

HİDROLİK SİSTEMLERDE YAĞ SICAKLIĞININ ORİFİS AKIŞ KATSAYISI (C_d) ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN NÜMERİK VE DENEYSEL İNCELENMESİ

Emre Can YILMAZ
Bekir YILDIZ

ÖZET

Hidrolik sistemlerde akış kontrolü, sistem performansını doğrudan etkileyen kritik unsurlar arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, orifis yapıları, akış alanında meydana getirdikleri değişim ile akış kontrolünün sağlanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Orifis tasarım sürecinde, nümerik parametrelerin yanı sıra “Deşarj Katsayısı (C_d)” olarak adlandırılan orifis yapılarının geçirgenliğini tanımlayan boyutsuz parametre de büyük önem arz etmektedir. Literatürde C_d değerinin belirlenmesine yönelik çeşitli çalışmalar mevcut olmakla birlikte, sıcaklık değişiminin C_d üzerindeki etkisi sınırlı düzeyde ele alınmıştır.

Bu çalışmada, akış sıcaklığının C_d değerine etkisini incelemek amacıyla -30°C ile 0°C sıcaklık aralığında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. ISO 4411 standardı referans alınarak elde edilen deneysel veriler, üç boyutlu akış analizleri ile karşılaştırılmış ve doğrulama süreci tamamlanmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, C_d değerini akış ve geometrik özelliklerinin dahil edildiği bir formalizasyon geliştirilmiş ve bu modelin farklı orifis konfigürasyonları ile gelecekteki çalışmalara referans teşkil etmesi amaçlanmıştır.

Çalışma sonuçları, orifis tasarımında sıcaklığın kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kapsamda elde edilen bulgular, hidrolik sistem tasarım süreçlerinde daha gerçekçi hesaplamaların yapılmasına katkı sağlarken, hidrolik ekipmanların performans optimizasyonu açısından da önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Orifis, Deşarj katsayısı, Sıcaklık, Viskozite, Hidrolik sistemler.

ABSTRACT

Flow control in hydraulic systems is among the critical factors that directly affect system performance. In this context, orifice structures are widely used to achieve flow control by inducing changes in the flow field. In the orifice design process, in addition to numerical parameters, the dimensionless parameter known as the “Discharge Coefficient (C_d),” which defines the permeability of orifice structures, is also of great importance. Although there are various studies in the literature aimed at determining C_d values, the effect of temperature variation on C_d has been addressed to a limited extent.

In this study, experimental investigations were conducted within a temperature range of -30°C to 0°C to examine the effect of flow temperature on C_d values. Experimental data obtained with reference to the ISO 4411 standard were compared with three-dimensional flow analyses, completing the validation process. Based on the findings, a formalization incorporating the flow and geometric characteristics affecting C_d was developed, with the aim of serving as a reference for

future studies involving different orifice configurations.

The results of the study reveal that temperature is a critical parameter in orifice design. In this context, the findings contribute to enabling more realistic calculations in hydraulic system design processes and also serve as an important reference for optimizing the performance of hydraulic equipment.

Key Words: Orifice, Discharge coefficient, Temperature, Viscosity, Hydraulic systems.

1. GİRİŞ

Orifisler, hidrolik sistemlerde hem debi sınırlama hem de basınç düşürme amacıyla yaygın biçimde kullanılan basit geometri akış elemanlarıdır. Akışkanın bu dar geometri içerisinde geçişi sırasında yaşanan hızlanma ve basınç düşüşü, sistemin davranışını doğrudan etkileyen hidrolik parametreleri kritik hale getirir. Bu parametrelerden biri olan deşarj katsayısı (C_d), gerçek debinin teorik debiye oranını temsil eder ve sistem tasarımında önemli bir rol oynar. C_d 'nin sabit kabul edilerek yapıldığı mühendislik analizleri ise özellikle düşük sıcaklık ve yüksek viskozite gibi sınır koşullarında önemli hatalara yol açabilir.

C_d değeri şu şekilde hesaplanabilir [1] :

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad 1$$

Burada:

- Q : Akış hacimsel debisi (m^3/s),
- C_d : Deşarj katsayısı (-),
- A : Akış alanı (m^2),
- ΔP : Basınç kaybı (Pa),
- ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m^3).

C_d katsayısı literatür formüllerine göre [2] akış ve geometrik özelliklere bağlı olarak belirli bir değere yakınsamaktadır. Negatif sıcaklıklarda ($<0^\circ C$), yağın viskozitesinde meydana gelen artışlar, C_d üzerinde doğrudan etkili olduğu ve teorik olarak bulunan değere yakınsamadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle sıcaklık ile viskozite arasındaki ilişki, C_d 'yi dolaylı olarak değil doğrudan belirleyen önemli bir etkidir. Buna karşın literatürde, orifis deşarj katsayısının sıcaklık bağımlılığını deneysel olarak inceleyen kapsamlı çalışmalar oldukça sınırlıdır. Özellikle düşük sıcaklıklarda yapılan testlere dayalı nümerik model geliştirmeleri oldukça nadirdir.

Hobbs ve Humphreys [3], orifis plakasının kenar geometrisinin debi katsayısına etkisini deneysel olarak incelemiştir. NEL (National Engineering Laboratory) tesisinde, 300 mm çaplı büyük bir hava akışlı kalibrasyon hattında yapılan çalışmada, farklı kenar yarıçaplarına sahip plakalar kullanılmıştır. Özellikle kenar yuvarlatma oranı 0.0004 D'den büyük olduğunda C_d değerinin belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Çalışmanın hata analizi de sunulmuş ve $\pm 0.5\%$ mertebesinde ölçüm hassasiyetine ulaşılmıştır. Sonuçlar, özellikle büyük çaplı orifislerin imalat toleranslarında daha esnek olunabileceğine işaret etmektedir.

Marani ve arkadaşları [4], hidrolik yağlarda orifis akışının doyum (saturation) ve kaviteasyon davranışını detaylı olarak araştırmıştır. ISO 4411 standardına uygun şekilde tasarlanan bir test düzeneğinde 5 farklı orifis çapı (0.5–1.72 mm), 3 sıcaklık seviyesi (30 °C, 40 °C, 60–80 °C) ve 5 farklı giriş basıncı (100–300 bar) için tam faktöriyel bir deney tasarımı uygulanmıştır. Testlerde ISO VG 46 hidrolik yağ kullanmışlardır ve akışkanın sıcaklığa bağlı viskozitesi 552.5 cSt (0 °C'de) ile 6.83 cSt (100 °C'de) arasında değişmektedir. Testlerde kritik kaviteasyon indeksi (C_{IC2} , C_{IC5}) hesaplanmış ve

sıcaklık arttıkça C_{IC2} eğrilerinin yukarı doğru yatay olarak kaydığı, sıcaklık değişiminin indeks üzerinde $\pm 4.8\%$ standart sapma ile etkili olduğu gösterilmiştir. Ayrıca daha hassas bir indeks olan $CIC5$ 'in $\pm 2.0-2.6\%$ hata ile daha kararlı tahmin sağladığı belirtilmiştir. Bu sonuçlar, uzun orifislerde ($L/D > 1.5$) sıcaklığın ve viskozitenin kaviteasyon davranışını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur.

Benhamadouche ve arkadaşları [5], kare kenarlı orifis plakasından geçen akışı yüksek çözünürlüklü Wall-Resolved LES (Large Eddy Simulation) yöntemiyle incelemiştir. Reynolds sayısı 25,000 olarak belirlenmiş ve su kullanılan bir akış sisteminde yapılan LES simülasyonu 53 milyon hücreli duvar çözünürlüklü mesh ($y^+ < 1$) ile gerçekleştirilmiştir. Dinamik Smagorinsky SGS modeli uygulanmış ve sonuçlar deneysel PIV verileri ve ISO 5167-2 standardı ile karşılaştırılmıştır. C_d değeri 0.632 olarak bulunmuş, ISO değeri olan 0.628 ± 0.005 aralığıyla uyum göstermiştir. Basınç kaybı katsayısı da 8.64 ile ISO'nun 8.71 ± 0.07 değerine yakın çıkmıştır. Çalışma, CFD'nin standart dışı boru bağlantıları veya akış koşulları için güvenilir C_d tahmini sağlayabileceğini vurgulamaktadır.

Abd ve arkadaşları [6], farklı orifis çap oranlarının (β) ve Reynolds sayılarının debi katsayısı ve basınç kaybı üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada, PVC boru hattına entegre edilen 30 basınç ölçüm noktası içeren bir sistem kullanılmış, bevel açılı (30°) akrilik orifis plakalar ($\beta=0.5, 0.6, 0.65, 0.75, 0.85$) test edilmiştir. Çalışmada renkli su kullanılarak 3100-18600 arası Reynolds sayılarında akış karakteristikleri ölçülmüştür. Sonuçlar laminer akışta C_d 'nin arttığını, $Re > 9000$ seviyesinde türbülanslı rejimde sabitlendiğini göstermiştir. Deneysel C_d değerleri, Swamee'nin korelasyon denklemleriyle $\%8.5$ ortalama mutlak hata içinde uyumlu bulunmuştur. Ayrıca statik duvar basıncı profilleri boyunca akışın recirculation etkileri ve minimum basınç bölgeleri de detaylı şekilde haritalanmıştır.

Wu, Burton ve Schoenau [7], Reynolds sayısına bağlı olarak değişen C_d değerinin ampirik bir modelini geliştirmiştir. Çalışmada, düşük Re 'de laminer akışta C_d 'nin Re 'nin kareköküyle orantılı olarak arttığı, yüksek Re 'de sabitlendiği göz önüne alınarak iki bölge bir ampirik denklem önerilmiştir. Model parametreleri laboratuvar verilerinden elde edilmiş ve tipik spool valf ve needle valf orifislerinde test edilmiştir. Model, laminer-türbülans geçişindeki C_d değişimini $\pm 2\%$ hata ile yakalayabilmekte ve simülasyonlarda iterasyon ihtiyacını azaltan kapalı formda bir çözüm sağlamaktadır.

Oliveira ve arkadaşları [8], orifis metrelerin kalibrasyon katsayısının (C) CFD yoluyla tahminini hedeflemiştir. Çalışmada, ANSYS Fluent kullanılarak su akışı altında $\beta=0.10-0.60$ aralığında, $Re=4 \times 10^3-1 \times 10^6$ aralığında simülasyonlar yapılmıştır. Kullanılan mesh yapısı $\sim 105,000$ hücre içermekte, RSM türbülans modeliyle çözüm elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları, UFU Kimya Mühendisliği Fakültesi'nde yapılan deneylerle karşılaştırılmış ve iyi bir uyum gösterdiği doğrulanmıştır. Ayrıca basınç tapa yerleşiminin kalibrasyon katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiş ve basınç tapası konumu değişikçe kalibrasyon katsayısı olan C değerinin $0.55-0.90$ aralığında değiştiği bulunmuştur. Çalışma, CFD'nin deneysel kalibrasyon gereksinimini azaltacak güvenilir bir alternatif sunduğunu ortaya koymuştur.

Tukiman ve arkadaşları [9], orifis plakası içerisindeki akışın CFD simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Çalışmada, 5 mm çaplı ve 2 mm kalınlıklı orifis, 12.3 mm çaplı bir boru hattına yerleştirilmiş ve girişte 0.38 m/s hızda su akışı sağlanmıştır. Yaklaşık 740,000 elementli mesh ve $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarında akışın vena-contracta bölgesi, recirculation bölgeleri, basınç profilleri detaylıca incelenmiş ve deneysel verilerle uyumlu olduğu gösterilmiştir. Ayrıca simülasyonlar sırasında y^+ değerinin < 5 tutulduğu ve çözüm yakınsama kriterinin 10^{-5} seviyesine getirildiği belirtilmiştir.

Yukarıdaki çalışmaların çoğunda test koşulları ortam sıcaklığı gibi sabit sıcaklıklar altında yürütülmüş; dolayısıyla negatif sıcaklık koşullarının C_d üzerindeki etkisini doğrudan modelleyen ampirik veya yarı-ampirik korelasyonlara rastlanmamaktadır. Bu bağlamda yapılan çalışmamız, negatif sıcaklıklarda test edilebilen bir düzeneğin kurulmasıyla, geniş sıcaklık ve viskozite aralığında C_d 'nin değişimini deneysel olarak ölçen nadir çalışmalardan biridir.

Bu çalışmada, ISO 4411 standardına uygun olarak giriş hattında $5x D_{orifis}$, çıkış hattında $10x D_{orifis}$ düz boru mesafeleri sağlanmış, ($L/D > 1$) orifis geometrisi kullanılmıştır. Orifis uzunluğu sabit tutularak çap

değiştirilmiştir. Bu sayede farklı L/D oranı incelenmesi çalışma içerisine dahil edilmiştir. Testler sırasında sıcaklık, basınç ve debi parametreleri eş zamanlı olarak kaydedilmiştir.

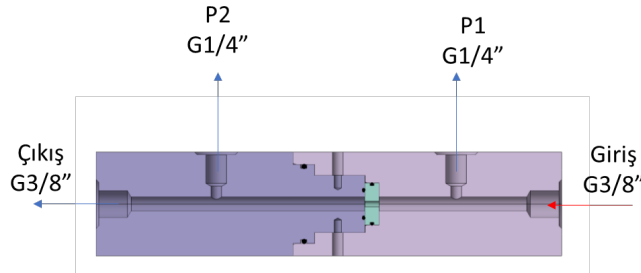
Bu bağlamda çalışma, mevcut literatürdeki boşluğu doldurmak üzere düşük sıcaklıklarda hidrolik akışkanların davranışını gerçekçi koşullar altında analiz etmekte ve yeni bir sıcaklık-düzeltilmeli C_d korelasyonu için başlangıç çalışmalarını sunmaktadır.

2. TEST EKİPMANLARI

Test sistemi; bir hidrolik yağ rezervuarı, bir tahrik silindiri ve bu silindire entegre edilmiş bir test bloğundan oluşmaktadır. Sistemde, hidrolik akış test bloğundan geçirilerek farklı orifis çapları ve sıcaklık koşulları altında basınç kayıpları ölçülmektedir. Gerçek zamanlı olarak anlık debi, sıcaklık, giriş ve çıkış basınçları sensörler aracılığıyla okunmakta ve bu veriler dijital veri toplama sistemi üzerinden kaydedilmektedir. Böylece, test senaryoları altında sistemin akış davranışı yüksek hassasiyetle analiz edilebilmektedir.

2.1 Test Bloğu

ISO 4411 standardına uygun olarak tasarlanmış olan hidrolik test bloğu (Şekil 1), sistem içerisindeki basınç düşüşlerinin hassas şekilde ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Test bloğu iki ana gövdeden oluşmakta olup, içerisinde değiştirilebilir orifis bileşeni barındırmaktadır.



Şekil 1. Hidrolik test bloğu kesit görünümü

Test bloğunda basınç ölçüm noktaları, standartlara uygun şekilde, girişten 5D ve çıkıştan 10D uzaklıklarda yer almaktadır. Bu yerleşim sayesinde, akışın gelişmiş hale geldiği bölgelerden ölçüm alınarak, ölçüm doğruluğu ve tekrar edilebilirlik artırılmıştır.

Testlerde kullanılan orifis bileşenleri, sabit uzunlukta ($L = 8$ mm) tasarlanmış olup, farklı çaplara sahip olacak şekilde değiştirilebilir formdadır. Bu sayede L/D oranı yalnızca orifis çapına bağlı olarak değiştirilmiş ve her bir çap için akış karakteristikleri ayrı ayrı değerlendirilebilmiştir. İlk aşamada test edilen çaplar şu şekildedir:

- 2.0 mm
- 2.5 mm
- 3.0 mm

Bu farklı çaplara sahip orifisler, hidrolik sistemdeki basınç kayıplarının ve akış davranışlarının sıcaklıkla birlikte nasıl değiştiğini incelemek amacıyla kullanılmıştır. Özellikle düşük sıcaklıklarda bu orifislerin debi katsayısı (C_d) üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve sistem performansı analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, yapılan yapılan gelecekteki sistem tasarımlarına ve düşük sıcaklık senaryolarına yönelik iyileştirme çalışmalarına temel teşkil etmektedir.

2.2. Test Rig Tanıtımı

Test sistemi, düşük sıcaklık koşullarında hidrolik akış karakteristiklerini analiz edebilmek amacıyla özel olarak tasarlanmış bir test düzeneğine sahiptir. Bu yapı, üç ana bileşenden oluşmaktadır:

- Akışkan şartlandırma ünitesi [10]
- Ek cidara sahip özel tasarım bir rezervuar [11]
- Doğrusal tahrik ile çalışan bir aktarım sistemi [12]

Bu bileşenler birlikte çalışarak, MIL-PRF-83282 tipi havacılık sınıfı hidrolik yağın -30 °C'ye kadar şartlandırılmasını sağlamaktadır. Akışkan, şartlandırma ünitesinden geçip test bloğuna ulaşana kadar belirli ölçüde ısı açığa çıkarsa da sistem genel olarak negatif sıcaklık koşullarında test yapabilmeye kabiliyetine sahiptir. Test rigi, maksimum 250 bar çalışma basıncına dayanacak şekilde yapılandırılmıştır.

Sisteme entegre edilmiş olan dijital veri toplama ve kayıt sistemi, test süresince, akışkanın anlık sıcaklığını, giriş ve çıkış basınçlarını, hacimsel debi değerlerini 10 Hz. örnekleme hassasiyetiyle eş zamanlı olarak izlemekte ve kayıt altına almaktadır. Bu sayede test senaryoları altında elde edilen veriler, sistemin düşük sıcaklıktaki performansını ve kararlılığını değerlendirmek açısından güvenilir ve karşılaştırılabilir bir temel oluşturmaktadır.

3. TEST YÖNTEMİ

Test sürecinde, ölçüm yapılacak ekipman test bloğuna entegre edilmiş ve giriş/çıkış hidrolik portları sistem hatlarına bağlanmıştır. Akışkan olarak kullanılan MIL-PRF-83282 tipi hidrolik yağ, daha önceden şartlandırılmış negatif sıcaklık değerlerine ulaştırılmış ve test öncesi sistemin termal dengeye ulaşması amacıyla yaklaşık 20 L/dk debi ile belirli bir süre boyunca kapalı çevrim sağlanmıştır.

Termal denge sağlandıktan sonra, giriş debi değeri kontrollü olarak değiştirilmiş ve belirlenmiş debi değerleri altında test gerçekleştirilmiştir. Debi değerleri, orifis geçirgenliği hakkında yapılan tahminler üzerinden oluşturulmuş ve toplamda test sisteminin sınırları içerisinde belirli aralıklar ile incelemiştir, belirlenen değerler sonuçlar bölümünde mevcuttur.

Testlerde toplanan veriler, ölçüm sisteminde oluşabilecek parazitlerin etkisini azaltmak ve eğilimleri netleştirmek amacıyla low-pass (band) filtreleme yöntemi ile işlenmiştir. Filtrelenen veri setinden, analiz için kullanılacak karakteristik noktalar seçilerek nihai değerlendirmeye alınmıştır.

Bu yöntemle, düşük sıcaklık koşullarında farklı debi değerleri altındaki hidrolik davranış detaylı şekilde analiz edilerek, orifis geometrisinin ve akışkan koşullarının sistem üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

4. SAYISAL ANALİZ YÖNTEMİ

Sayısal analizlerde Ansys Fluent yazılımı kullanılmıştır. Oluşturulan akış hacmi, tam silindirik geometri yerine 1/6 oranında bölünerek periyodik bir sınır koşulu tanımlanmıştır. Bu sayede hem hesaplama maliyeti azaltılmıştır.

Ağ yapısında orifis çevresine yönelik bölgesel iyileştirmeler uygulanmış; böylece incelenen geometrilerde daha hassas sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Ağ bağımsızlık çalışmaları sonucunda, optimum çözüm-zaman dengesi için %5 hata sınırında sonuca yakınsayan ağ yapısı tercih edilmiştir.

Sınır tabaka modellemesi için, ilk katman yüksekliği, hedef y^+ değeri (yaklaşık $y^+ = 1$) esas alınarak aşağıdaki formül [13] ile hesaplanmıştır:

$$y_1 = \frac{y^+ \cdot u_T}{v} \quad 3$$

$$u_T = \sqrt{\frac{T_w}{\rho}} \quad 4$$

Burada v kinematik viskozite, u_T sürtünme hızı, T_w kesme gerilimi olarak tanımlanmıştır. Toplam sınır tabaka kalınlığı ise klasik log-kanal tabaka teorisine uygun olarak aşağıdaki ifadeyle hesaplanmıştır:

$$\delta = 0.382 \cdot \frac{D}{Re^{1/5}} \quad 5$$

Bu bağıntı ile düşük Reynolds sayılarında gelişen laminer türbülanslı tabaka yapısına uygun bir kalınlık belirlenmiştir [13].

Analizlerde k- ω SST türbülans modeli kullanılmış olup, model sabitleri aşağıdaki gibi atanmıştır:

- $A^*_\infty = 1$
- $A_\infty = 0.52$
- $\beta^*_\infty = 0.09$
- $\alpha_1 = 0.31$
- $\sigma_{i-i} = 0.075$
- $\sigma_{i-o} = 0.0828$

Giriş sınır koşullarında sistemde kullanılan yağın sıcaklığı ve giriş basıncı tanımlanmış, çıkışta ise çıkış basıncı ve sıcaklık değeri girilmiştir. Bu koşullarda sabit debi değil, basınç farkı ile ilişkili akış gelişimi modellenmiştir.

Test akışkanı olan MIL-PRF-83282 tipi havacılık hidrolik yağının yoğunluk, dinamik viskozite, özgül ısı ve ısı iletkenlik gibi özellikleri [14], sıcaklıkla değişkenlik gösterdiği için piecewise linear yaklaşımıyla tanımlanmıştır. Bu sayede gerçek sıcaklık dağılımı altındaki davranışı yüksek doğrulukla temsil edilmiştir.

Yakınsama koşullarında tüm denklemlerdeki residual yakınsama değerleri 10^{-6} olacak şekilde sınırlandırılmış; ayrıca giriş ve çıkıştaki hacimsel debi farkı da yakınsama değerleri 10^{-6} hata sınırı ile kontrol edilerek kütle korunumu sağlanmıştır.

5. SONUÇLAR

Yapılan testlerde belirli bir hedef debi değerleri belirlenmiş fakat bu değerlerde yapılmak üzere başlanan testlerde başlangıç ve bitiş arasında sıcaklık farkları gözlemlenmiştir. Durağan haldeki test düzeneği, içerisinden soğutulmuş akışkan geçtiğinde bir termal dengeye oturmuştur fakat bu denge noktasındaki sıcaklık değeri debi değişimi ile birlikte değişim göstermektedir.

Bu sıcaklık değişkenliği nedeniyle, test boyunca sabit bir sıcaklık değeri altında ölçüm yapmak mümkün olmamıştır. Dolayısıyla analiz sonuçları ve deneysel ölçümler, değişken sıcaklık koşullarını yansıtacak şekilde tablo formatında test verileri verilmiş; sabit sıcaklık noktalarına bağlı bir eğilim veya karşılaştırma grafiği oluşturulmamıştır.

Bu yaklaşım, sıcaklık değişimlerinin sonuçlar üzerindeki etkisini şeffaf şekilde göstermeyi ve farklı test koşullarının doğrudan karşılaştırılabilirliğini sağlamayı hedeflemektedir.

5.1 Deneysel ve Sayısal Analiz Sonuçları

Gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen deneysel veriler, sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılarak modelin doğruluğu değerlendirilmiştir. Bu amaçla her bir test için deneysel olarak ölçülen debi (Q_{test}) ve basınç farkı (ΔP) değerleri ile, aynı koşullarda yürütülen sayısal analiz sonucunda elde edilen debi (Q_{Analiz}) değerleri karşılaştırılmıştır.

Aşağıdaki tabloda, her bir test için deneysel ve sayısal değerler ile birlikte göreceli hata yüzdesi (%) verilmiştir. Hata hesaplaması aşağıdaki ifade ile yapılmıştır:

$$\%Hata = \left| \frac{Q_{test} - Q_{Analiz}}{Q_{test}} \right| \times 100 \quad 6$$

Test sonuçları ve analiz sonuçları karşılaştırılması Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3 ile verilmiştir:

Tablo 1. 2 mm Orifis Test ve Analiz Sonuçları

Test Sonuçları				Analiz Sonucu	
Giriş Akışkan Sıcaklığı [°C]	Çıkış Akışkan Sıcaklığı [°C]	Basınç Farkı [bar]	Hacimsel Debi [L/dk]	Hacimsel Debi [L/dk]	Hata [-]
1.76	6.72	93.65	20.09	21.05	4.79%
-0.88	4.25	93.30	20.03	20.67	3.18%
-10.24	-3.51	96.01	19.84	19.50	1.70%
-15.66	-0.84	126.14	22.55	21.35	5.34%
-2.86	2.27	119.05	22.48	23.34	3.81%
1.90	7.15	118.06	22.42	23.91	6.63%
-6.27	0.87	148.90	25.13	25.90	3.06%
1.00	7.54	146.98	25.00	26.80	7.21%
-15.58	-4.16	153.74	25.00	24.01	3.97%
-19.03	-4.22	189.89	27.46	25.90	5.68%
-5.42	2.84	179.40	27.33	28.90	5.74%

Tablo 2. 2.5 mm Orifis Test ve Analiz Sonuçları

Test Sonuçları				Analiz Sonucu	
Giriş Akışkan Sıcaklığı [°C]	Çıkış Akışkan Sıcaklığı [°C]	Basınç Farkı [bar]	Hacimsel Debi [L/dk]	Hacimsel Debi [L/dk]	Hata [-]
-2.75	-6.75	17.13	15.05	13.84	8.08%
-9.63	-6.63	32.79	20.09	18.34	8.71%
-4.13	-1.13	33.78	20.28	19.87	2.01%
-0.51	2.49	33.65	19.77	20.48	3.55%
-19.81	-11.81	89.78	30.23	28.78	4.82%
-16.43	-9.43	89.65	30.54	30.24	1.00%

-8.37	-1.37	87.14	30.11	32.66	8.48%
-9.97	5.03	86.21	29.79	32.04	7.54%
-13.78	6.22	196.07	44.91	49.04	9.20%
-17.08	-8.08	160.35	39.93	42.16	5.58%
-12.71	1.29	157.16	40.06	43.72	9.13%
-12.73	7.27	156.32	40.24	43.58	8.28%

Tablo 3. 3 mm Orifis Test ve Analiz Sonuçları

Test Sonuçları				Analiz Sonucu	
Giriş Akışkan Sıcaklığı [°C]	Çıkış Akışkan Sıcaklığı [°C]	Basınç Farkı [bar]	Hacimsel Debi [L/dk]	Hacimsel Debi [L/dk]	Hata [-]
3.99	4.99	4.60	10.58	10.50	0.75%
-16.67	-14.67	21.25	20.60	19.31	6.25%
-15.23	-14.23	21.67	20.28	20.30	0.09%
-19.85	-15.85	68.74	40.05	38.06	4.97%
-10.50	-9.50	50.75	40.18	36.27	9.73%
-22.20	-16.20	156.95	60.27	59.93	0.57%
-20.85	-10.85	153.35	60.08	60.47	0.64%

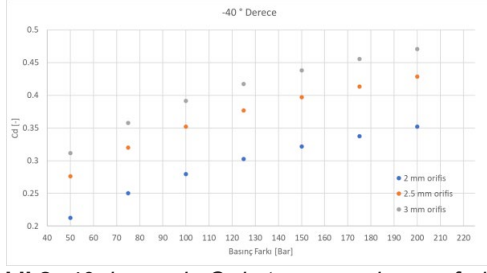
5.2 Sıcaklığa Bağlı C_d Değişimi

Toplanan deneysel veriler ve bu verilere bağlı olarak yapılan analizler sonucunda, kullanılan analiz yöntemi doğrulanmıştır. Basınç farkına bağlı olarak değişen debi değerlerinin farklı sıcaklık koşullarındaki davranışı, doğrulanan bu analiz yöntemi üzerinde daha hassas aralıklarda detaylı şekilde incelenmiştir.

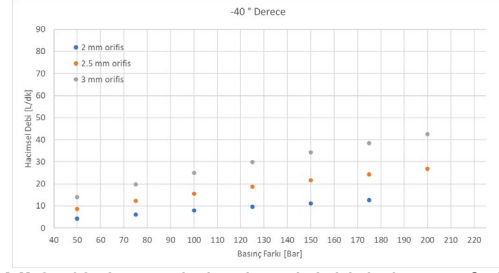
Bu ileri inceleme sayesinde, test sonuçlarıyla uyumlu ve onaylanmış analiz modeli kullanılarak orifis davranışları küçük aralıklarla analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar, ileride kullanılacak korelasyonların oluşturulmasına temel teşkil edecek şekilde kaydedilmiştir.

Kaydedilen veriler orifis geometrisi üzerindeki basınç farkına karşılık gelen hacimsel debi değeri ve basınç farkına karşılık gelen karşılık gelen C_d değeri farklı sıcaklıklar için raporlanmıştır. Buradaki temel amaç, orifisin temel geçirgenlik grafiğini göstermek ve akış karakteristiğine ait boyutsuz bir katsayı olan C_d değerini yine boyutsuz bir akış parametresi ile incelemektir.

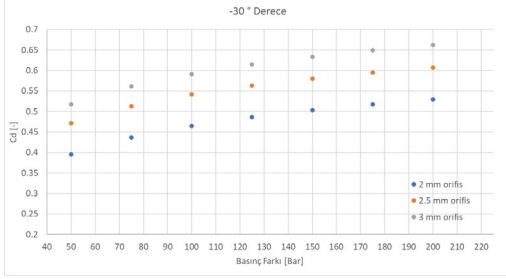
Yapılan bu akış analizlerin çıktıları ve karakteristik sonuçlar Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11 ile sunulmuştur.



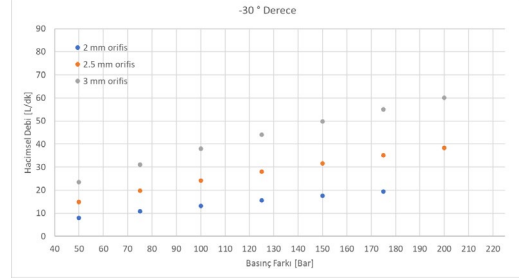
Şekil 2 -40 derecede C_d katsayısının basınç farkına göre değişimi



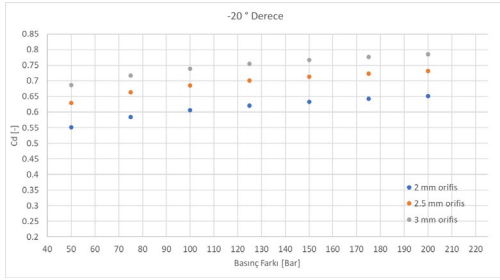
Şekil 3 -40 derecede hacimsel debinin basınç farkına göre değişimi



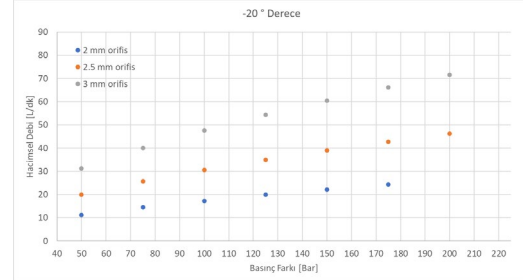
Şekil 4 -30 derecede C_d katsayısının basınç farkına göre değişimi



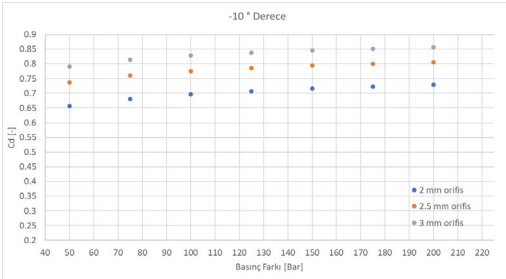
Şekil 5 -30 derecede hacimsel debinin basınç farkına göre değişimi



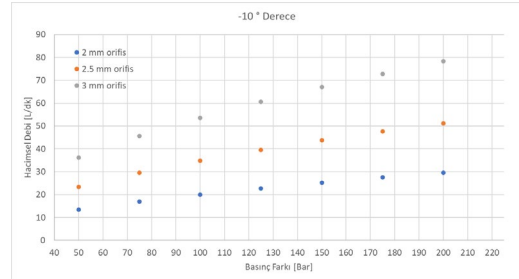
Şekil 6 -20 derecede C_d katsayısının basınç farkına göre değişimi



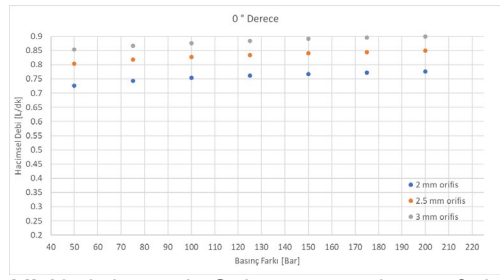
Şekil 7 -20 derecede hacimsel debinin basınç farkına göre değişimi



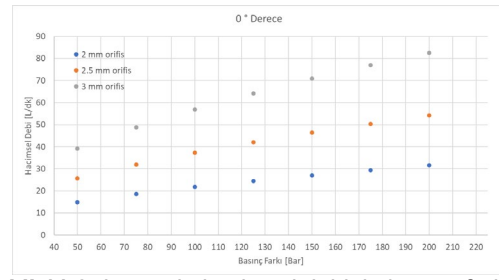
Şekil 8 -10 derecede C_d katsayısının basınç farkına göre değişimi



Şekil 9 -10 derecede hacimsel debinin basınç farkına göre değişimi



Şekil 10 0 derecede C_d katsayısının basınç farkına göre değişimi



Şekil 11 0 derecede hacimsel debinin basınç farkına göre değişimi

5.3 C_d Değeri için Korelasyon Geliştirilmesi

Bu çalışmada deney ve sayısal analiz verileri kullanılarak, debi katsayısı (C_d) için iki farklı ampirik korelasyon geliştirilmiştir. Amaç, farklı sıcaklık ve akış koşullarında ölçülen C_d değerlerini basit bir analitik denklem ile tahmin edebilecek bir ifade oluşturmaktır. Bu ifade içerisinde sıcaklığa bağlı özelliklerini Reynolds sayısı ile ve geometriye bağlı özelliklerini L/D oranı ile veya akışkan özelliklerini de kapsayan parametreler ile tahmin sağlayacaktır.

Birinci korelasyon, Re ve L/D değişkenlerinin C_d üzerindeki etkisini tanımlamak için çeşitli matematiksel fonksiyon bileşenleri (örneğin logaritmik, polinom, üstel) içeren çoklu regresyon denemeleri yapılmıştır. İkinci korelasyon ise, akışkan ve geometrik özelliklerin direkt olarak dahil olduğu çoklu lineer regresyon modeli kurulmuştur. Giriş sıcaklığı, basınç farkı, yoğunluk, viskozite ve L/D oranına göre oluşturulan regresyon yapılmıştır.

Kodlama aşamasında Python programlama dili ve ilgili Python kütüphane fonksiyonları kullanılarak parametreler uyumu gerçekleştirilmiş, R^2 (determinasyon katsayısı) değerleri hesaplanmıştır.

İlk olarak Re ve L/D için aşağıdaki fonksiyonel biçimler test edilmiştir:

- Lineer (Re , L/D)
- Logaritmik ($\log(Re)$, $\log(L/D)$)
- Karekök (\sqrt{Re} , $\sqrt{(L/D)}$)
- Kare (Re^2 , $(L/D)^2$)
- Küp (Re^3 , $(L/D)^3$)

Ayrıca, bu dönüşümlerin tüm kombinasyonlarına ait çarpım (ör. $\log(Re) \cdot \sqrt{(L/D)}$, $Re^2 \cdot (L/D)^3$ vb.) ve toplam (ör. $\log(Re) + \sqrt{(L/D)}$) terimleri de oluşturulmuş ve değerlendirilmiştir.

İkinci regresyon modeli olan lineer modelde ise aşağıdaki fonksiyon test edilmiştir:

$$C_d = (A_1 \cdot \sqrt{Temp + B_1}) \cdot (\sqrt{\Delta P} + C_1) \cdot (Density \cdot 10^{-3} + D_1) \cdot (Viskozite + E_1) \cdot \left(\frac{L}{D}\right) + F_1 \quad 7$$

Elde edilen modeller, R^2 değerine göre sıralanmış ve en yüksek doğruluğa sahip olan formül seçilmiştir. Burada elde edilen katsayılar ve model doğruluğu şu şekildedir:

Re ve L/D ye bağlı oluşturulan denklem:

$$C_d = 9.961 \cdot 10^{-2} \cdot \log Re - 1.93 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{L}{D}^3 + 0.1533, \quad R^2 = 0.956 \quad 8$$

Çoklu lineer regresyon modeli ile oluşturulan denklem:

$$C_d = (0.486 \cdot \sqrt{Temp + 65}) + (\sqrt{\Delta P} * 10^{-5} \cdot 0.01125) + (Den \cdot 10^{-3} \cdot 39.74) + (Vis - 0.003227) + \left(\frac{L}{D}\right) \cdot -0.04564 - 36.85, \quad R^2 = 0.9922 \quad 9$$

Burada:

- $A_1, B_1, C_1, D_1, E_1, F_1$: Sabit değer [-]
- Re : Reynolds sayısı [-]
- $Temp$: Akışkan sıcaklığı [$^{\circ}C$]
- ΔP : Basınç farkı [Pa]
- Den : Yoğunluk [kg/m^3]
- Vis : Viskozite [Pa·s]
- L/D : Orifis uzunluğunun çapına oranı [-]

Bu korelasyon, geniş bir Reynolds sayısı ve L/D oranı aralığında ölçülen C_d değerlerini yaklaşık %95.6 doğrulukla açıklayabilmektedir. Buna paralel olarak çoklu lineer regresyon modeli ise %99.22 doğrulukla açıklayabilmektedir.

5.4 Öneriler

Bu çalışma, farklı sıcaklıklarda ve akış koşullarında hidrolik sistemlerde kullanılan orifis bileşenleri için debi katsayısı (C_d) değerinin belirlenmesine yönelik deneysel ve sayısal analizler içermektedir. Sıcaklık, Reynolds sayısı ve L/D oranı gibi parametrelerin C_d üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiş ve bu ilişkileri açıklayabilecek bir ampirik korelasyon geliştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, belirli bir parametre aralığında yüksek bir doğrulukla C_d tahmini yapılabileceğini göstermektedir. Özellikle sıcaklık değişimlerine bağlı viskozite etkisinin logaritmik olarak modellenmesi ve geometrik oranların ikinci dereceden katkısının belirlenmesi, tasarımda ve performans analizinde önemli bir avantaj sunmaktadır.

Ancak bu çalışma bir başlangıç aşaması olarak değerlendirilmelidir. Korelasyonun daha geniş bir geçerlilik aralığına sahip olabilmesi için farklı sıcaklıklarda, viskozite sınıflarında, orifis çaplarında ve L/D oranlarında yapılacak ek deneylere ihtiyaç vardır. Ayrıca düşük sıcaklık testlerinin çeşitlendirilmesi ve CFD analizlerinin farklı türbülans modelleriyle karşılaştırılması, korelasyonun daha da geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

İlerleyen çalışmalarda, deneysel veri setinin büyütülmesi ve farklı akışkan türleri ile testler yapılması hedeflenmektedir. Bu sayede, hidrolik sistem tasarımında daha güvenilir ve genel geçer bir C_d tahmin modeli elde edilerek, sistem verimliliğinin artırılması ve tasarım sürelerinin kısaltılması amaçlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- [1] I. E. IDELCHIK, Handbook of Hydraulic Resistance, 4th Edition, US: Begell House, Inc., 2007.
- [2] H. E. Merritt, Hydraulic Control Systems, US: John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [3] HOBBS, J. M., HUMPHREYS, The effect of orifice plate geometry upon discharge coefficient., Flow Measurement and Instrumentation., cilt 1, no. 2, pp. 89-95, 1990.
- [4] MARANI, P., NATALINI, M., CALZOLARI, S., MAGI, V., Orifices flow saturation in oil hydraulic applications., Proceedings of the 12th International Fluid Power Conference Dresden., cilt 1, 2020.
- [5] BENHAMADOUCHE, S., ARENAS, M., MALOUF, W. J., Wall-resolved Large Eddy Simulation of a flow through a square-edged orifice in a round pipe at $Re = 25,000$., Nuclear Engineering and Design., cilt 312, pp. 128-136, 2017.
- [6] ABD, H. M., ALOMAR, O. R., MOHAMED, Effects of varying orifice diameter and Reynolds number on discharge coefficient and wall pressure., Flow Measurement and Instrumentation, cilt 65, pp. 128-136, 2017.
- [7] WU, D., BURTON, R., SCHOENAU, An empirical discharge coefficient model for orifice flow., International Journal of Fluid Power., cilt 3, no. 3, pp. 13-19, 2022.
- [8] OLIVEIRA, N. M. B., VIEIRA, L. G. M., DAMASCENO, Numerical methodology for orifice meter calibration., Materials Science Forum, Cilt %1 / %2660-661, pp. 531-536, 2010.
- [9] TUKIMAN, M. M., GHAZALI, M. N. M., SADIKIN, A., NASIR, N. F., NORDIN, N., SAPIT, A., RAZALI, M. A., CFD simulation of flow through an orifice plate., IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. , cilt 243, no. 1, 2017.
- [10] S. BARAN, Akışkan Şartlandırma Ünitesi. Patent: PCT/TR2024/050304.

- [11] S. BARAN, Ek cidara sahip özel tasarım bir rezervuar. Patent: PCT/TR2024/050305.
[12] S. BARAN, Doğrusal tahrik ile çalışan bir aktarım sistemi. Patent: PCT/TR2024/050798.
[13] K. G. Hermann SCHLICHTING, Boundary-layer theory, Springer, 2016.
[14] Aerospace Hydraulic Fluids Physical Properties, Society of Automotive Engineers, SAE, 2016.

7. ÖZGEÇMİŞ

Emre Can YILMAZ

1999 yılında İstanbul'da doğdu. 2023'te Eskişehir Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2025 itibarıyla Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği yüksek lisans programına devam etmektedir. 2023'ten bu yana TAAC Havacılık Teknolojileri'nde hidrolik ekipman tasarımı ve test/doğrulama, akışkanlar dinamiği, HAD alanlarında çalışmaktadır.

Bekir YILDIZ

İlk, orta ve lise öğrenimini Konya'da tamamladı. 2017 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2022 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. Mezun olduğu 2022 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı programında tezli yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek Lisans öğrenciliğinin yanı sıra TAAC Havacılık Teknolojileri firmasında Modelleme ve Simülasyon Mühendisi olarak çalışmaktadır.