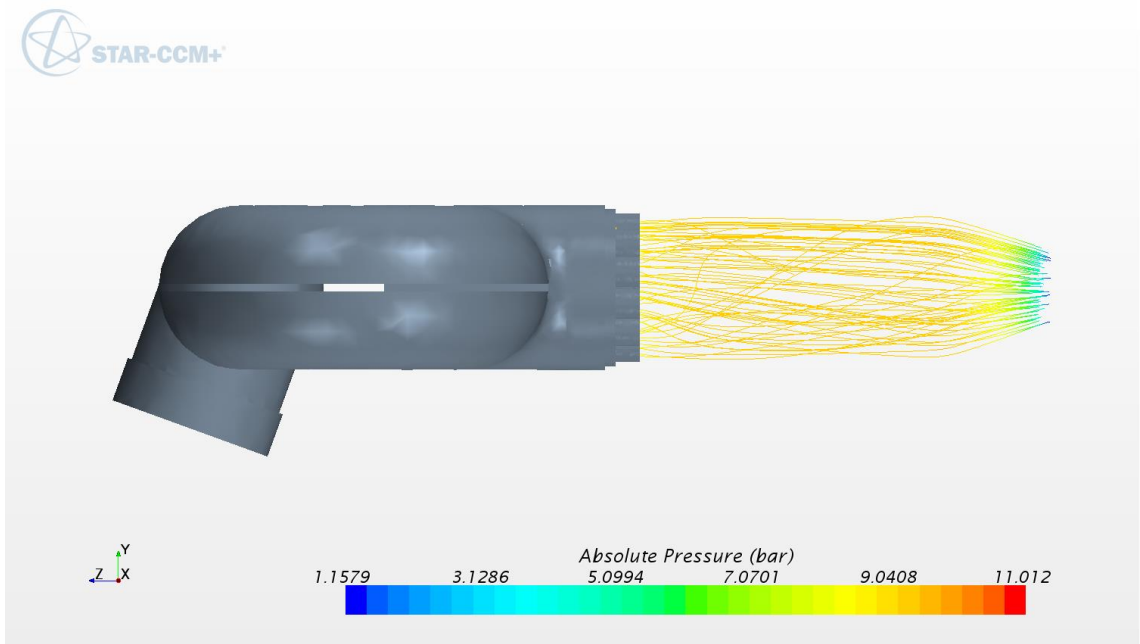
Şekil 4.9 Akım düzenleyici bulundurmeyan su topunun akım hatları



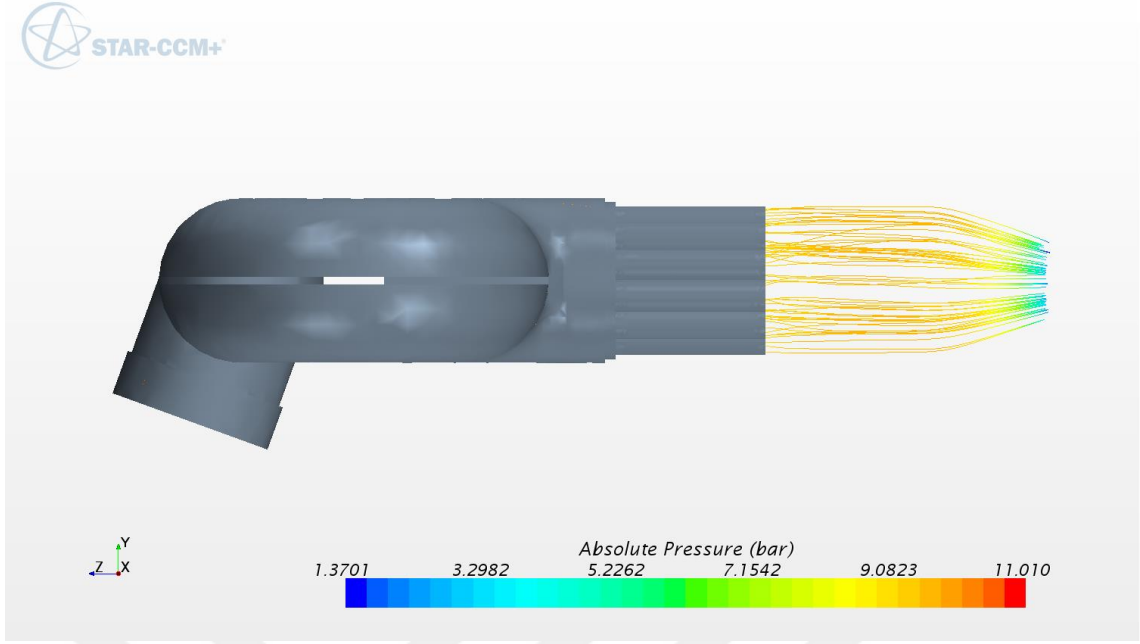
Şekil 4.10 31.5mm Zanker akım düzenleyicili su topu akım hatları



Şekil 4.11 200mm Zanker akım düzenleyicili su topu akım hatları



Şekil 4.12 31.5mm Tube Bundle akım düzenleyicili su topu akım hatları



Şekil 4.13 200mm Tube Bundle akım düzenleyicili su topu akım hatları

Akım düzenleyici plakalarının uzunluğunun debi ve boyutsuz basınç kayıp katsayısı etkileri Bölüm 4.4.4’de detaylıca incelenmiş olup, yine özgün akım düzenleyiciye ait akım hatları görselleri bu bölüm içerisinde gösterilmiştir.

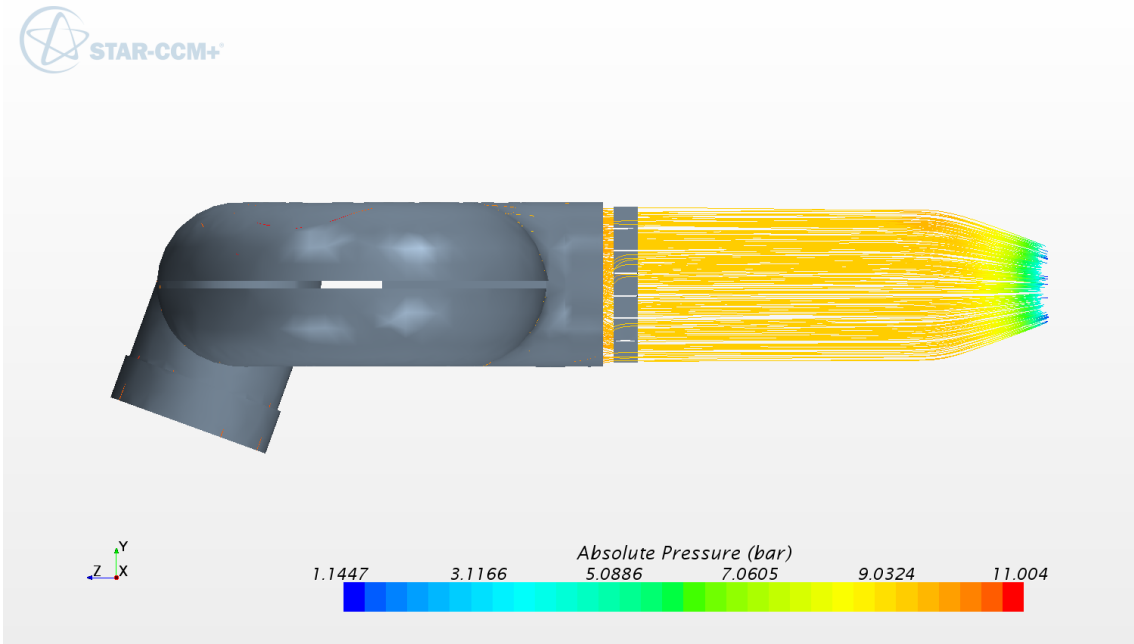
4.4.4 Akım Düzenleyici Uzunluğunun Performansa Etkisi

Önceki bölümde yapılan çalışmaların sonuçları göz önünde bulundurularak, debi açısından en iyi performansı gösterdiği için akım düzenleyici plaka kalınlığının su topu performansı üzerindeki etkisini görmek için özgün akım düzenleyici tasarımı seçilmiştir. Bu çalışma sayesinde hem akım düzenleyici bulundurmayan bir su topu için sayısal analizler yapılırken hem de 31.5mm, 50mm, 100mm ve 200mm uzunluğa sahip özgün akım düzenleyici tasarlanmış ve üzerinde sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu farklı plaka uzunluklarının akım düzenleyici performansını araştırmaya olanak sağlarken, bir yandan da akım düzenleyici bulundurmayan ve bulunduran su topu olarak da bir mukayese yapma imkanı vermiştir. Tüm geometriler için çalışmalar 8bar, 9bar ve 10bar giriş basınçları için tekrarlanmıştır. Tablo 4.9’da akım düzenleyici uzunluğunun etkisinin araştırılacağı bu çalışma için oluşturulan sayısal analiz test matrisi özet bir şekilde sunulmuştur.

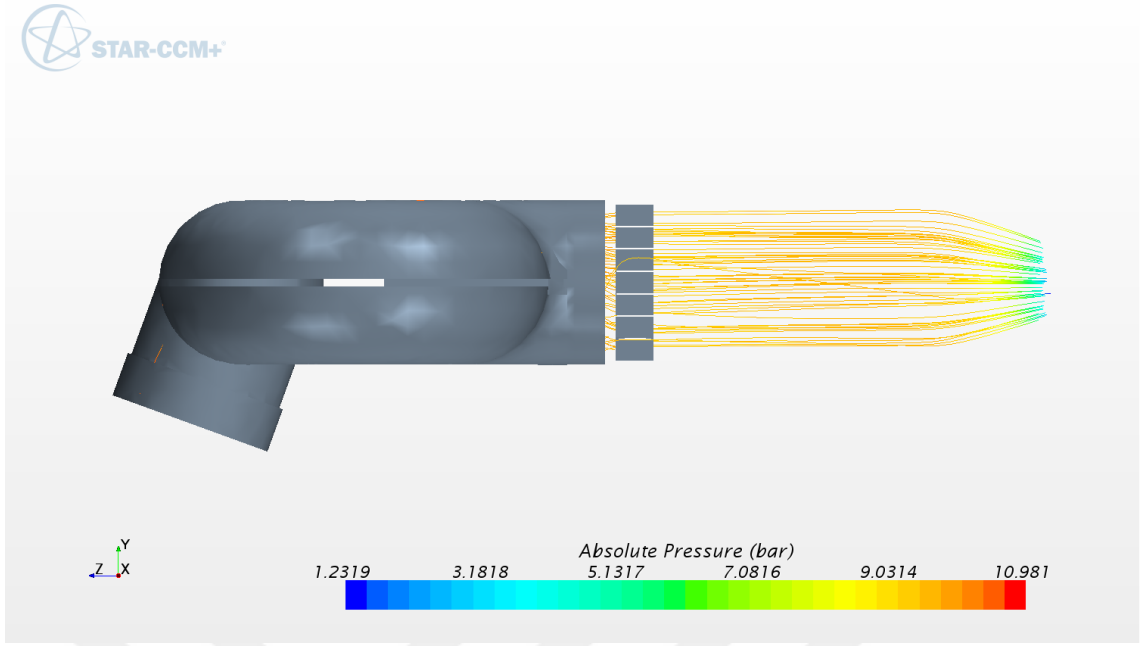
Tablo 4.9 Farklı uzunluklardaki özgün akım düzenleyiciler için sayısal analizlere ait test matrisi

Akım Düzenleyici	Plaka Uzunluğu [mm]	Giriş Basıncı [bar]
Plakasız	Plakasız	8, 9, 10
Özgün	31.5 50 100 200	8, 9, 10

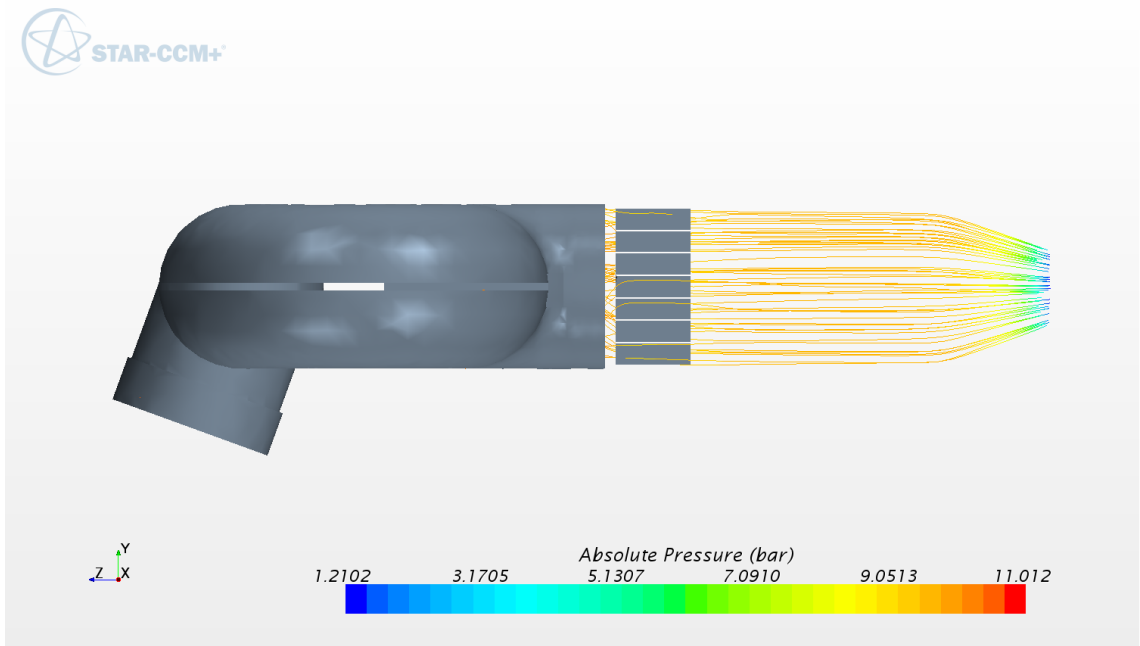
10 bar giriş basıncında akım düzenleyici plaka buludurmayan su topuna ait akım hatları Şekil 4.9'da gösterilmişti. 31.5mm, 50mm, 100mm ve 200mm plaka uzunluklu özgün plakalar için benzer koşullarda akım hatları Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Akım hatları sonuçlarında gösterildiği gibi akım düzenleyicinin varlığı, plaka uzunluğundan bağımsız olarak su topu içindeki akışı düzenlemek için yüksek derecede olumlu bir etkiye sahiptir. Ancak, farklı akım düzenleyici uzunluklarında akım hatları üzerinde önemli bir farklılık gözlenmemiştir.



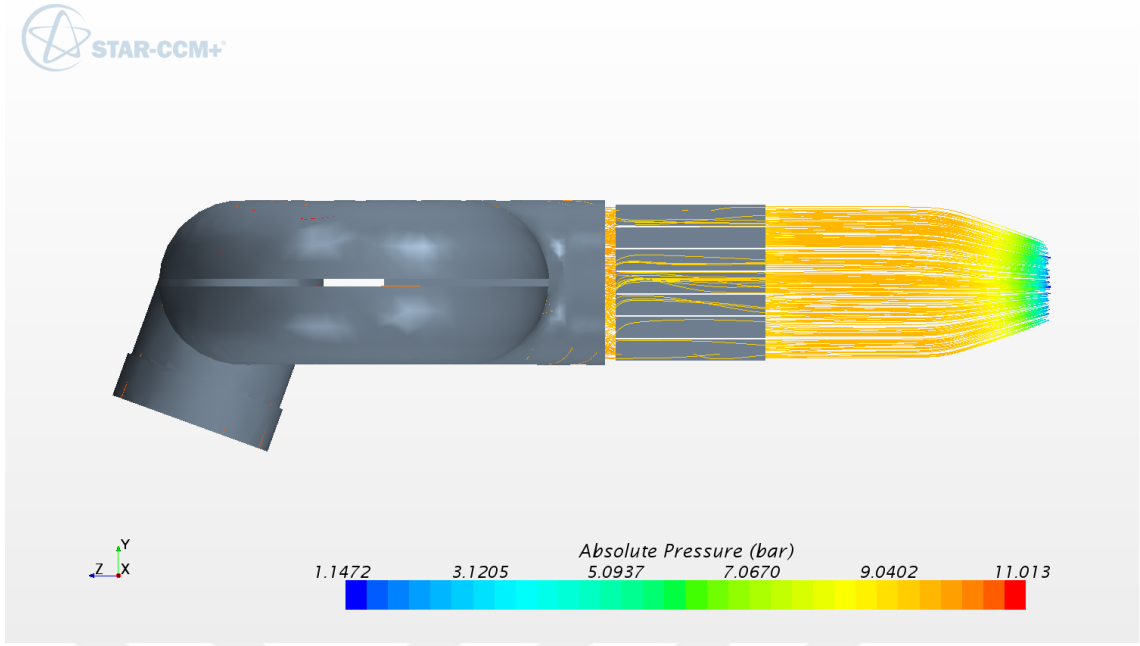
Şekil 4.14 31.5mm özgün akım düzenleyicili su topu akım hatları



Şekil 4.15 50mm özgün akım düzenleyicili su topu akım hatları

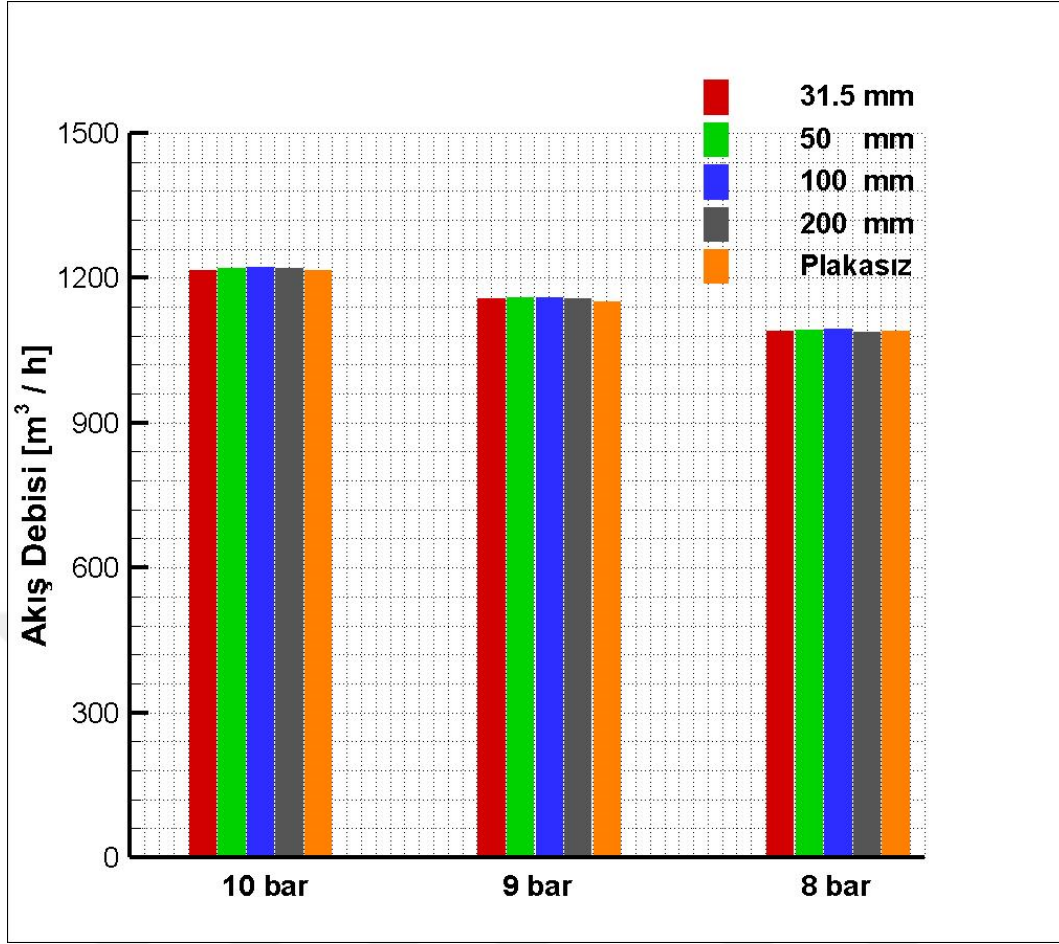


Şekil 4.16 100mm özgün akım düzenleyicili su topu akım hatları



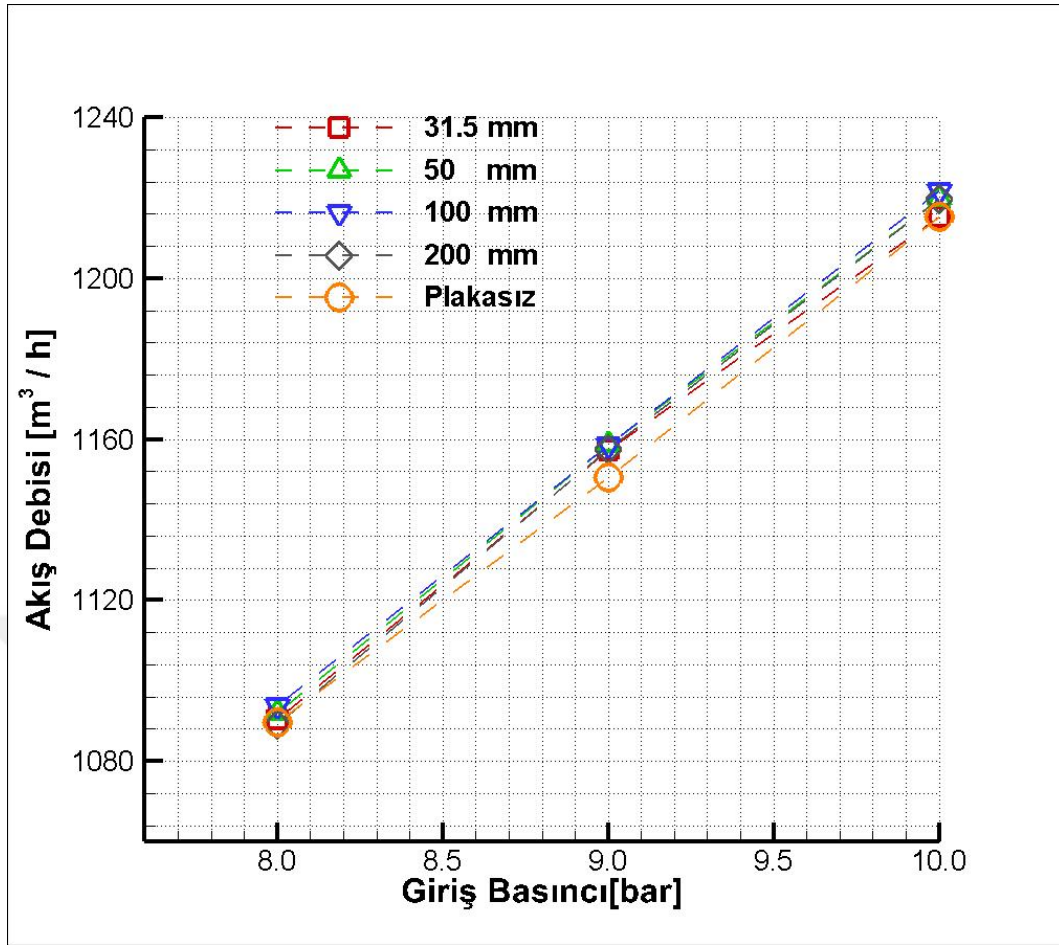
Şekil 4.17 200mm özgün akım düzenleyicili su topu akım hatları

Şekil 4.18 farklı uzunluklardaki özgün akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçları için debi değerleri açısından kıyaslamasını göstermektedir. Bu şekle göre, farklı plaka uzunlukları için debi değerlerinde önemli bir farklılık gözlenmemiştir. Bunun yanı sıra şekillerde plakasız olarak adlandırılan akım düzenleyicisiz senaryo, akım düzenleyicili senaryolar ile benzer debi değerlere sahiptir. Ancak akım hatlarında ve deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü üzere akım düzenleyici bulundurmeyen ekipman içerisinde önemli derecede akış bozulmaları görülmekte ve bu da suyun atmosfere atıldığında pulverize olmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.18 Özgün akım düzenleyici uzunluğunun debi üzerindeki etkisi

Şekil 4.19’da akım düzenleyici uzunluğunun debi üzerine etkisi, 8bar, 9bar ve 10bar giriş koşulları için farklı bir gösterimle sunulmuştur. Giriş basıncı yükseldikçe plaka uzunluğundan bağımsız olarak debinin her bir akım düzenleyici için hemen hemen lineer bir şekilde arttığı görülmüştür.



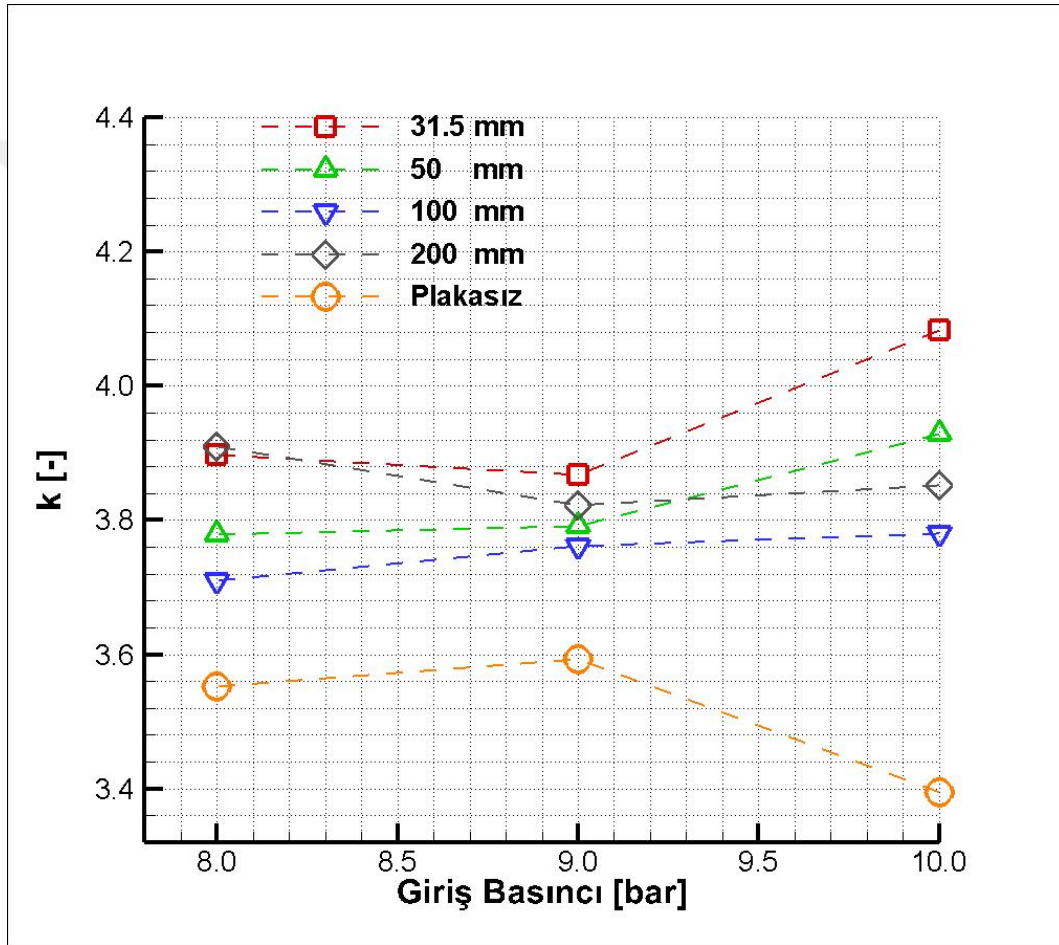
Şekil 4.19 Özgün akım düzenleyici uzunluğunun debi üzerindeki etkisi

Tablo 4.10’da farklı uzunluklardaki özgün akım düzenleyiciler için sayısal analizlerden elde edilen debi değerleri belirtilmiştir.

Tablo 4.10 Farklı uzunluklardaki özgün akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında debi açısından mukayesesi

Basınç (bar)	31.5mm (m³/h)	50mm (m³/h)	100mm (m³/h)	200mm (m³/h)	Plakasız (m³/h)
10	1215.27	1219.59	1221.76	1219.74	1215.41
9	1157.37	1158.63	1158.63	1157.48	1150.48
8	1090.46	1091.90	1093.70	1089.01	1089.77

Şekil 4.20’de özgün akım düzenleyici tasarımı için boyutsuz basınç kayıp katsayısını dikkate alarak farklı plaka uzunluğu senaryoları karşılaştırılmıştır. Bu şekle göre 100 mm plaka uzunluğu senaryosu, akım düzenleyicisiz (plakasız) su topu hariç tüm giriş basınçları için minimum boyutsuz basınç kayıp katsayısına sahiptir. Bununla birlikte, akım düzenleyici olmadığında minimum boyutsuz basınç kayıp katsayısı gözlemlenmiştir. Laminarizasyon için su topuna yerleştirilen akım düzenleyicilerin sürtünme yüzey alanının yüksek olması sebebiyle daha fazla basınç kaybına sebebiyet vermiş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.20 Özgün akım düzenleyici uzunluğunun boyutsuz basınç kayıp katsayısı üzerindeki etkisi

Tablo 4.11 içerisinde farklı uzunluklardaki özgün akım düzenleyiciler için sayısal analizlerden elde edilen boyutsuz basınç kayıp katsayısı değerleri belirtilmiştir.

Tablo 4.11 Farklı uzunluklardaki özgün akım düzenleyicilerin farklı giriş basınçlarında boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından karşılaştırılması

Basınç (bar)	31.5mm (k)	50mm (k)	100mm (k)	200mm (k)	Plakasız (k)
10	4.08	3.93	3.78	3.85	3.40
9	3.87	3.79	3.76	3.82	3.59
8	3.90	3.78	3.71	3.91	3.55

Bu tez çalışmasında, özgün bir akım düzenleyici yeni tasarlanmış bir su topu içerisine yerleştirilmiş ve hacimsel debi, suyu atma mesafesi ve akım hatlarının düzenlenmesi açısından performansı incelenmiştir. Bunu başarmak için öncelikle deneyler denizcilik klas kuruluşları olan Bureau Veritas (BV) ve Türk Loydu (TL) gözetiminde yapılmıştır. Daha sonra, zamana bağlı Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemlerini ayırklaştırmak için sonlu hacim yöntemine dayalı sayısal bir yaklaşım uygulanmış ve sayısal sonuçlar deneylerle doğrulanmıştır. Sayısal yöntem ağ yapısı ve zamansal olarak doğrulanmıştır. Doğrulamadan sonra, özgün akım düzenleyici, iki farklı uzunluktaki iki farklı akım düzenleyici ile sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Son olarak, sayısal çalışma, özgün akım düzenleyici üzerinde farklı uzunluklar için genişletilmiştir.

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- HAD sonuçları tüm giriş basınçlarında deneyden elde edilen debi miktarlarından bir miktar daha yüksek sonuçlar verse de iki yöntem arasındaki bağıl farklar tüm giriş basınçları için %2.90'ın altındadır. Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, sayısal modelin su topu içindeki akışı başarılı bir şekilde simüle edebildiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, deneyler zaman alıcı ve pahalı olduğundan, akım düzenleyici çalışmalarında kullanılan bu sayısal model deneylere iyi bir alternatif olabilir.
- Hem deneysel hem de sayısal çalışmalarda sınır koşulları için giriş basıncı arttıkça su topu debisinin arttığı açık bir şekilde görülmüştür.
- Deneysel çalışmalarda giriş basıncı arttıkça su topu debisine ek olarak su atma mesafesinin de arttığı görülmüştür.
- Akım düzenleyici bulunmayan su topunda su pulverize olup istenen atış mesafesini sağlayamazken, akım düzenleyici bulunduran su topu HYS sistemi klas kuralında belirtilen “su topu 1200m³/h debide suyu en az 120 metreye ulaştırmalıdır” kuralını [35, 36] sağlamıştır.

- Akım düzenleyiciler, akım düzenleyici tipi ve sınır koşullarından bağımsız olarak akışı net bir şekilde düzenlemektedir.
- Akım düzenleyicisiz su topu, farklı özgün akım düzenleyiciler ile kıyaslandığında en düşük debiyi (10 bar'da 1215,4 m³/s, 9 bar'da 1150,5 m³/s) sağlamaktadır.
- ISO 5167-3, Zanker ve Tube Bundle akım düzenleyicilerin kullanımını standart içerisinde ampirik formüllerle önermesine rağmen, 31.5mm kalınlıklı akım düzenleyiciler boyutsuz basınç kayıp katsayısı performansı bakımından mukayese edildiğinde, özgün akım düzenleyicili su topu tüm giriş basıncı koşullarında daha iyi sonuçlara sahiptir. Bu sonuca göre, literatürde standart olarak önerilen ve endüstride kullanılan pek çok akım düzenleyici tipi bulunmasına rağmen, akım düzenleyicilerin probleme ve kullanılacağı alana özgü tasarlanmasının daha iyi sonuçlar elde etmeye yardımcı olduğunu göstermektedir.
- Sayısal sonuçlar dikkatle incelendiğinde, sayısal analizlerin incelendiği koşullar için, giriş basıncının boyutsuz basınç kayıp katsayısı üzerindeki etkisi neredeyse ihmal edilebilir olduğundan, belirli bir akım düzenleyici tipi ve uzunluğu için boyutsuz basınç kayıp katsayısı sabit kabul edilebilir.
- Zanker'in boyutsuz basınç kayıp katsayısı değerleri en büyük iken diğer akım düzenleyicilerin sonuçları birbiri ile benzerdir. Tube Bundle boyutsuz basınç kayıp katsayısı sonuçları özgün akım düzenleyiciden 8bar ve 10bar için biraz daha düşük olmasına rağmen, diğer tüm durumlar için özgün akım düzenleyicinin sonuçları daha düşüktür. Böylece genel perspektifte özgün akım düzenleyici ve Tube Bundle akım düzenleyicinin boyutsuz basınç kayıp katsayısı açısından Zanker akım düzenleyicisine göre daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir.
- Debi mukayesesi söz konusu olduğunda, aynı giriş basıncı koşulları için özgün akım düzenleyici ve Tube Bundle, Zanker plakadan daha yüksek debiyi sağlamıştır.
- Farklı tipteki ve uzunluktaki akım düzenleyicilerin su topu üzerindeki performansını kıyaslamak için yapılan sayısal analiz çalışmalarının

sonucuna göre özetle, özgün akım düzenleyici tasarımı genel olarak debi göz önüne alındığında Zanker ve Tube Bundle akım düzenleyicilerinden daha iyi sonuçlara sahiptir.

- Sayısal analizlerden elde edilen boyutsuz basınç kayıp katsayısı ve debi sonuçlarına göre Zanker akım düzenleyici plaka HYS sistemlerinde akımı düzenlemek için uygun değildir.
- Akım düzenleyici uzunluğunun performansa olan etkilerini incelemek için özgün akım düzenleyici tasarımı 31.5mm, 50mm, 100mm, 200mm uzunluklu plakalı ve son olarak plakasız su topu için sayısal analizler yapılmıştır. Akım düzenleyici uzunluğunun debi üzerinde dikkate değer bir etkisi olmamasına rağmen, en yüksek debi değeri 100mm uzunluklu akım düzenleyici ile sağlanmıştır. Buna ek olarak 100mm uzunluğu tüm giriş basıncı koşulları için en düşük boyutsuz basınç kayıp katsayısını sağlamaktadır. Bu nedenle özgün akım düzenleyici için analiz edilen değerler arasında 100mm uzunluk en uygun uzunluk olarak görünmektedir.
- 100mm uzunluklu özgün akım düzenleyiciye sahip su topu boyutsuz basınç kayıp katsayısı ve debi açısından en uygun performansı sağlamanın yanı sıra kolay üretim, düşük ürün ağırlığı ve maliyet açısından 200mm kalınlığa göre daha etkilidir.
- Akım düzenleyici olmadığında minimum boyutsuz basınç kayıp katsayısı gözlemlenmiştir. Akımın düzenlenmesi için su topuna yerleştirilen akım düzenleyicilerin sürtünme yüzey alanının yüksek olması sebebiyle daha fazla basınç kaybına sebebiyet vermiş olabileceği düşünülmektedir.

Gemi üstü harici yangın söndürme sistemlerinin kullanımı çok önemlidir ve literatürde [64] bildirilen birçok ciddi yangın kazası olduğundan, bu sistemlerin ve ekipmanların sertifikasyon gereklilikleri yüksek standartta olup, sertifikasyon süreçleri sörveyörler tarafından hassasiyetle yürütülmektedir. Özgün akım düzenleyici sayesinde istenen teknik gereklilikleri sağlayan akım düzenleyicili su topu, denizcilik klas kuruluşları Bureau Veritas (BV) ve Türk Loydu (TL) tarafından marine tip onay sertifikası almaya uygun görülmüştür. Bu doktora tez

alışmasının sonucunda ortaya çıkan bu ürün bugüne kadar 100'n üzerinde ticari ve askeri gemide kullanılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda, özgün akım düzenleyicinin farklı akışkan çeşidindeki etkisi diğerk endüstriyel alanlara uygulanabilirliğini görmek için hem deneysel hem de sayısal olarak araştırılacaktır. Bunun yanında parametrik optimizasyon için literatürde [65] anlatıldığı gibi farklı optimizasyon yöntemleri de kullanılabilmektedir.



-
- [1] ISO, 2020. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full-Part 2: Orifice plates (EN ISO 5167-3). European Committee for Standardization, Technical Procedure.
 - [2] Brown, G. J., Griffith, B. W., 2013. A New Flow Conditioner for 4-Path Ultrasonic Flowmeters. Paris, France.
 - [3] Xiong, W., Kalkühler, K., Merzkirch, W., 2003. Velocity and turbulence measurements downstream of flow conditioners. *Flow Measurement and Instrumentation*, 14(6), 249–260. [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(03\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(03)00031-1)
 - [4] Laribi, B., Wauters, P., Aichouni, M., 2003. Comparative study of aerodynamic behaviour of three flow conditioners. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 48(1), 21–30.
 - [5] Laws, E. M., Ouazzane, A. K., 1995. A further study into the effect of length on the Zanker flow conditioner. *Flow Measurement and Instrumentation*, 6(3), 217–224. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(95\)00010-J](https://doi.org/10.1016/0955-5986(95)00010-J)
 - [6] Razali, A. H., Nordin, N., Sapit, A., Alias, Z. A., 2020. Flow through Various Porosity of Circle Grid Perforated Plate with Orifice Plate Flowmeter. *Journal of Complex Flow*, 2(1), 1-6.
 - [7] Chen, G., Liu, G., 2018. Performance Evaluation and Analysis of a New Flow Conditioner Based on CFD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394, 032049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/3/032049>
 - [8] Lahadi, M. H., Johari, A. M., Alias, Z. A., 2019. Effect of the Fractal-Grid Generated Turbulence on Turbulent Intensity and Pressure Drop in Pipe Flow. *Journal of Complex Flow*, 1(1), 5-10.
 - [9] Pramiyanti, Y., Seri, S. M., Sapit, A., 2020. Incompressible Turbulent Swirling Flow through Circle Grid Perforated Plate. *Journal of Complex Flow*, 2(1), 11-16.
 - [10] Zaryankin, A., Rogalev, N., Rogalev, A., Kocherova, A., Kurdiukova, G., 2016. New Flow Stabilizers as a Method to Improve the Reliability and Efficiency of Power Equipment. *Modern Applied Science*, 10(2), 172-184. <https://doi.org/10.5539/mas.v10n2p172>
 - [11] Yong Wan, Bo Wu, Jiamin Lu, 2021. Performance and application of an evaluation method for flow conditioner based on CFD. *Journal of Physics, MEIE* 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1983/1/012016>
 - [12] Huang Q W 2013 characteristics Simulation and Optimization on the flow field of U-channel ultrasonic flowmete with a flow conditioner Doctoral dissertation South China University of Technology.

- [13] Liu G X and Huang Q W 2012 Evaluation method of flow regulator's rectification effect based on CFD technology South China University of Technology Patent No.CN 201210249948.
- [14] Frattolillo A and Massarotti N 2002 Flow conditioners efficiency a comparison based on numerical approach[J]. Flow Measurement and Instrumentation 13(1) 1-11.
- [15] Askari, V., Nicolas, D., Edralin, M., Jang, C., 2019. Computational Fluid Dynamics Model for Sensitivity Analysis and Design of Flow Conditioners. Proceedings of the 9th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications, Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.5220/0007917401290140>
- [16] Bayazit, Y., Sparrow, E. M., Joseph, D. D., 2014. Perforated plates for fluid management: Plate geometry effects and flow regimes. International Journal of Thermal Science, 85, 104–111. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.002>
- [17] Çarpınlioğlu, M. Ö., Özahi, E., 2011. Laminar flow control via utilization of pipe entrance inserts (a comment on entrance length concept). Flow Measurement and Instrumentation, 22(3), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.01.005>
- [18] Liu, Q., Tian, S., Lin, Z., Zhu, Z., 2022. Effect of the convergence flow conditioner on rectifying eccentric jet flow induced by a ball valve. Flow Measurement and Instrumentation, 83, 102091. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102091>
- [19] Chen, W., Wu, J., Li, C., 2021. "The Investigation on the Flow Distortion Effect of Header to Guarantee the Measurement Accuracy of the Ultrasonic Gas Flowmeter", Applied Sciences, 11(8), 3656. <https://doi.org/10.3390/app11083656>
- [20] Berlamont J., (2015) "Friction Losses in Large-Diameter Pipes", J. Pipeline Syst. Eng. Prac., 2015.6, Technical note Ouazzane A. K., Benhadj R., (2002), "Flow conditioners design and their effects in reducing flow metering errors"Sensor Review, V.22, No 3, 223-231
- [21] H. Zhao, L. Peng, Member, IEEE, S. A. Stephne, H. Ishikawa, K. Shimizu and M. Takamoto, (2014), "CFD Aided Investigation of Multipath Ultrasonic Gas Flow Meter Performance Under Complex Flow Profile", IEEE Sensors Journal, Vol. 14, No.3, March 2014, ss. 897-907.
- [22] M. Aichouni, L. Kolsi, N. A. Messaoudenne and W. Aich, "Computational study of the performance of the Etoile flow conditioner", International Journal of Advanced and Applied Sciences, 3(9) 2016, Pages: 25-30.
- [23] A. K. Ouzzane, K. Zerzour, F. Marir and R. Benhadj, "The use of CAD System for Improving Flow Conditioner Design to Reduce Installation Effects On Orifice Metering", School of Informatics and Multimedia Technology University of North London, United Kingdom.

- [24] A. K. Ouazzane and R. Benhadj, "Flow Conditioners Design and Their Effects in Reducing Flow Meterin Errors", *Sensor Review*, Volume 22 – Number 3 (2002), pp. 223-231.
- [25] A. K. Ouzzane and M. Barigou, "A Comparative Study of Two Flowconditioners and Their Efficacy to Reduce Asymmetric Swirling Flow Effects on Orifice Meter Performance", *Insulation of Chemical Engineers Trans IChemE*, Vol 77, Part A, Nov. 1999.
- [26] B. Manshoor, F. Nicolleau, S. Beck, "The fractal flow conditioner for orifice plate flow meters", *Flow Measurement and Instrumentation* 22 (2011) 208–214.
- [27] N. F. M. Ali, A. R. A. M. I. A. Abdullah, 2019. "An Effect of Flow Conditioner on Accuracy of Fluid Flow Measurement", *Journal of Complex Flow*, Vol. 1 No. 1 (2019) p. 11-15.
- [28] M. H. Jeong, S. K. Kumares, M. Y. Kim and C. Kim, (2018), "A numerical study on the flow performance inside the straight pipe with perforated plates", *Journal of Mechanical Science and Technology* 32 (7) (2018) 3183-3189.
- [29] A. H. Hooman, "Çok Ölçekli/Fraktal Izgara Kaynaklı Akışın Yakın İz Bölgesinin Deneysel İncelenmesi", ODTÜ, Fen Bilimleri Enst., Doktora Tezi, Eylül 2018.
- [30] S. Malavasi, G. V. Messa, U. Fratino and A. Pagano, "On Cavitation Occurrence in Perforated Plates", *Flow Measurement and Instrumentation* 41 (2015) 129–139.
- [31] M. P. Saunders, 2001. "Effects of Flow Conditioning On Gas Measurement, American School of Gas Measurement Technology", Technical Report (2001) p. 96-101.
- [32] Hou, Y., Yang, X., Ren, F., Liu, Y., 2018. Structural Analysis and Optimization of Liquid Nitrogen Fire Monitor Based on FLUENT. 3rd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2018), Xi'an, China. <https://doi.org/10.2991/eame-18.2018.62>
- [33] Hu, G., Long, M., Liang, J., Li, W., 2012. "Analysis of jet characteristics and structural optimization of a liquamatic fire water monitor with self-swinging mechanism", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(5–8), 805–813. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3508-y>
- [34] Choudhury, A., Rodriguez, J., 2019. Flow Path Trajectory and Pressure Loss in a Water Monitor Design. *International Journal of Engineering and Manufacturing Science*, 9(2), 89–101.
- [35] Rules for the Classification of Steel Ships Part D Service Notations, Chapter 16, Section 3 Machinery and Systems, 2014. Bureau Veritas.

- [36] Türk Loydu, Harici Yangın Söndürme Sistemi Kuralı, Kısım 4 Makina Kuralları, Bölüm 18 – Yangından Korunma ve Yangın Söndürme Teçhizatı, Temmuz 2019.
- [37] Benim Haber, 2022, <https://benimhaber.wordpress.com/2012/11/16/meksika-korfezinde-petrol-platformunda-yanin-2-olu/> . accessed 1st December 2022.
- [38] T24, 2022. <https://t24.com.tr/haber/haydarpasa-dayanismasi-gar-ne-zaman-acilacak,917656> . accessed 1st December 2022.
- [39] NTV Türkiye, 2022, <https://www.ntv.com.tr/turkiye/galatasaray-universitesinde-yanin,2xH--HCdk0iT1ikECsP5yQ/> / accessed 1st December 2022.
- [40] Bilir, A. Ç., Doğrul, A., Coşgun, T., Yurtseven, A., Vardar, N., 2016. A numerical Investigation of the Flow in Water Jet Nozules. Journal of Thermal Engineering, 2(5), 907-912.
- [41] Versteeg, H. ve Malalasekera, W., (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Harlow, England; New York: Prentice Hall.
- [42] Uçar, G., (2005). Helikopter etrafındaki akışın sonlu hacimler yöntemiyle analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [43] Wilcox, D. C., (2006). Turbulence Modeling for CFD. La C nada, Calif.: D C W Industries.
- [44] Ali Doğrul, Gemi Direnci ve Serbest Yüzey Deformasyonlarının DeneySEL ve Sayısal Olarak İncelenmesi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2015.
- [45] Kınacı, Ö. K., (2013). Gemi formu, dümen ve pervane etkileşiminin sayısal incelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [46] Özdemir, Y. H., (2014). Gemi direncinin ve hareketlerinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak incelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [47] Michell, J. H., (1893). “XLIV. The highest waves in water,” Philos. Mag. Ser. 5, 36 (222): 430–437.
- [48] Tennekes, H. ve Lumley, J. L., (1972). A First Course in Turbulence. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- [49] Menter, F. R., 1993. Zonal Two Equation k-omega Turbulence Models for Aerodynamic Flows. 23rd AIAA Fluid Dynamics, Plasmadynamics and Lasers Conference, Orlando, Florida, USA. <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>
- [50] F. De Luca ve C. Pensa, “The Naples Systematic Series – Second part: Irregular waves, seakeeping in head sea”, Ocean Engineering, c. 194, s. 106620, Ara. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106620>

- [51] D. J. Taunton, D. A. Hudson, ve R. A. Shenoi, "Characteristics of a Series of High Speed Hard Chine Planing Hulls - Part II: Performance in Waves", Characteristics of a series of high speed hard chine planing hulls - part II: performance in waves. International Journal of Small Craft Technology, sy 153, ss. B1-B22, 2011.
- [52] T. Tezdogan, Y. K. Demirel, P. Kellett, M. Khorasanchi, A. Incecik, ve O. Turan, "Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming", Ocean Engineering, c. 97, ss. 186-206, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.01.011.
- [53] ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide.
- [54] Dogrul, A., 2022. Numerical Prediction of Scale Effects on The Propulsion Performance of JOUBERT BB2 Submarine. Brodogradnja, 73(2), 17–42. <https://doi.org/10.21278/brod73202>
- [55] Lijun, D., Meng, H., Qiangzhi, X., Zongjian, H., Baofu, J., Zhiming, W., Jianwen, H., 2021. Numerical analysis of valve structure of high power marine engine. Brodogradnja, 72(2), 115-126. <https://doi.org/10.21278/brod72207>
- [56] Menter, F. R., 1994. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA J., 32(8), 1598-1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [57] ITTC, 2014. 7.5-03-02-03 Practical Guidelines for Ship CFD Applications. ITTC - Recommended Procedures and Guidelines.
- [58] L. F. Richardson, "IX. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, c. 210, sy 459-470, ss. 307-357, Oca. 1911, doi: 10.1098/rsta.1911.0009.
- [59] Roache, P. J., 1998. Verification of Codes and Calculations. AIAA Journal, 36(5), 696–702. <https://doi.org/10.2514/2.457>
- [60] P. J. Roache, 1997. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 29, 123–160. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.29.1.123>
- [61] Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H. W., Paterson, E. G., 2001. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations—Part 1: Methodology and Procedures. Journal of Fluids Engineering, 123(4), 793–802. <https://doi.org/10.1115/1.1412235>
- [62] F. Stern, R. Wilson, ve J. Shao, "Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes", Int. J. Numer. Meth. Fluids, c. 50, sy 11, ss. 1335-1355, Nis. 2006, doi: 10.1002/fld.1090.
- [63] Çelik, I., Ghia, U., Roache, P., Fretias, C. J., Coleman, H., Raad, ve P. E., 2008. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to

Discretization in CFD Applications, Journal of Fluids Engineering, 130(7), 078001. <https://doi.org/10.1115/1.2960953>

- [64] Barlas, B., Ozsoysal, R., Bayraktarkatal, E., Ozsoysal, O. A., 2017. A study on the identification of fire hazards on board: a case study. Brodogradnja, 68(4), 71–87. <https://doi.org/10.21278/brod68405>
- [65] Rodríguez, C. G., Lamas, M. I., Rodríguez, J. D. D., Caccia, C., 2021. Analysis of the pre-injection configuration in a marine engine through several MCDM techniques. Brodogradnja, 72(4), 1-17. <https://doi.org/10.21278/brod72401>



TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. A. Ç. Bilir, A. Doğrul ve N. Vardar, “An extensive investigation of flow conditioners inside a Fi-Fi monitor”, Brodogradnja/Shipbuilding, Volume 73 Number 4, 2022. <http://dx.doi.org/10.21278/brod73408>

Bildiri

1. A. Ç. Bilir, A. Doğrul ve N. Vardar, “A comprehensive study on flow conditioner design working in a fi-fi monitor”, *19th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean IMAM 2022, September 26-29, 2022, Istanbul, Turkey.*