

Hidrolik Dağıtım Manifoltlarında Dirsek Geometrisinin Basınç Kayıp Etkisinin Hesaplanması

Yiğit BULUT
Önder Can DEMİR

ÖZET

Bu çalışmada, hidrolik dağıtım manifoldlarındaki dirsek geometrilerinde basınç düşüşleri incelenmiş ve model önerilmiştir. Çalışmanın amacı, hidrolik sistemlerin ön tasarımlarında ve 1-D modellemelerinde gerçekçi sonuçlar almayı sağlamak için, manifold imalatı sonucu ortaya çıkan geometrilerin parametrelerine bağlı olarak basınç kayıplarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak elde edilmesidir. Çalışmada, hidrolik manifoldların kullanım alanları özetlenmiş ve dirseklerde basınç kayıplarına dair temel bilgilendirmeler yapılmış ve parametreler belirlenmiştir. Ayrıca matematik model oluşturulmasına dair temel bilgilendirmeler yapılmıştır. Son olarak elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve basınç kayıplarının hesaplanabilmesi için oluşturulan matematiksel modele ait bilgiler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik Manifold, Yersel Kayıplar, Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD)

ABSTRACT

In this study, pressure losses in elbow geometries within hydraulic distribution manifolds are investigated, and a correlation for their estimation is proposed. The objective is to obtain pressure losses using Computational Fluid Dynamics (CFD), based on the geometric parameters resulting from the manufacturing of the manifold, in order to provide realistic results for preliminary hydraulic system designs and one-dimensional (1-D) modeling efforts. The study first summarizes the application areas of hydraulic manifolds and reviews previous research focusing on pressure losses in elbows. Subsequently, fundamental information regarding pressure losses in elbows is presented, and key parameters affecting the losses are identified. Basic considerations related to the formulation of the mathematical model are also provided. Finally, the obtained results are evaluated, and the mathematical model developed for predicting pressure losses is presented.

Key Words: Hydraulic Manifold, Local Loss, Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. GİRİŞ VE LİTERATÜR ÖZETİ

Hidrolik manifoldlar, tasarımı gerçekleştirilen sistem üzerinde yer alan ve belirli amaçlara hizmet etmek üzere sistemde yer alan valflerin bir arada bulunmasına olanak sağlamaktadırlar. Bir metal blok üzerine valflerin portlarına uygun şekilde gerçekleştirilen bir konstrüksiyon tasarımı ve gerekli diğer valflere bağlantıları içeren, blok içine gömülü bir tesisat ağı gibi işlev görmektedir.

Manifoltlar bu bağlamda hareket aktüatörlerinde yön valfleri ve basınç dengeleyici gruplar gibi temel ekipmanları gruplama işlevlerine de sahiptir. Gerek sağladığı kompaktlık gerek tüm hidrolik ağ için gerekli tesisatın sebep olacağı karışıklığı azaltması yönüyle hidrolik sistemlerin tasarımında önemli bir yere sahiptir.

Manifolt içi geometriler incelendiğinde, imalatı sırasında gerçekleştirilen delme işlemlerinin meydana getirdiği dirsek geometrilerine sahiptir. Manifolt içerisinde meydana gelecek basınç düşüşünün hesaplanması, sistem kapasitesinin belirlenmesinde, sistemin kurulacak dinamik modelinde manifold etkilerinin de hesap edilmesinde kullanılabilir. Tasarlanan sistem üzerinde daha fazla bilgi sahibi olunması, sistem performansı ve kontrolcü tasarımı açısından avantaj sağlamaktadır.

Literatürde benzer nitelikli deneysel ve nümerik araştırmalar yer almaktadır. Emil vd. çalışmalarında dirsek içindeki akış için nümerik simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında farklı Reynolds sayıları için bu simülasyonları yineleyerek minör kayıp katsayısını elde etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarında yüksek Reynolds değerleri için ön görülen 0,22 değerine yakın (0.2) değerini elde etmişlerdir [1]. Araştırmalarını gıda ve ilaç endüstrisi uygulamaları üzerine gerçekleştirmiş olan Mate vd., Newtonian olmayan akışkanlar üzerinde hidrodinamik kayıpların araştırmasını gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında R/D oranı 2 olan dirsek ve düz boru kayıp katsayıları için power-law viskozite temelli bir model üzerinde gerçekleştirdikleri nümerik çalışmayı deney ile doğrulamışlardır [2]. Tatiana vd. küçük su şebekelerinde uygulaması yaygın olarak görülen PVC dirseklerde kayıp katsayıları üzerine çalışmıştır. Çalışmada, 1/2" - 1 1/2" ölçü çap aralığında $1,3 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^4$ Reynoldsa sahip akışlar için incelemeler yapılmıştır. Çalışmada aynı zamanda 90 ve 45 derecelik dirsek geometrisi üzerinde de çalışılarak açının değişiminin de kayıp katsayısı üzerine etkisi incelenmiştir [3]. Wameedh vd. 90 derece köşeli dirseklerde 500-60000 Reynolds aralığında yerel kayıp katsayısı üzerine deneysel incelemelerde bulunmuştur. Gerçekleştirdiği deneylerde yerel kayıp katsayısının $Re=20000$ değerine kadar doğru orantılı olduğu, daha büyük değerlerde ise ters orantılı şekilde hızla azaldığını gözlemlemiştir [4]. Hilding, çalışmasında 4" çapında 90 derece boru bükümlerinde eğrilik yarıçapı 4'ten 90" değerine kadar olan numuneler için deneyler gerçekleştirmiştir. R/D oranı için 4 ve küçük değerler için uygun bir korelasyon türetilmiştir. Buna karşılık, daha yüksek değerlerde bir korelasyon geliştirilmesi için deneylerin yetersiz kaldığını görmüştür [5]. Barbara Zardin vd. hidrolik manifoldlar üzerine gerçekleştirdiği çalışmasında özellikle de genişleme ve daralma içeren dirsek geometrileri üzerinde yerel kayıp katsayılarını elde etmek için bir dizi nümerik ve deneysel incelemede bulunmuştur. Elde ettiği sonuçlarda deneysel sonuçlara göre CFD analizlerinde daha yüksek basınç kayıp katsayısı elde edildiği buna karşılık basınç kayıp eğiliminin doğru sonuçlar verdiğini raporlamıştır [6].

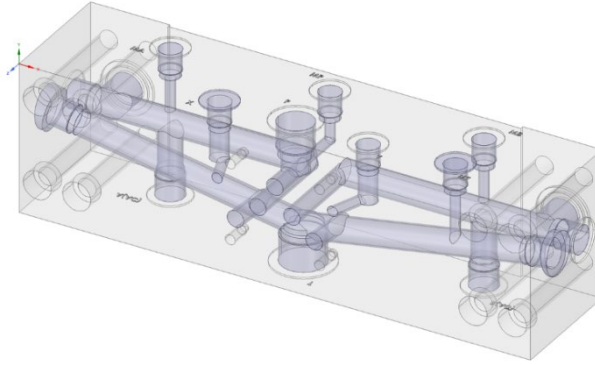
2. YERSEL KAYIPLAR

İç akış içeren boru vb. sistemlerde, akış hacmi içerisinde meydana gelen viskozite ve duvar pürüzlülüğü ile karakterize edilen sürtünme kayıpları mevcuttur. Bununla birlikte, sistemlerde kullanılan kısımlar, valfler, kıvrımlar ve dirsekler gibi tesisat elemanları ve konstrüktif yapılar sebebiyle meydana gelen kayıplar da mevcuttur. Bu fiziksel fenomen, yersel kayıp olarak adlandırılmaktadır [7].

Hidrolik uygulamalarda kullanılan hidrolik bağlantı parçaları, valf vb. ekipman üreticileri kataloglarında ekipman üzerinde meydana gelen basınç kaybının debi ile ilişkisini çoğu zaman bir grafik ile belirtmektedir. Kullanılan hortumlar, borular ve boru bükümleri için de kullanılmak üzere türetilmiş pek çok korelasyon mevcuttur. Buna karşılık farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmayan, çoğunlukla hidrolik uygulamalarında karşımıza çıkan manifold geometrisine ilişkin yaygın bir korelasyon bulunmamaktadır. Bu noktada, manifold imalatı gereği manifold bloklarının iç yapısında oluşan özel geometrilerin yersel kayıplarının tayini amacıyla çözüm üretmek, hidrolik sistem tasarımlarında daha yüksek hassasiyetli çalışmalar gerçekleştirilmesi için önem arz etmektedir.

3. İÇ AKIŞ VE PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Şekil 1’de örnek manifoldta ait 3 boyutlu tasarım görseli yer almaktadır. Boru içi akış değerlendirilecek olduğunda, meydana gelecek basınç kayıplarının akışkanın özellikleri olan, viskozite ve yoğunluğuna bağlı olduğu görülür. Bununla birlikte uygulamada meydana gelecek akış hızı ve hidrolik çapa bağlı bir biçimde değişmektedir. Dirsek geometrisi için ilgili parametreler belirlenecek olursa, manifold geometrilerinde meydana gelen eğimli birleşimler ve farklı çap değerlerinin birbirine bağlanması gibi konular da değerlendirilmelidir.



Şekil 1. Örnek Manifold Geometrisi

Tablo 1. Parametre Boyutları

Özellik	Boyut [SI]	Boyut [M, L, T]
ρ	kg/m ³	M.L ⁻³
μ	kg/m.s	M.L ⁻¹ .T ⁻¹
d	m	L
V	m/s	L/T
D	m	L
Θ	–	–

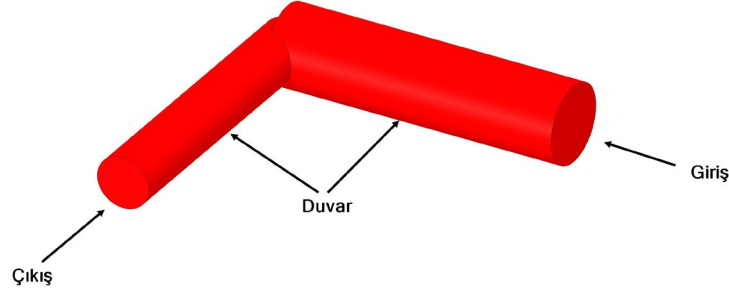
Tablo 1’de parametrelerin MLT boyut sistemindeki karşılıkları yer almaktadır. Parametre sayısının çokluğu, incelemelerde gerçekleştirilecek analizlerin sayısının artması dolayısıyla hesaplama maliyetlerinin yükselmesine sebep olmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için, boyutsuzlaştırma işlemi gerçekleştirilerek bağımsız parametre sayısının azaltılması sağlanacaktır. Bu işlem için Buckingham-Pi veya Ipsen metotlarından yararlanılabilmektedir. Gerekli uygulamanın yapılması ile bağımsız parametrelerin Reynolds Sayısı, çap oranları ve dirsek açısı olduğu tespit edilmiştir.

$$\Delta p = f(\text{Re}, d/D, \Theta) \quad (1)$$

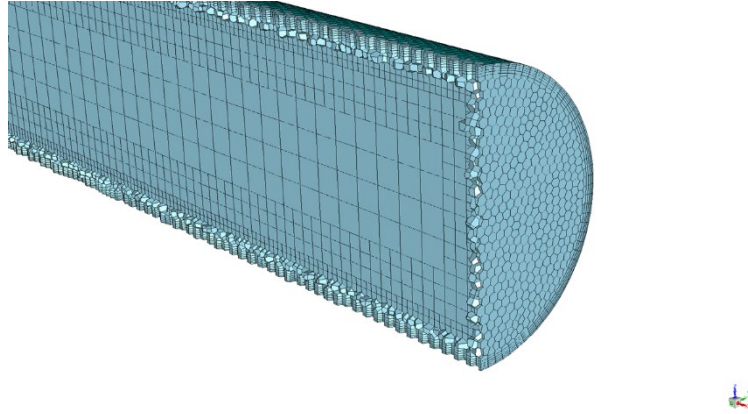
Bu kapsamda oluşturulacak nümerik analizler için deney tasarımlarında da sıklıkla kullanılan tam tarama metodu yapılması uygun görülmüştür [8] Bu metotta belirlenen bağımsız parametrelerin her değeri için tüm senaryoların uygulaması yapılmaktadır. Denklem 1’de uygulaması gerçekleştirilecek analizler için ön görülen parametreler raporlanmıştır.

4. MATEMATİKSEL MODELLEME

Şekil 2'de analizi gerçekleştirilecek geometriye ait bir 3 boyutlu akış hacmi görseli ve akış için şematik sınır koşulları belirtilmiştir.



Literatürde, polyhexcore mesh stratejisinin hesaplama maliyeti ve duvar kenarı akışlarda meydana gelen karmaşık hız profillerini çözümü açısından avantaj sağlayacağı raporlanmıştır. Bu sebeple, Çözüm işlemi için gerçekleştirilecek analizlerde çözüm ağı hacim elemanı olarak duvar yakınında polyhedral; serbest akış bölgesinde ise hegzahedral hacim elemanı tercih edilmiştir [9]. Şekil 3'te çözüm ağına dair görsel yer almaktadır.



Şekil 3. Çözüm Ağı

4.2 Kabuller ve Analiz

Sistem basınç alanındaki majör bir değişiklik beklenmemesi sebebiyle akışkanın basınç değişimine karşı vereceği hacimsel genişleme ya da sıkışmanın etkisinin ihmal edilebilir seviyede olacağı öngörülmüştür. Bu sebeple akış sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. 46 cSt yağ için gerçekleştirilen analizlerde akışkanın diğer özellikleri, endüstride yaygın olarak kullanım optimum değeri olarak ifade edilen 40 derece sıcaklık durumu için hesaplanan değerlerden elde edilmiştir. SST k-Omega türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde sistemde gerçekleşecek ısı değişimleri göz ardı edilmiştir. Analizde nümerik artık değerleri için Türbülans yayılımı, türbülans kinetik enerjisi, x, y,

z yönlerindeki hız değerleri ve kütle için 10^{-6} değeri sağlanana kadar işlemler sürdürülmüştür. Denklem (2-5) sırasıyla kütle için korunum, türbülanslı durum için genelleştirilmiş momentum korunumu ve türbülans modeli için kullanılan türbülans kinetik enerjisi ve dağılım hızı (ing.:rate) olarak ifade edilmektedir[9].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

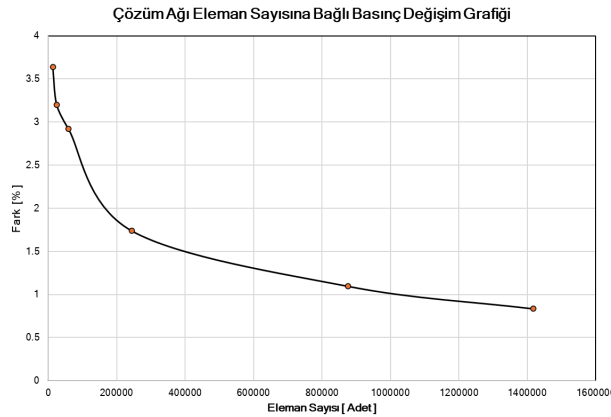
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \widetilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5)$$

4.3 Çözüm Ağından Bağımsızlaştırma

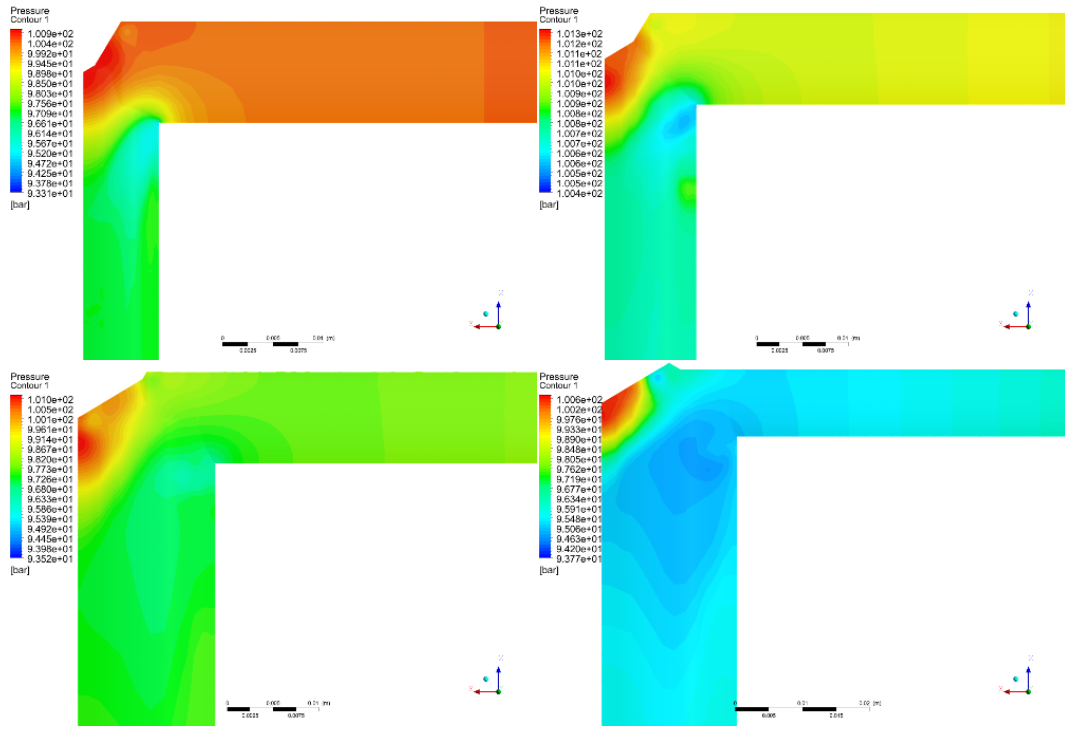
Nümerik analizlerde çözümün doğruluğu için, sonuçların hacim elemanı sayısından bağımsız hale getirilmesi gerekmektedir. Bu noktada farklı pek çok mesh bağımsızlaştırma metodu olmakla birlikte, literatürde sıklıkla kullanılan strateji ile bu işlem gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te görüldüğü üzere sonuçların değişiminin %2 değerinin altına indiği değer elde edilene kadar mesh sayısı ikiye katlanarak en uygun mesh sayısı elde edilmiştir.



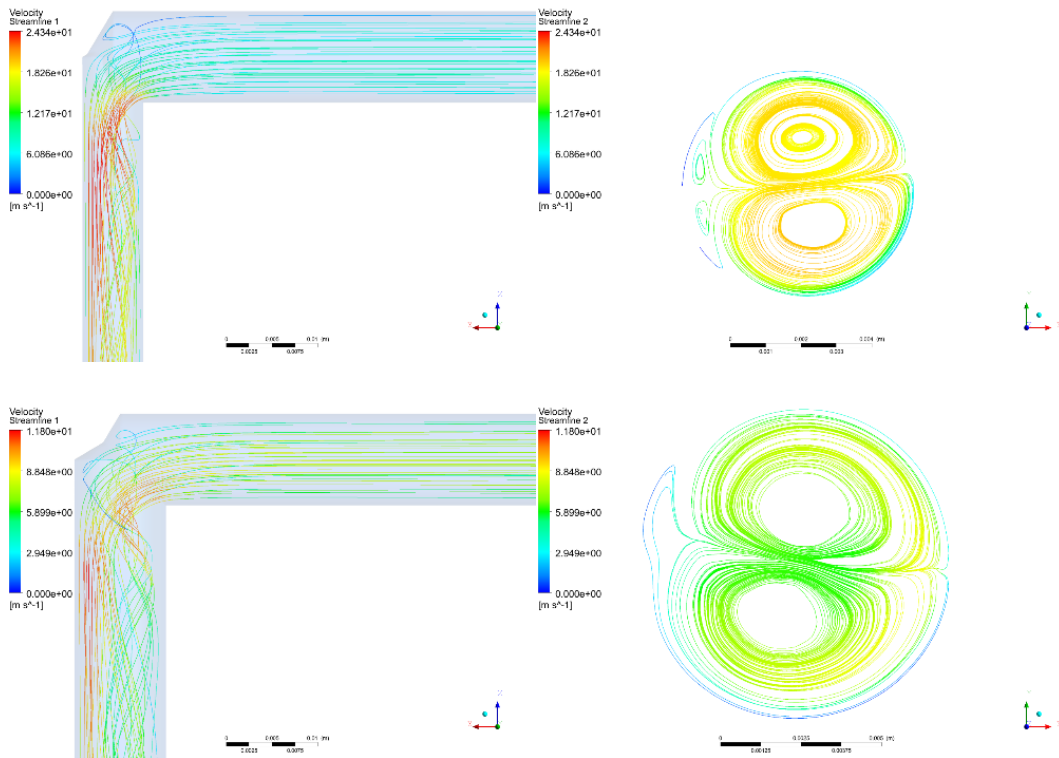
Şekil 4. Hacim elemanı sayısına göre sonuç değişimi

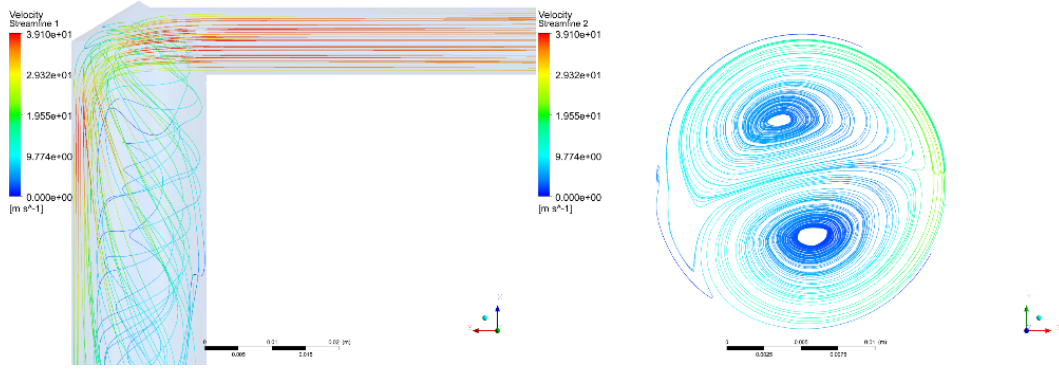
5. SONUÇ VE YORUMLAR

Şekil 5-6'da analiz sonuçlarında elde edilen basınç alanı, akış çizgisi gösterimleri bulunmaktadır. İç dirsek birleşim yerinde belirgin bir biçimde duvar kenarından merkeze kadar süren akış ayrılmaları olduğu görülmüştür. Bu durum, dirsek çıkışında görülen ters basınç gradientleri sebebiyle meydana gelmektedir. Akış ayrılması, daralma durumu ve kısılma durumları incelendiğinde Şekil 6'da görüldüğü üzere, akışın tekrar düzenli hale gelmesi için gerekli uzunluğun genişleme durumunda arttığı görülmüştür.



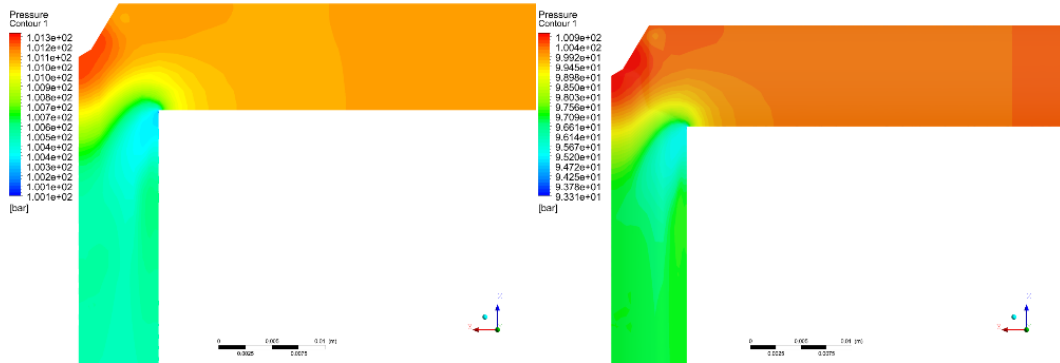
Şekil 5. Farklı d/D değerleri için basınç konturları



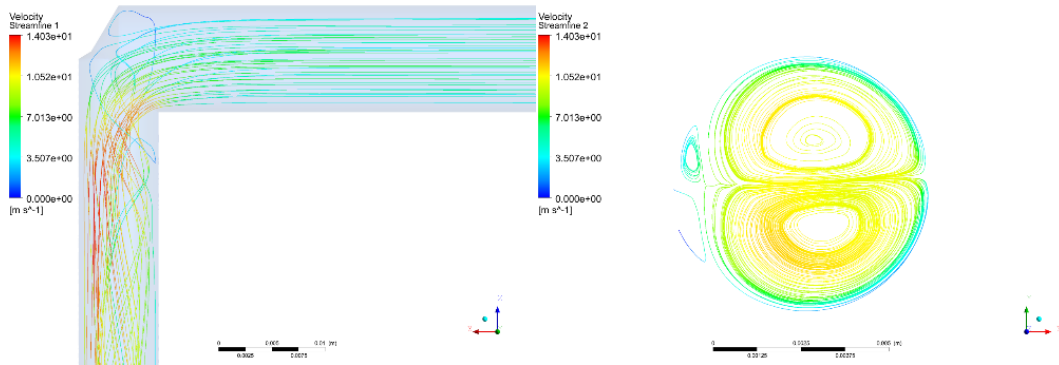


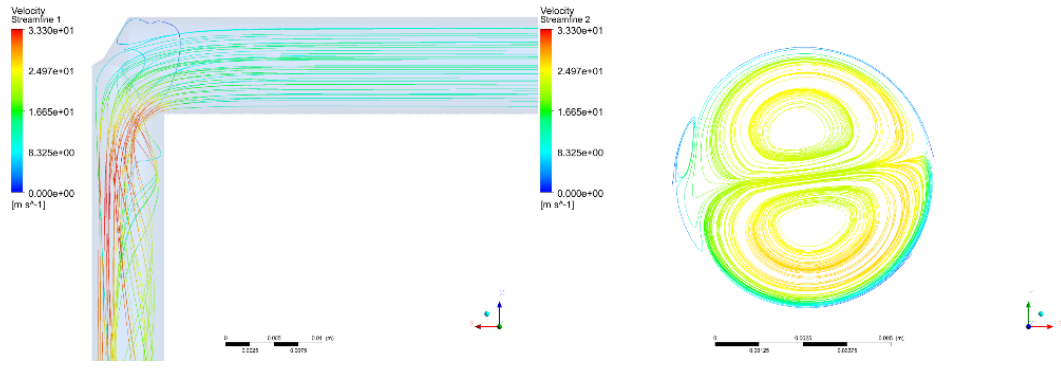
Şekil 6. Farklı d/D oranları için akış çizgisi görselleri

Farklı debi değerleri için, Şekil 7-8'de bulunan analizlerin sonuçları incelendiğinde ise, meydana gelen basınç kayıplarının debinin artışı ile artış trendinde olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca vorteks yapısı incelendiğinde ise, vorteks yapısının yüksek debili durumda daha yüksek hız gradiyentlerine sahip ve sıkı bir yapıda olduğu buna karşılık düşük debili simülasyon sonucunda ise daha geniş yayımlı bir girdap oluşumu görülmüştür.



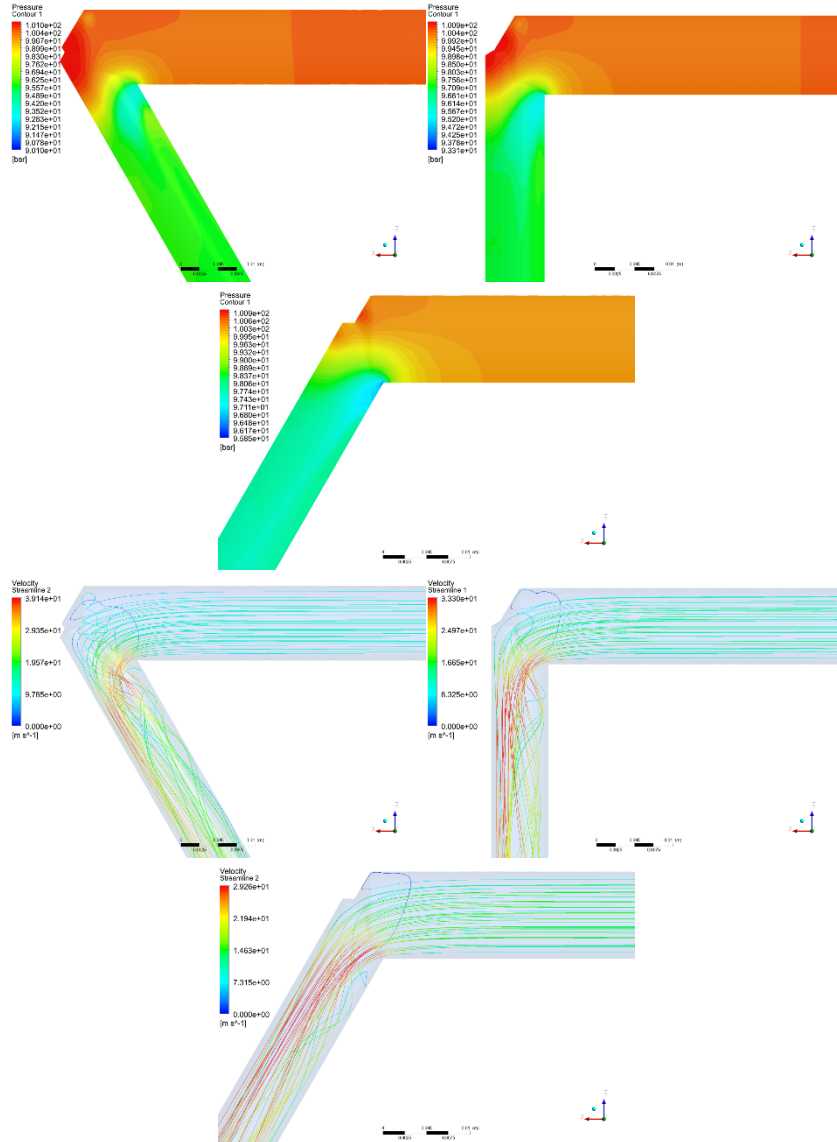
Şekil 7. Farklı debi değerleri için basınç konturları

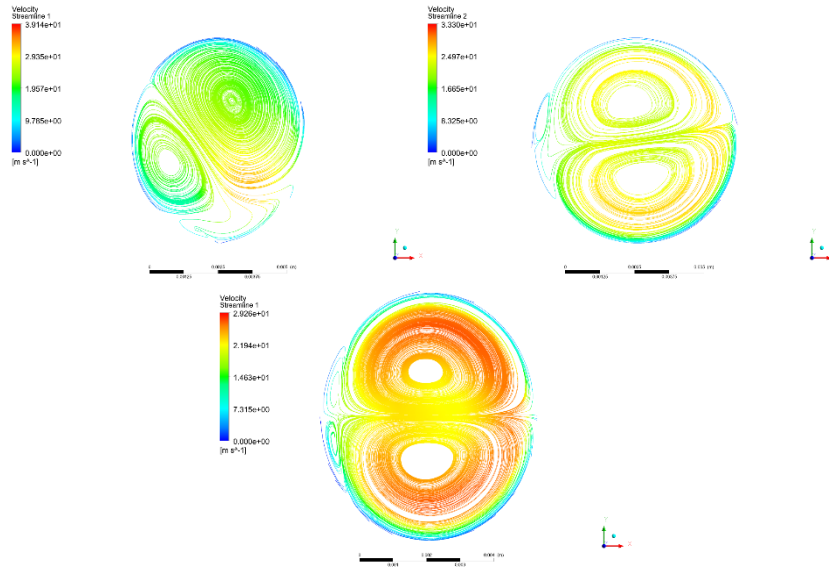




Şekil 8. Farklı debi değerleri için akış çizgisi görselleri

Farklı açı değerleri için elde edilen bazı görseller Şekil 9'da yer almaktadır. Yapılan incelemelerde açının artışı ile beraber akış düzensizliğinin azaldığı, ayrılma ve dönümlü akış karakteristiğinin azaldığı görülmektedir.



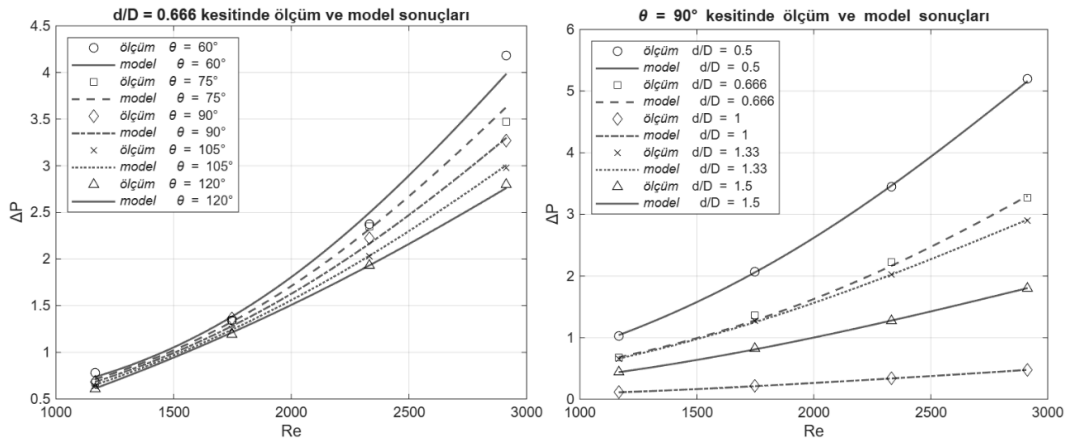


Şekil 9. Farklı açılar için basınç konturları ve akış çizgileri

Gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar bir araya getirilerek bir model oluşturma çalışması gerçekleştirilmiştir. Bağımsız parametreler olarak belirlenmiş olan çap oranı, Reynolds Sayısı ve büküm açısı değerlerini içerecek şekilde bir bağıntı geliştirilmesi için Matlab ortamından yararlanılmıştır. Bu noktada parametrelere bağlı değişimlerde lineer olmayan karakterde bağımlılıklar görülmüştür. Bu sebeple lineer yöntemler içerisinde seçilen Robustfit ve Doğrusal Olmayan Regresyon yöntemleri içerisinde Fitnlm kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar %28'e kadar oluşan bağıl hatalar ortaya çıkarmıştır. Elde edilen bu değerlerin kabul edilebilir değildir. Bu sebeple çalışmada doğrudan sonuca götüreceği bir 3 parametrelilik yerine, GPR (ing:Gaussian Process Regression) kullanılarak hesaplama modeli elde edilmeye çalışılmıştır. Bu model için elde edilen hata metrikleri Tablo 2'de raporlanmıştır.

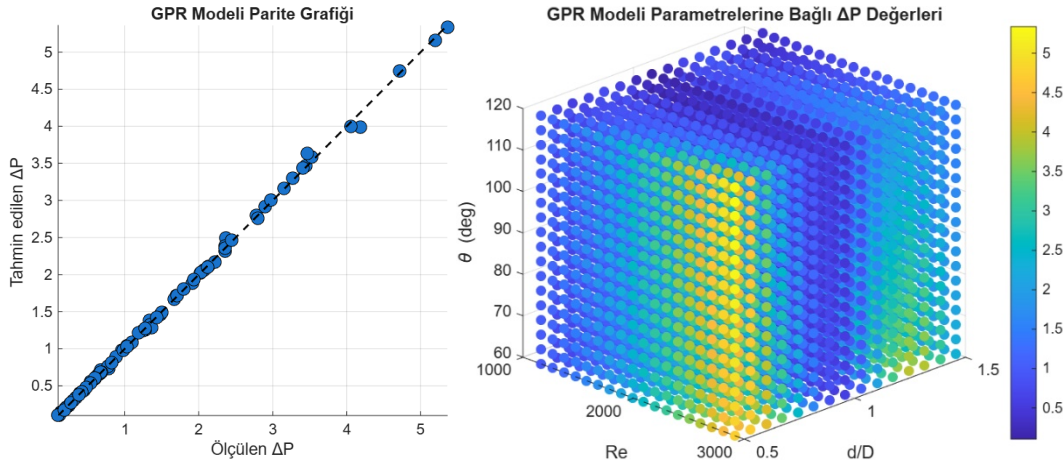
Tablo 2. Model Hata Metrik Sonuçları

Metot	Ortalama Bağıl Hata [%]	Maksimum Bağıl Hata [%]	RMSE	NRMSE
GPR	1.38	5.763	0.3711	0.00706



Şekil 10. Model Sonuçlarının Simülasyona Sonuçları ile Karşılaştırılması

Şekil 10 incelendiğinde modelin, açığa bağlı ve çap oranına bağlı bir biçimde model çıktılarının simülasyon ölçümleri ile uygunluğu görülmektedir. Şekil incelendiğinde çap oranı parametresinin tahmin edilebilirlik açısından daha yüksek zorluklara sebep olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 11'te yer alan parite grafiği incelendiğinde ise modelin tahminlerinin yüksek başarı sağlayabildiği görülmektedir.



Şekil 11. Model Sonuçları için Parite Grafiği ve Çıktıların Görselleştirilmesi

En nihayetinde hata metrikleri açısından incelendiğinde ise elde edilen maksimum bağıl hatanın %5,76 seviyelerine kadar düşürüldüğü ve toplam ölçüm aralığına göre normalize edilmiş ortalama kare hata ölçümü açısından da tatmin edici (0.00706) sonuçlar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] E. Smyk, M. Stopel, and M. Szyca, "Simulation of Flow and Pressure Loss in the Example of the Elbow," *Water (Switzerland)*, vol. 16, no. 13, Jul. 2024, doi: 10.3390/w16131875.
- [2] M. Bibok, P. Csizmadia, and S. Till, "Experimental and numerical investigation of the loss coefficient of a 90° pipe bend for power-law fluid," *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, vol. 64, no. 4, pp. 469–478, 2020, doi: 10.3311/PPch.14346.
- [3] T. M. Arteaga-Hernández, J. J. Villegas-León, and F. L. Acuña-Izquierdo, "Head losses and experimental loss coefficient in 45 and 90 elbows of PVC pipes with small diameters for single-phase flow and moderate Reynolds numbers," Jun. 10, 2024. doi: 10.20944/preprints202406.0560.v1.
- [4] W. T. M. Al-Tameemi and P. Ricco, "Pressure-Loss Coefficient of 90 deg Sharp-Angled Miter Elbows," *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 140, no. 6, Jun. 2018, doi: 10.1115/1.4038986.
- [5] Beij K Hilding, "PRESSURE LOSSES FOR FLUID FLOW IN 90° PIPE BENDS," *J Res Natl Bur Stand (1934)*, vol. 21, 1938.
- [6] B. Zardin, G. Cillo, C. A. Rinaldini, E. Mattarelli, and M. Borghi, "Pressure losses in hydraulic manifolds," *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 3, 2017, doi: 10.3390/en10030310.
- [7] White Frank, *Fluid Mechanics, Eighth Edition.*, vol. 1. McGraw-Hill Education, 2016.
- [8] Holman J P, *Experimental Methods for Engineers, Eight Edition.*, vol. 1. New York, NY 10020: McGraw-Hill, 2012.
- [9] O. C. Demir, B. Isik, E. Ozen, T. Bayram, and A. B. Olcay, "Air Entrainment in Hydraulic Oil: A Comprehensive Study of Influential Parameters Using Computational Fluid Dynamics and Artificial Neural Network," *J Fluids Eng*, vol. 147, no. 11, Nov. 2025, doi: 10.1115/1.4068619.

ÖZGEÇMİŞ

Yiğit BULUT

1998 İstanbul doğumludur. 2022 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2022 yılında beri Mert Teknik AŞ’de Test Sistemleri Mühendisi olarak çalışmaktadır. Bununla birlikte, 2023 yılından beri İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Anabilim Dalına bağlı Isı-Akışkan Yüksek Lisans Programında eğitimini sürdürmektedir.

Önder Can DEMİR

1999 yılı Samsun doğumludur. 2022 yılında Yeditepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2023 yılında Yeditepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başlamış olup, öğrenimine aktif olarak devam etmektedir. Aynı yıl Mert Teknik AŞ’de başladığı Ar-Ge Mühendisi görevini sürdürmekte olup, çalışma alanları arasında hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yer almaktadır.