T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DELİKLİ PLAKALARDAKİ AKIŞ KARAKTERİSTİĞİ VE BASINÇ KAYBININ NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhammed Furkan BÜYÜKYILDIZ

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Hakan DEMİR

Mart, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DELİKLİ PLAKALARDAKİ AKIŞ KARAKTERİSTİĞİ VE BASINÇ KAYBININ NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhammed Furkan BÜYÜKYILDIZ tarafından hazırlanan tez çalışması 11.03.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Proses Programı **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hakan DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hakan DEMİR, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Sertaç ÇADIRCI, Üye

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Hakan DEMİR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Delikli Plakalardaki Akış Karakteristiği ve Basınç Kaybının Nümerik 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.

Muhammed Furkan BÜYÜKYILDIZ

İmza

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Tez sürecim boyunca desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen, yeri geldiğinde kendinden bile fedakarlıklar yapıp tezimi nihayete erdirmeme vesile olan kıymetli eşim Sena BÜYÜKYILDIZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans için beni cesaretlendirip, motive eden ve yine hiçbir zaman benden desteklerini esirgemeyen çok kıymetli ve değerli ailemede bir teşşekürü borç bilirim. Tez sürecim boyunca bana maddi ve manevi olarak destekte bulunan, motivasyonumu onunla hep dinç tuttuğum kıymetli arkadaşım Ali TAVLAŞOĞLU'na ve imalat süreçlerinde yardımcı olan değerli arkadaşım Emirhan TEKCANÖZÜ'ne teşekkür etmek istiyorum. Son olarak, tez danışman hocam olan Prof.Dr.Hakan DEMİR'e tez süreci boyunca yapmış olduğu yol göstermelerden ve teknik desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Muhammed Furkan BÜYÜKYILDIZ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 GİRİŞ 1
2 LİTERATÜR TARAMASI 3
3 SAYISAL MODELLEME VE SİMULASYON 16
3.1 Sayısal Modelleme Yaklaşımı (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) 16
3.1.1 Yönetici Denklemler 16
3.2 Model Kurulumu 18
3.2.1 Geometri 19
3.2.2 Ağ Örgüsü (Meshing) 24
3.2.3 Sınır Koşulları ve Çözücü Ayarları 33
3.3 Sonuçlar ve Değerlendirmeler 40
3.3.1 Tek Gruplu Delikli Plaka Modeli 40
3.3.2 Deney Düzeneğinin Kurulumu ve Deneysel Ölçüm Verileri 51
3.3.3 Gözenekli Fırın Modeli 54
3.4 Parametreler Arası İlişki ve Tahmin Yöntemleri 65
3.4.1 Tek Gruplu Delikli Plaka Modeli 65
3.4.2 Gözenekli Fırın Modeli 73
4 SONUÇ 80
4.1 Tek Gruplu Delikli Plaka Modeli: Deneysel Doğrulama ve Regrasyon Analizleri 80
4.2 Gözenekli Fırın Modeli: Sayısal Simülasyonlar ve Regrasyon Analizleri 82
4.3 Genel Değerlendirme ve Öneriler 83

KAYNAKÇA **85**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **88**

SİMGE LİSTESİ

ρ	Akışkan Yoğunluğu [kg/m³]
u_i	Akışkanın hız bileşeni (i = x, y, z yönleri)
p	Basınç [Pa]
f	Boşluk Oranı
D	Delik Çap [mm]
μ	Dinamik Viskozite [Pa·s]
C_2	Forchheimer Katsayısı [1/m]
α	Gözenekli Ortam Geçirgenliği [m²]
f_e	Harici Kuvvetler
G_k	Hız gradyanları nedeniyle üretilen türbülans kinetik enerjisi
k_i	Isıl İletkenlik [W/m·K]
G_β	Kaldırma kuvveti nedeniyle üretilen türbülans kinetik enerji
$C_{3\varepsilon}$	Kaldırma kuvvetine bağlı model katsayısı
$C_{1\varepsilon}$	Model sabiti (ε'nin üretimini ifade eden katsayı)
$C_{2\varepsilon}$	Model sabiti (ε'nin yayılımını ifade eden katsayı)
r	Pearson Korelasyon Katsayısı
Re	Reynold Sayısı
T	Sıcaklık [K]
Y_M	Sıkıştırılabilirlikten kaynaklanan modifikasyon terimi
E	Toplam Enerji [kj]
k	Türbülans Kinetik Enerji [m²/s²]
S_k	Türbülans kinetik enerjisi denklemine eklenen kaynak terimi
σ_k	Türbülans kinetik enerjisi için Prandtl sayısı (model sabiti)
μ_t	Türbülans Viskozitesi [Pa·s]
g	Yer Çekimi İvmesi [m/s^2]
S_ε	Türbülans yayılım oranı denklemine eklenen kaynak terimi
u	X Yönündeki Hız Vektörü [m/s]
v	Y Yönündeki Hız Vektörü [m/s]
w	Z Yönündeki Hız Vektörü [m/s]
t	Zaman [s]

KISALTMA LİSTESİ

Cl	Güven Aralığı
DNS	Direkt Nümerik Simülasyonları
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
LES	Büyük Ölçekli Girdap Simülasyonları
RANS	Reynold Ortalamalı Navier Strokes
SE	Standard Hata Katsayısı
TFT	İnce Tabakalı Transistör

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3. 1 Endüstriyel fırın geometrisi **19**
Şekil 3. 2 Delikli plaka akış hacmi **20**
Şekil 3. 3 Delikli plaka **20**
Şekil 3. 4 Tek gruplu delikli plaka modeli **21**
Şekil 3. 5 Tek grup delikli plaka modeli akış hacmi **22**
Şekil 3. 6 Gözenekli fırın modeli **23**
Şekil 3. 7 Sınır tabaka bağımsızlığı **25**
Şekil 3. 8 Tek grulu delikli plaka modeli mesh bağımsızlığı **26**
Şekil 3. 9 Tek gruplu delilkli plaka modeli mesh bağımsızlığı **28**
Şekil 3. 10 Gözenekli bölge mesh bağımsızlığı **29**
Şekil 3. 11 Gözenekli bölge mesh bağımsızlığı hız dağılımı **31**
Şekil 3. 12 Gözenekli bölge mesh bağımsızlığı **32**
Şekil 3. 13 Fırın geometrisi Mesh-3 ağ yapısı **33**
Şekil 3. 14 Tek gruplu delikli plaka akış hacmi **35**
Şekil 3. 15 Gözenekli yapıya sahip fırın modeli **38**
Şekil 3. 16 0,2 Boşluk oranlı 0,5 mm delik çaplı 1 mm plaka kalınlıklı delikli plaka modeli Basınç-Hız Grafiği **41**
Şekil 3. 17 0,2 Boşluk oranında plaka kalınlığına göre basınç kaybının değişimi **42**
Şekil 3. 18 0,2 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi **43**
Şekil 3. 19 0,3 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi **44**
Şekil 3. 20 0,4 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi **45**
Şekil 3. 21 0,5 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi **47**
Şekil 3. 22 0,6 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi **48**
Şekil 3. 23 0,4 Boşluk oranı, 0,5 mm delik çapı ve 1 mm kalınlığa sahip plakanın hız dağılım grafiği **49**
Şekil 3. 24 0,4 Boşluk oranı, 2 mm delik çapı ve 1 mm kalınlığa sahip plakanın hız dağılım grafiği **50**
Şekil 3. 25 Yıldız Teknik Üniversitesi rüzgâr tüneli **51**
Şekil 3. 26 0,2 Boşluk oranlı, 4 mm delik çaplı ve 1 mm et kalınlıklı delikli plaka ve çerçevesi **52**
Şekil 3. 27 Rüzgâr tüneline delikli plakanın yerleştirilmesi **52**

Şekil 3. 28 Deneysel veri sonuçları ve HAD karşılaştırması **53**

Şekil 3.29 Üniformite indeksinin okunduğu sanal yüzeyler..... **55**

Şekil 3. 30 0,2 ve 0,6 boşluk oranlı gözenekli fırın modeli- hız konturları karşılaştırması **58**

Şekil 3. 31 0,2 ve 0,6 boşluk oranlı gözenekli fırın modeli- hız vektörleri karşılaştırması **58**

Şekil 3. 32 0,2 ve 0,6 boşluk oranlı gözenekli fırın modeli- basınç konturları karşılaştırması **60**

Şekil 3. 33 0,2 Boşluk oranlı plakaların 0,5 mm ve 4 mm delik çapı hız konturları karşılaştırması **61**

Şekil 3. 34 0,2 Boşluk oranlı plakaların 0,5 mm ve 4 mm delik çapındaki basınç konturları karşılaştırması **62**

Şekil 3. 35 0,2 Boşluk oranı,0,5 mm delik çapında 0,5 mm ve 4 mm plaka kalınlığı hız konturları karşılaştırması..... **64**

Şekil 3. 36 0,2 Boşluk oranı,0,5 mm delik çapında 0,5 mm ve 4 mm plaka kalınlığı basınç konturları karşılaştırması **64**

Şekil 3. 37 Boşluk oranı,delik çapı,plaka kalınlığı ve hız parametrelerinin basınç kaybı ile ilşkisi **66**

Şekil 3. 38 Basınç kaybı vs delik çapı ve boşluk oranı **70**

Şekil 3. 39 Basınç kaybı vs plaka kalınlığı ve boşluk oranı **71**

Şekil 3. 40 Basınç kaybı vs hız ve boşluk oranı **71**

Şekil 3. 41 Basınç kaybı vs delik çapı ve plaka kalınlığı **72**

Şekil 3. 42 Basınç kaybı vs delik çapı ve hız **73**

Şekil 3. 43 Basınç kaybı vs plaka kalınlığı ve hız **73**

Şekil 3. 44 Gözenekli fırın modeli korelasyon analizi çıktısı..... **74**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3. 1 Mesh bağımsızlığı basınç ve hız değerleri **27**

Tablo 3. 2 Fırın mesh bağımsızlığı özellikleri **32**

Tablo 3. 3 Tek gruplu delikli plaka modeli optimizasyon analiz matrisi **36**

Tablo 3. 4 0,2 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları **40**

Tablo 3. 5 0,2 Boşuk oranlı 0,5 mm delik çaplı farklı kalınlıktaki delikli plaka analiz sonuçları **42**

Tablo 3. 6 0,3 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları **44**

Tablo 3. 7 0,4 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları **45**

Tablo 3. 8 0,5 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları **46**

Tablo 3. 9 0,6 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları **48**

Tablo 3. 10 Deneysel basınç ölçüm verileri ve HAD sonuçları karşılaştırması **54**

Tablo 3. 11 Gözenekli fırın modeli analiz sonuçları **56**

Tablo 3. 12 Regrasyon analizi katsayıları **68**

Tablo 3. 13 Gözenekli fırın modeli basınç kaybı regrasyon analizi katsayılar tablosu **76**

Tablo 3. 14 Gözenekli fırın modeli üniformite indeksi regrasyon analizi katsayılar tablosu **78**

ÖZET

Delikli Plakalardaki Akış Karakteristiği ve Basınç Kaybının Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi

Muhammed Furkan BÜYÜKYILDIZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Hakan DEMİR

Bu tez çalışması, delikli plakaların akış dinamikleri üzerindeki etkilerini analiz ederek enerji verimliliği ve akış düzenlemesi açısından optimize edilmiş tasarım parametrelerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Delikli plakalar, endüstriyel fırınlar, havalandırma sistemleri ve kimyasal reaktörler gibi birçok mühendislik uygulamasında basınç kaybını kontrol etmek ve akışın düzgünlüğünü sağlamak amacıyla kullanılan kritik yapı elemanlarıdır. Bu çalışmada, farklı gözeneklilik oranları, delik çapları, plaka kalınlıkları ve akış hızları gibi parametrelerin akış karakteristikleri üzerindeki etkileri hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelenmiştir.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri, delikli plakaların geometrik parametrelerinin akış üzerindeki etkilerini anlamada temel bir araç olarak kullanılmıştır. HAD simülasyonlarında, Navier-Stokes denklemleri ve gelişmiş türbülans modelleri kullanılarak farklı geometrik konfigürasyonların akış üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sayısal modellerin doğruluğunu sağlamak için deneysel verilerle karşılaştırmalar yapılmış ve bu iki yaklaşım arasında yüksek uyum elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, plaka kalınlığı, delik çapı ve

gözeneklilik oranı gibi parametrelerin basınç kaybı ve akış düzgünlüğü üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur.

Çalışmada ayrıca, parametreler arasındaki ilişkilerin matematiksel modellerle temsil edilmesi amacıyla regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda, tasarım parametrelerinin akış performansı üzerindeki etkilerini tahmin etmeye yönelik öngörüler sunulmuştur. Elde edilen matematiksel modeller, enerji verimliliğini artırmaya ve akış düzgünlüğünü sağlamaya yönelik optimize edilmiş tasarım çözümleri geliştirilmesinde rehberlik etmiştir.

Sonuçlar, delikli plakaların basınç kaybı ve akış üniformitesi üzerindeki etkilerinin parametrik analizini sağlamış ve bu yapıların enerji verimliliği ve süreç optimizasyonuna katkılarını ortaya koymuştur. Özellikle, gözeneklilik oranının artışıyla basınç kaybının azaldığı, ancak akış düzgünlüğünün sınırlı bir şekilde bozulabileceği tespit edilmiştir. Benzer şekilde, plaka kalınlığının artışıyla basınç kaybının doğrusal bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, mühendislik uygulamalarında delikli plaka tasarımına yönelik değerli bilgiler sunmaktadır.

Bu tez, enerji verimliliği ve sistem performansını iyileştirme hedefine katkıda bulunmayı amaçlamakta ve delikli plakaların tasarımında kapsamlı bir yöntem önerisi sunmaktadır. Çalışmanın sonuçlarının, endüstriyel uygulamalar için optimize edilmiş delikli plaka tasarımı açısından önemli bir rehber olacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Delikli plakalar, basınç kaybı, akış karakteristiği, akış üniformitesi, geometrik parametre optimizasyonu.

ABSTRACT

Numerical and Experimental Investigation of Flow Characteristics and Pressure Loss in Perforated Plates

Muhammed Furkan BÜYÜKYILDIZ

Department of Mechanical Engineering

Master of Science

Supervisor: Prof. Dr.Hakan DEMİR

This thesis aims to analyze the effects of perforated plates on flow dynamics and to determine optimized design parameters in terms of energy efficiency and flow regulation. Perforated plates are critical structural components used to control pressure loss and ensure flow uniformity in various engineering applications, including industrial furnaces, ventilation systems, and chemical reactors. In this study, the effects of parameters such as porosity ratio, hole diameter, plate thickness, and flow velocity on flow characteristics were investigated using both experimental and numerical methods.

Computational Fluid Dynamics (CFD) methods were employed as a fundamental tool to understand the influence of geometric parameters of perforated plates on flow behavior. In CFD simulations, the effects of different geometric configurations on flow characteristics were analyzed using Navier-Stokes equations and advanced turbulence models. The accuracy of numerical models was validated through comparisons with experimental data, and a high level of agreement was achieved between the two approaches. The findings comprehensively revealed the impacts of parameters such as plate thickness, hole diameter, and porosity ratio on pressure loss and flow uniformity.

The study also included regression analyses to represent the relationships between parameters with mathematical models. These analyses provided insights for predicting the influence of design parameters on flow performance. The resulting mathematical models served as a guide for developing optimized design solutions aimed at enhancing energy efficiency and ensuring flow uniformity.

The results provided a parametric analysis of the effects of perforated plates on pressure loss and flow uniformity, highlighting their contributions to energy efficiency and process optimization. Specifically, it was observed that increasing the porosity ratio reduced pressure loss, albeit with a slight deterioration in flow uniformity. Similarly, plate thickness was found to have a linear relationship with pressure loss, while increasing hole diameter improved flow uniformity. These findings offer valuable insights for the design of perforated plates in engineering applications.

This thesis contributes to the goal of improving energy efficiency and system performance by proposing a comprehensive approach to the design of perforated plates. The outcomes of the study are anticipated to serve as a significant reference for optimized perforated plate design in industrial applications.

Keywords: Perforated plates, pressure loss, flow characteristics, flow uniformity, geometric parameter optimization.

1
GİRİŞ

Mühendislik bilimleri, enerji verimliliği, süreç optimizasyonu ve performans iyileştirme hedefleri doğrultusunda sürekli gelişim gösteren bir alandır. Akışkanlar dinamiği sistemlerinin tasarımı, endüstriyel süreçlerde enerji kayıplarını azaltmak, sistem stabilitesini sağlamak ve akışın üniform dağılımını iyileştirmek için kritik bir role sahiptir. Bu bağlamda, delikli plakalar gibi akış düzenleme elemanları, basınç kaybını kontrol etme ve akışın düzgünlüğünü sağlama potansiyelleri nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu elemanların optimizasyonu, enerji tasarrufunun yanı sıra, mühendislik sistemlerinin genel performansını artırmak için önemli fırsatlar sunmaktadır.

Delikli plakalar, basınç kaybı, akış üniformitesi ve türbülans özelliklerini etkileyen geometrik parametrelere sahip pasif düzenleme elemanlarıdır. Gözeneklilik oranı, delik çapı, plaka kalınlığı ve delik dizilim düzeni gibi parametrelerin doğru şekilde optimize edilmesi, bu yapıların performansını önemli ölçüde artırabilmektedir. Örneğin, havalandırma sistemleri, endüstriyel fırınlar ve kimyasal reaktörlerde akışın üniform hale getirilmesi ve enerji tüketiminin minimize edilmesi gibi uygulamalarda delikli plakaların etkili tasarımı kritik bir öneme sahiptir. Bununla birlikte, bu yapıların farklı akış rejimlerinde nasıl davrandığı, geometrik parametreler ile akış karakteristikleri arasındaki ilişkiler gibi konularda hala detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, delikli plakaların akış dinamikleri üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, delikli plakaların geometrik parametrelerinin akış karakteristikleri üzerindeki etkilerini analiz ederek, enerji verimliliği ve akış düzgünlüğünü artıracak optimize edilmiş tasarım parametrelerini belirlemektir. Bu amaç doğrultusunda, hem deneysel çalışmalar hem de sayısal modelleme teknikleri bir arada kullanılmıştır. Sayısal analizlerde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi tercih edilmiş ve Navier-Stokes denklemleri, türbülans modelleri ile birlikte çözülerek akışın detaylı bir simülasyonu

gerçekleştirilmiştir. Bu sayısal modeller, deneysel bulgularla karşılaştırılarak doğrulanmış ve yüksek uyum göstermiştir.

Tezde yer alan çalışmalar, geniş bir kapsamda değerlendirilmiş ve farklı akış rejimleri, gözeneklilik oranları, plaka kalınlıkları ve delik çapları gibi parametreler ele alınmıştır. Deneysel düzenekler kullanılarak basınç kaybı, akış düzgünlüğü ve hız dağılımı ölçümleri gerçekleştirilmiş, bu veriler HAD sonuçları ile birlikte analiz edilmiştir. Ayrıca, regresyon analizleri yoluyla matematiksel modeller geliştirilmiş ve bu modeller aracılığıyla tasarım parametrelerinin akış performansı üzerindeki etkileri öngörülmüştür.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, delikli plakaların basınç kaybı ve akış düzgünlüğü üzerindeki etkilerini açıklamış, bu yapıların enerji verimliliği ve sistem optimizasyonuna yönelik katkılarını ortaya koymuştur. Örneğin, gözeneklilik oranının artması ile basınç kaybı azalmış, ancak akış düzgünlüğünde sınırlı bir bozulma meydana gelmiştir. Plaka kalınlığı arttıkça, basınç kaybının doğrusal bir şekilde yükseldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, delik çapının artışı ile akış performansında iyileşmeler tespit edilmiştir. Bu eğilimler, mühendislik uygulamalarında delikli plakaların tasarımına yönelik rehber bilgiler sunmaktadır.

Bu tez, enerji verimliliği ve akış düzenlemesi gibi mühendislikte önemli sorunlara çözüm sunmayı hedeflemekte ve literatürdeki mevcut bilgi birikimine önemli katkılar sağlamaktadır. Özellikle, deneysel ve sayısal verilerin birlikte kullanılması, hem teorik hem de pratik açıdan daha kapsamlı sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır. Çalışmanın, endüstriyel uygulamalar için delikli plaka tasarımında kullanılabilecek optimize edilmiş yöntemler sunarak enerji tasarrufu ve performans iyileştirme hedeflerine katkı sağlaması beklenmektedir.

2
LİTERATÜR TARAMASI

Delikli plakaların akış karakteristikleri üzerine yapılan çalışmalar, basınç kaybı ve akış üniformitesinin optimizasyonu için önemli bilgiler sunmaktadır. Li ve arkadaşlarının [1] çalışmasında, orta gözeneklilik ve kalınlıkta yuvarlak delikli plakaların laminer ve türbülanslı akış rejimlerinde basınç kaybı modelleri incelenmiştir. Çalışma, mevcut basınç kaybı modellerinin doğruluğunu artırmak amacıyla yeni bir model geliştirilmesine odaklanmıştır. Geliştirilen model, hem laminer hem de türbülanslı akış rejimlerinde geçerli olup, gözeneklilik ve plaka kalınlık oranı gibi parametreleri içermektedir. Bu parametreler, Bae ve Kim'in [2] modeli temel alınarak genişletilmiş ve türbülanslı rejimlerde de geçerli olacak şekilde uyarlanmıştır. Model, basınç kaybını tahmin etmek için Darcy-Forchheimer denklemini kullanarak viskoz ve atalet basınç kayıplarını dikkate almaktadır. Deneysel veriler, Méry ve Sebbane'nin [3] çalışmasından elde edilen verilerle doğrulanmıştır ve sonuçlar, modelin yüksek doğrulukla basınç kaybı tahminleri sağladığını göstermiştir.

Li ve arkadaşları [1], modelin geliştirilmesinde plaka gözenekliliği ve kalınlık oranının basınç kaybı üzerindeki etkilerini göz önünde bulundurmuşlardır. Özellikle, plaka gözenekliliğinin artmasıyla birlikte basınç kaybının azaldığı, ancak akış üniformitesinin bozulabileceği bulunmuştur. Model, mevcut basınç kaybı modellerine göre daha geniş bir uygulama yelpazesi sunmakta ve farklı akış rejimlerinde doğrulanmıştır. Çalışmada kullanılan delikli plakaların çeşitli geometrik parametreleri detaylı olarak incelenmiştir. Méry ve Sebbane'nin [3] deneysel verileri ile yeni modelin tahminleri karşılaştırılmış ve modelin yüksek doğrulukla basınç kayıplarını tahmin ettiği gösterilmiştir. Özellikle, yeni modelin düşük Reynolds sayılarında Darcy teriminin baskın olduğunu, yüksek Reynolds sayılarında ise Forchheimer teriminin baskın olduğunu ortaya koyduğu bulunmuştur.

Başka bir çalışmada ise delikli plakaların basınç kaybı üzerindeki etkileri, çeşitli geometrik ve akış parametrelerine bağlı olarak incelenmiştir. Malavasi ve arkadaşlarının [4] çalışmasında, keskin kenarlı delikli plakalar üzerinden akışın basınç kaybına olan bağımlılığı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışma, farklı delik çapları, plaka kalınlıkları ve delik sayılarının basınç kaybı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde ele almıştır.

Malavasi ve arkadaşları [4], iki deney düzeneğinden veri toplamış ve bu verileri incelemiştir. Test edilen plakalar, farklı çap oranları, göreceli kalınlık ve delik sayılarıyla değişen farklı geometrik özelliklere sahiptir. Deneysel veriler, literatürde yer alan Weber ve arkadaşlarının [5] ve Zhao ve arkadaşlarının [6] yaptığı deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve parametrelerin güvenilirliği doğrulanmıştır.

Reynolds sayısının, eşdeğer çap oranının, göreceli kalınlığın ve delik sayısının basınç kaybı katsayısına olan etkileri incelenmiştir. Delikli plakaların basınç kaybı katsayısının, eşdeğer çap oranı ve göreceli kalınlık gibi geometrik parametrelerle olan ilişkisi belirgin bir şekilde ortaya konmuştur.

Sonuçlar incelendiğinde, geometrik parametrelerin basınç kaybı üzerindeki etkilerini açıkça görülmektedir. Eşdeğer çap oranının azalması, basınç kaybı katsayısının artmasına neden olurken, göreceli kalınlığın artması basınç kaybını azaltmaktadır. Delik sayısının artması, akışın düzgünlüğünü artırarak basınç kaybını azaltmaktadır. Bununla birlikte, deliklerin yerleşim düzeninin basınç kaybı üzerindeki etkisi daha az belirgin olmuştur.

Literatürde yapılan başka bir araştırmada ise, birçok endüstriyel ve kimyasal süreç için önemli olan, gaz akışının homojenliğinin sağlanması üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Śmierciew ve arkadaşlarının [7] çalışmasında, delikli plakalar üzerinden geçen gaz akışının homojenliğini sayısal olarak tahmin eden bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmada, farklı açık alan oranlarına sahip plakaların basınç düşüşü ve hız dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiş ve sayısal modeller deneysel verilerle doğrulanmıştır. Çalışmanın amacı, delikli plakaların akış homojenliğini artırmak için alternatif bir yaklaşım sunmaktır.

Śmierciew ve arkadaşları [7], homojen bir gaz akışı sağlamak için genellikle kanatçıklar ve saptırıcıların kullanıldığını, ancak delikli plakaların da benzer bir etki

yaratabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmada, çeşitli boşluk oranlarına sahip plakaların basınç düşüşü ve hız dağılımı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış ve farkın %5'ten az olduğu bulunmuştur. Bu doğrulama, geliştirilen modelin doğruluğunu göstermektedir.

Çalışmada, delikli plakalar üzerinden geçen akışın basınç düşüşünü ve hız dağılımını tahmin etmek için gözenekli ortam modeli kullanılmıştır. Bu model, çeşitli açık alan oranlarına sahip plakaların yapısal elemanlarla birlikte ele alındığı bir dolaylı modelleme yaklaşımı sunmaktadır. Deneysel veriler, plakaların açık alan oranlarının %30 ile %70 arasında değiştiği durumlar için basınç düşüşü ve hız dağılımı ölçümlerini içermektedir. Sayısal analizler, farklı açık alan oranlarına sahip plakalar için yapılmış ve genel bir basınç düşüşü bağıntısı önerilmiştir.

Deneysel veriler, %30 açık alan oranına sahip plaka için en yüksek basınç düşüşünü ve en türbülanslı akışı göstermiştir. Sonuçlar, gözenekli ortam modeli kullanılarak elde edilen sayısal sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermiştir. Ayrıca, plaka paneli üzerindeki yapısal elemanların akışa etkisi de incelenmiş ve bu elemanların akışı bozduğu, ancak gözenekli plaka modelinin bu bozulmayı doğru bir şekilde tahmin ettiği bulunmuştur.

Nguyen ve arkadaşlarının [8] çalışmasında, sodyum soğutmalı hızlı reaktör (SFR) buhar jeneratöründe kullanılan ısı değiştirici ünitesinde akışın üniform dağılımını sağlamak için delikli bir plaka tasarımı yapılmıştır. Bu çalışma, delikli plakanın geometrik tasarımını ve yerini optimize etmek amacıyla sayısal simülasyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise Kim ve arkadaşlarının [9] çalışmasında, optimize edilen delikli plaka deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, sayısal simülasyon verileriyle karşılaştırıldığında %30'dan az bir hata payı ile uyum göstermiştir.

Çalışmanın amacı, kanal boyunca üniform sodyum akış dağılımı sağlayacak bir delikli plaka tasarımı yapmaktır.Nguyen ve arkadaşları [8], delikli plakanın yerini belirlemek ve delik çaplarını hesaplamak için sayısal simülasyonlar yapmışlardır. Simülasyonlar, ANSYS Fluent kullanılarak, kararlı türbülanslı akış koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Delikli plakanın konumu ve delik çapları, yerel akış hızlarına dayanarak optimize edilmiştir. Çalışmada, delikli plakanın kurulumunun

akış üniformitesini önemli ölçüde artırdığı ve basınç düşüşünde hafif bir artışa neden olduğu gösterilmiştir. Varyasyon katsayısı değeri, delikli plakanın olmadığı durumda 0,412 iken, plakanın kurulumuyla 0,152'ye düşmüştür, bu da akış üniformitesinde %63,1'lik bir iyileşme anlamına gelmektedir. Aynı zamanda, basınç kaybı sadece %14,6 oranında artmıştır.

Çalışmanın önemli bir bulgusu, delikli plakanın, özellikle sodyum akışının giriş başlıklarında homojen olmayan dağılımının olduğu durumlarda akış dağılımını önemli ölçüde iyileştirdiğidir. Delikli plakanın olmadığı durumda, akış dağılımı düzensiz ve kanal girişlerinde hız farkları gözlenmiştir. Ancak, delikli plakanın kurulumu ile birlikte, akış hızlarının dağılımı daha homojen hale gelmiş ve varyasyon katsayısı değerinde belirgin bir düşüş gözlenmiştir.

Delikli plakaların akış katsayısını etkileyen geometrik parametrelerin incelenmesi, enerji verimliliği ve doğal havalandırma sistemlerinin optimize edilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Peng ve arkadaşlarının [10] çalışmasında, delikli plakaların akış katsayısını etkileyen delik oranı, delik boyutu ve delik şekli gibi geometrik parametreler, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı Fluent kullanılarak incelenmiştir. Çalışma, delik oranı, delik boyutu ve delik şeklinin akış katsayısı üzerindeki etkilerini ayrıntılı olarak ortaya koymaktadır.

Peng ve arkadaşları [10], delik oranının artmasıyla birlikte akış katsayısının arttığını bulmuşlardır. Delik oranı arttıkça, plaka üzerindeki engelleme etkisi azalmış ve bu da akış katsayısının artmasına neden olmuştur. Bu bulgu, delikli plakaların optimizasyonunda delik oranının önemli bir parametre olduğunu vurgulamaktadır. Ayrıca, delik boyutunun artmasıyla akış katsayısının da arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle küçük delik boyutlarında bu etkinin daha belirgin olduğu bulunmuştur. Bu sonuç, farklı delik boyutlarının basınç kaybı üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalarda dikkate alınması gereken önemli bir parametredir.

Çalışmada, delik şeklinin akış katsayısı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Dairesel deliklerin, kare ve üçgen deliklere kıyasla daha yüksek akış katsayısına sahip olduğu bulunmuştur. Bu durum, dairesel deliklerin akış direncini azaltarak daha yüksek akış katsayısı sağladığını göstermektedir. Bu bulgu, delikli plaka tasarımında dairesel deliklerin tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmada ayrıca, delik oranı, delik boyutu ve delik şekli gibi geometrik parametreler ile akış katsayısı arasındaki ilişkiyi incelemek için çoklu regresyon modeli kullanılmıştır. Elde edilen model, akış katsayısını tahmin etmek için kullanılabilir ve mühendislik projelerinde pratik uygulama değeri taşımaktadır.

Delikli plakaların, çeşitli mühendislik uygulamalarında akış yönetimi ve gürültü azaltma amacıyla kullanımı yaygındır. Jeong ve arkadaşlarının [11] çalışmasında, düz bir boru içinde farklı şekillerdeki delikli plakaların akış performansı sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma, delikli plakaların akış dağılımı, basınç düşüşü ve türbülans yoğunluğu üzerindeki etkilerini analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Jeong ve arkadaşları [11], ANSYS Fluent kullanarak, düz, konveks ve konkav şekillerdeki delikli plakaların akış hız profilleri, türbülans yoğunluğu ve basınç düşüşü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, farklı delik şekillerine sahip delikli plakalar kullanılarak, akış performansı sayısal olarak analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, konveks ve konkav plakaların akışın düzgünlüğünü bozduğunu ve bu nedenle merkezde daha yüksek hızlara ve duvar yakınında daha düşük hızlara neden olduğunu göstermektedir. Türbülans yoğunluğu profilleri, delikli plakaların türbülans enerjisini artırarak akışın düzensizliğine yol açtığını göstermektedir.

Düz plakanın en düşük basınç düşüşüne sahip olduğu, ancak konveks ve konkav plakaların daha yüksek basınç düşüşüne neden olduğu bulunmuştur. Bu bulgu, delikli plaka tasarımında basınç düşüşünün minimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, düz plakaların akış dağılımını daha homojen hale getirdiği, ancak konveks ve konkav plakaların akışın düzgünlüğünü bozduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, düz plakanın, akış üniformitesini artırmak için en uygun plaka şekli olduğunu göstermektedir.

Literatürdeki başka bir çalışmada ise, Bayazit ve arkadaşları [12] delikli plakaların akış karakteristiklerini anlamak için sayısal simülasyonlar ve deneyler birlikte kullanılmıştır. Çalışma, delikli plakaların geometrik parametrelerinin laminer ve türbülanslı akış rejimlerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır.

Bayazit ve arkadaşları [12], üç boyutsuz geometrik parametreyi sistematik olarak değiştirerek hem laminer hem de türbülanslı akış rejimlerini kapsayan deneyler ve

simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Laminer akış rejiminde, daha kalın plakalar ve zigzag delik desenleri daha yüksek basınç düşüşlerine yol açarken, daha yüksek gözeneklilik oranları daha düşük basınç düşüşleri sağlamıştır. Türbülanslı akış durumunda ise, daha ince plakalar ve kare delik desenleri daha yüksek basınç düşüşlerine neden olmuştur. Ayrıca, türbülanslı durumda basınç düşüşünün, momentum kayıplarının baskın olduğunu gösteren Reynolds sayısının karesine bağlı olduğu bulunmuştur. Bu ters trendler, farklı plaka kalınlıkları için ayrılan akışın yeniden bağlanma desenlerindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

Çalışma, delikli plakaların akış karakteristiklerinin hem temel hem de mühendislik uygulamaları açısından önemini vurgulamaktadır. Delikli plakaların geometrik parametreleri arasında kalınlık, delik deseni ve gözeneklilik oranı gibi faktörlerin basınç düşüşü üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Laminer akış rejiminde, daha kalın plakalar ve zigzag delik desenleri daha yüksek basınç düşüşlerine neden olurken, türbülanslı akış rejiminde daha ince plakalar ve kare delik desenleri daha yüksek basınç düşüşlerine yol açmıştır. Gözeneklilik oranı arttıkça basınç düşüşü azalmıştır.

Deneysel düzenek, sayısal simülasyonların sonuçlarını doğrulamak amacıyla tasarlanmış ve çeşitli delikli plaka konfigürasyonları test edilmiştir. Deney sonuçları, sayısal simülasyon sonuçlarıyla yüksek uyum göstermiştir.

Numerik simülasyonlar, üç boyutlu kararlı akış çözümleri için Navier-Stokes denklemlerine dayanarak gerçekleştirilmiştir. Laminer akış için tam Navier-Stokes denklemleri kullanılmış, türbülanslı akış için ise RANS denklemleri ve Shear Stress Transport (SST) modeli uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, plaka kalınlığı ve delik deseni gibi geometrik parametrelerin basınç düşüşü üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur.

Orifis ve delikli plakaların basınç kaybı karakteristikleri, çeşitli mühendislik uygulamalarında akış ölçümü ve akış yönetimi için kritik öneme sahiptir.Bu konuda yapılan başka bir çalışmada, Gan ve Riffat'ın [13] , kare kenarlı orifis plakaları ve delikli plakaların basınç kaybı katsayıları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışma, farklı Reynolds sayılarında ince plakalar için basınç kaybı katsayısını belirlemeyi amaçlamaktadır.

Gan ve Riffat [13], kare bir kanal içinde orifis ve delikli plakaların basınç kaybı katsayısını belirlemek için deneysel testler gerçekleştirmiştir.Deneysel sonuçlar, orifis plakası için basınç kaybı katsayısının 3,15 ± 0,14 olduğunu göstermiştir. Bu değer, Miller'in [14] boru akışları için verdiği verilerden daha düşük bulunmuştur. Bu farkı, kanalın merkez çizgisi yakınındaki hava hızının kanal köşelerine göre daha yüksek olması ve dolayısıyla merkezi bölgelerde daha düşük tıkanma etkisi ile açıklamışlardır. Ayrıca, Reynolds sayısının basınç kaybı katsayısı üzerindeki etkisinin türbülanslı akış bölgesinde ihmal edilebilir olduğu bulunmuştur.

Delikli plaka için ölçülen basınç kaybı katsayısı, orifis plakasına göre daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuç, çok delikli plakanın tek delikli plakaya göre daha yüksek akış direncine sahip olduğunu göstermektedir. Delikli plakanın basınç kaybı katsayısının daha yüksek olması, hava akışının plaka çıkışında bir dizi ayrık jet halinde birleşmesi ve bu birleşmenin akış deseninin geometrisini etkilemesi ile açıklanmıştır.

Çalışmada ayrıca, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak plaka kalınlığının basınç kaybı katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. HAD simülasyonları, Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve plaka kalınlığı ile basınç kaybı katsayısı arasındaki ilişki belirlenmiştir. Sonuçlar, plaka kalınlığının artırılmasıyla türbülanslı akışta basınç kaybı katsayısının önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Özellikle, orifis çapının 1,5 katı kalınlığa ulaşıldığında minimum basınç kaybı katsayısı elde edilmiştir.

TFT-LCD fırınlarında cam panellerin sıcaklık uniformitesini iyileştirmek, üretim verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Ngo ve arkadaşlarının [15] çalışmasında, delikli plakalar kullanarak TFT-LCD fırınlarında cam panellerin sıcaklık uniformitesini artırma yöntemi sunulmaktadır. Çalışma, farklı gözeneklilik oranlarına sahip delikli plakaların sıcak hava akışının giriş hızını ayarlamak ve fırın içindeki sıcaklık dağılımını iyileştirmek amacıyla kullanıldığını incelemektedir.

Ngo ve arkadaşları [15], fırında uygun konumlara yerleştirilen delikli plakaların, ısıtma süresini önemli ölçüde azaltabildiğini ve sıcaklık uniformitesini iyileştirebildiğini göstermiştir. İki boyutlu bir termal model geliştirilmiş ve sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak fırındaki ısıtma süresi ve sıcaklık dağılımı simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, delikli plakaların, fırın içindeki farklı bölgelere

yerleştirilerek sıcak hava akışını düzenlediğini ve ısıtma süresini 600 saniyeden 300 saniyeye düşürdüğünü ortaya koymuştur.

Bu çalışma, delikli plakaların gözeneklilik oranlarının fırın içindeki sıcaklık dağılımını nasıl etkilediğini detaylı olarak incelemiştir. Gözeneklilik oranları %20, %50 ve %80 olarak belirlenmiş ve bu oranlar arasındaki farklar analiz edilmiştir. Çalışmanın bulguları, delikli plakaların sıcak hava akışını homojen hale getirerek cam panellerin ısınma süresini kısalttığını ve sıcaklık dağılımını iyileştirdiğini göstermektedir.

Ngo ve arkadaşları [15], delikli plakaların fırının ön ve arka bölgelerine yerleştirilerek akış hızını düzenlediğini ve sıcaklık uniformitesini artırdığını göstermiştir. Simülasyonlar, delikli plakaların fırının önüne yerleştirildiğinde, fırının alt bölgelerinde sıcak hava akışının daha yoğun olduğunu ve üst bölgelerde ise daha az yoğun olduğunu göstermiştir. Bu durum, delikli plakaların sıcak hava akışını daha homojen hale getirerek fırın içindeki sıcaklık farklarını azalttığını göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, TFT-LCD fırınlarında cam panellerin sıcaklık uniformitesini artırmak için delikli plakaların etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, delikli plakaların tasarımında gözeneklilik oranlarının optimize edilmesi gerektiğini vurgulamakta ve enerji verimliliğini artırmak için önemli bilgiler sunmaktadır.

TFT-LCD fırınları gibi aynı şekilde birçok fırında da enerji verimliliği ve termo fluidik özelliklerin optimize edilmesi kritik öneme sahiptir. Lietratürde yapılan başka bir çalışmada ise kurutma fırınları incelenmiştir. Anis ve arkadaşlarının [16] çalışmasında, kurutma fırınlarında delikli plaka geometrisinin hava sıcaklık dağılımı, hız, akış deseni ve basınç üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışma, üç farklı delikli plaka geometrisinin performansını değerlendirmek amacıyla ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon sonuçları, delikli plakaların kullanımı ile fırın içindeki hava sıcaklığı ve hava hızının arttığını, ancak hava basıncının azaldığını ortaya koymuştur. Belirlenen optimum plaka geometrisi, hava akış deseninin en üniform dağılımını sağlamış ve bu da kurutma sürecinin daha etkin ve hızlı olmasına katkıda bulunmuştur.

Sonuç olarak, Anis ve arkadaşlarının çalışması, delikli plakaların termofluidik özelliklerini iyileştirmek ve kurutma sürecinin etkinliğini artırmak için önemli bilgiler sunmaktadır. Bu çalışma, delik çapı, plaka alanı ve diğer geometrik parametrelerin dikkatlice optimize edilmesi gerektiğini vurgulamakta ve enerji verimliliği sağlamak için değerli bir temel oluşturmaktadır.

Delikli plakalarla çalışma yapan başka bir isim ise Shaaban [17] olmuştur. Çalışmasında, delikli plakaların kalıcı basınç kaybını minimize etmek için optimize edilmiş delik geometrisi önerilmiştir. Bu çalışma, optimize edilmiş konvergent-divergent delik geometrisinin, delikli plakaların performansını nasıl iyileştirdiğini incelemektedir.

Shaaban [17], sayısal simülasyonlar kullanarak, optimize edilmiş delik geometrisinin kalıcı basınç kaybını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Çalışmada, farklı delik geometrileri için RANS denklemleri çözülmüş ve optimize edilmiş konvergent-divergent delik geometrisi, kalıcı basınç kaybını çok büyük oranda neredeyse yarısı kadar azaltmıştır. Optimize edilmiş delikli plaka, kavitasyon sayısında önemli bir iyileşme sağlamış ve kavitasyon başlangıcını geciktirmiştir.

Çalışmada, orijinal delikli plaka geometrisi ile karşılaştırıldığında, optimize edilmiş delik geometrisinin basınç kaybı katsayısı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Konvergent açısının (α1) ve divergent açısının (α2) basınç kaybı katsayısı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, konvergent açısının (α1) basınç kaybı katsayısı üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Bu, orijinal plakanın delik giriş bölgesinde yüksek ekserji yıkımının optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Optimize edilmiş delikli plakanın en iyi performansı, konvergent açı $\alpha_1 = 50°$ ve divergent açı $\alpha_2 = 7°$ ile elde edilmiştir.

Sayısal simülasyonlarda, Fluent yazılımı kullanılarak yüksek kaliteli ağ yapıları oluşturulmuş ve enhanced wall treatment uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, orijinal delikli plaka ile deneysel verilerle karşılaştırılmış ve yüksek uyum bulunmuştur. Optimize edilmiş delikli plaka, tüm incelenen Reynolds sayılarında orijinal plakanın basınç kaybı katsayısından önemli ölçüde daha düşük değerler göstermiştir. Bu iyileştirme, akışın düzgünlüğünü artırmış ve türbülans yoğunluğunu azaltmıştır.

Delikli plakaların akış-basınç düşüşü karakteristikleri, akış düzenlemesi ve basınç düşüşünün optimize edilmesi açısından büyük önem taşır. Tanner, Gorman ve Sparrow'un [18] çalışmasında, delikli plakaların akış homjenizasyonu ve basınç düşüşü arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma, sayısal simülasyonlar kullanılarak, farklı delik geometrileri ve gözeneklilik oranlarına sahip plakaların basınç düşüşü karakteristiklerini belirlemeyi amaçlamaktadır.

Tanner ve arkadaşları [18], tek delikli modüler model kullanarak basınç düşüşü verilerini elde etmiş ve bu verileri tam delikli plakalarla karşılaştırmıştır. Sonuçlar, tek delikli modüler modelin, tam bir delikli plaka ile çok iyi uyum gösterdiğini ve daha karmaşık durumların simülasyonuna gerek kalmadan basit modellerin kullanılabileceğini göstermiştir. Çalışmada, delik şekli ve Reynolds sayısı gibi parametrelerin yanı sıra, gözeneklilik oranları (%20-60) ve plaka kalınlıkları da değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırıldığında olumlu sonuçlar vermiştir.

Sonuçlar, gözeneklilik oranlarının artmasıyla birlikte basınç düşüşünün azaldığını göstermiştir. Ayrıca, plaka kalınlığının artmasıyla basınç düşüşü üzerinde önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur. Bu bulgular, plaka tasarımında gözeneklilik oranlarının ve plaka kalınlıklarının optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Literatürde yapılan başka bir çalışmada ise, Çelik ve arkadaşları [19] Taguchi yöntemi kullanılarak delikli plakaların tasarım parametrelerinin optimizasyonu incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, farklı parametrelerin delikli plakaların basınç kaybı üzerindeki etkilerini belirlemek ve optimum tasarımı gerçekleştirmektir.

Çelik ve arkadaşları [19], ANSYS-CFX yazılımı kullanarak delikli plakaların akış karakteristiklerini simüle etmişlerdir. Çalışmada, Reynolds sayısı, gözeneklilik, plakanın boyutsuz kalınlığı ve delik deseni gibi tasarım parametrelerinin basınç kaybı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan optimizasyon analizinde, (Re = 15000, gözeneklilik = %50,3, kalınlık/delik çapı = 1 ve merdiven tipi delik deseni) kombinasyonu en uygun değerler olarak belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, basınç kaybı üzerindeki en etkili tasarım parametresi %92 ile gözeneklilik iken, en az etkili olanı %0,2 ile delik deseni olarak bulunmuştur.

Çalışmanın önemli bir sonucu, Taguchi yönteminin sayısal simülasyonlar için güçlü bir araç olduğunu göstermesidir. Taguchi yöntemi, deney sayısını azaltarak zamandan ve kaynaklardan tasarruf sağlar. Bu yöntem, plaka tasarımında kullanılan parametrelerin optimize edilmesi ve akış düzenlemesi açısından değerli bilgiler sunmaktadır.

Delikli plakalar ayrıca, elektrostatik çökelticilerde, geniş açılı difüzörlerde gaz akışını kontrol etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Marković ve arkadaşlarının [20] çalışmasında, delikli plakaların kanalın kesitinde çeşitli konumlarda yer aldığı durumlarda akış üzerindeki etkilerini inceleyen sayısal bir araştırma yapılmıştır. Çalışmanın amacı, plakanın kanal kesitindeki konumunun akış üzerindeki etkilerini araştırmaktır.

Marković ve arkadaşları [20], ANSYS CFX yazılımı kullanarak delikli plakaların ince gözenekli ortam olarak modellenmesini içeren sayısal deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu modelleme, plaka konumunun akış üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılmıştır. Çalışmada, akışkanın plaka etrafındaki basınç düşüşü ve hız dağılımı sonuçları, tam 3D plaka modelinin HAD simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ince gözenekli plaka modeli kullanıldığında basınç düşüşü ve hız dağılımı sonuçlarının makul bir uyum sağlamak için akış yönündeki geçirgenlik değerinin ayarlanması gerektiğini göstermiştir.

Deneysel araştırmalar, gözenekliliğin basınç düşüşü üzerindeki en etkili tasarım parametresi olduğunu, Reynolds sayısı ve açıklık dağılım düzeninin ise en az etkili olduğunu göstermektedir. Ayrıca, plaka kalınlığının ve delik deseninin laminer ve türbülanslı akış rejimlerindeki etkileri de incelenmiştir. Sonuçlar, laminer akış durumunda daha kalın plakanın daha yüksek basınç düşüşlerine yol açtığını, türbülanslı akış durumunda ise daha ince plakanın daha yüksek basınç düşüşüne neden olduğunu göstermektedir.

Havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak, mekanlarda sağlıklı ve konforlu bir ortam sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Khovanskyi ve arkadaşlarının [21] çalışmasında, delikli plakaların aerodinamik ve termal performanslarını iyileştirmek amacıyla yapılan sayısal simülasyon ve deneysel araştırmalar incelenmiştir. Çalışma, havalandırma

sistemlerinde kullanılan hava dağıtım cihazlarının tasarım parametrelerinin optimizasyonuna odaklanmaktadır.

Khovanskyi ve arkadaşları [21], ANSYS CFX yazılımı kullanarak delikli plakalarla donatılmış hava dağıtım cihazlarının aerodinamik ve termal analizlerini gerçekleştirmiştir. Çalışmada, farklı tasarımların akış hızı, hava hızı, hidrolik kayıplar ve sıcaklık üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, delikli plakaların kullanımının, çıkış hızını azaltarak ve hız alanının üniform dağılımını sağlayarak hidrolik kayıpları %2,5 ila %3,0 oranında azalttığını göstermiştir. Üç faktörlü faktöriyel deneyler kullanılarak, ortalama hızın debi, plaka alanı ve delik çapına bağlılığı belirlenmiş ve bu bağımlılık çok parametreli yarı-lineer regresyon analizleri ile geliştirilmiştir.

Çalışmada, delikli plaka tasarımlarının optimizasyonu için geliştirilen matematiksel modeller kullanılmıştır. Bu modeller, ortalama hava hızı ve hidrolik kayıpların analitik olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Sayısal simülasyonlar, farklı tasarım parametrelerinin hava dağılımı üzerindeki etkilerini incelemek için kullanılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır.

Ayrıca, çalışmada önerilen tasarımların hidrolik kayıpları azaltma ve çıkış hızını üniform dağıtma konusundaki etkinliği değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, delikli plakaların geometrik parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini ve havalandırma sistemlerinin enerji verimliliğini artırmak için kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Başka bir çalışmada ise, Guo ve arkadaşları [22], delikli plakaların gaz akışı üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiş ve farklı geometrik parametrelerin basınç kaybı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma, elektrostatik çökelticilerde (ESP) ve geniş açılı difüzörlerde akış düzenlemesini optimize etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Guo ve arkadaşları [22], delikli plakaların mikro ölçekli hücre modellerini oluşturmuş ve çeşitli parametrelerin akış deseni ve basınç kaybı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada incelenen parametreler arasında Reynolds sayısı, gözeneklilik oranı, delik çapı, plaka kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve plaka eğim açısı bulunmaktadır. Sonuçlar, büyük akış yapılarının plakanın arkasında genişleme

alanında oluştuğunu ve basınç kaybının bu alanlar tarafından belirlendiğini göstermiştir.

Simülasyon sonuçları, mevcut literatürdeki deneysel veriler ve ampirik denklemlerle yüksek uyum göstermiştir. Basınç kaybının, plakanın kalınlığından ziyade deliklerin arkasındaki genişleme alanında meydana geldiği ve toplam basınç kaybının plaka kalınlığı ile sınırlı olmadığı bulunmuştur. Bu durum, mevcut gözenekli ortam modellerinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Çalışmanın önemli bulgularından biri, plaka kalınlığının delik çapına oranının basınç kaybı katsayısı üzerindeki etkisidir. Simülasyonlar, plaka kalınlığının artmasıyla birlikte basınç kaybı katsayısının azaldığını, ancak bu etkinin plaka kalınlığının delik çapına oranı 2,0'ı geçtikten sonra sabit kaldığını göstermiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün Reynolds sayısı 1000'in üzerinde olduğu durumlarda basınç kaybı katsayısını hafifçe azalttığı bulunmuştur. Eğim açısının artmasıyla basınç kaybı katsayısının arttığı ve bu etkinin plaka eğim açısı 30°'yi geçtiğinde belirginleştiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın literatüre katkısı, değişken parametrelerinin basınç kaybı üzerindeki etkisini hem sayısal hem de deneysel yöntemlerle inceleyerek doğruluk açısından güçlü bir karşılaştırma sunmasıdır. Mevcut çalışmalar genellikle yalnızca sayısal analizlere dayanmakta veya deneysel verilerle sınırlı kalmaktadır. Ancak bu çalışmada, farklı gözeneklilik oranları, delik çapları ve plaka kalınlıklarının etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş, elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak aralarındaki fark %6 gibi düşük bir sapma ile doğrulanmıştır. Ayrıca, klasik analiz yöntemlerinin ötesine geçilerek istatistiksel yöntemler kullanılmış, elde edilen veriler regresyon analizi ve varyans analizi gibi tekniklerle değerlendirilerek sonuçların güvenilirliği artırılmıştır. Bu sayede, parametrelerin basınç kaybı üzerindeki etkileri sadece görsel ve sayısal karşılaştırmalarla değil, aynı zamanda istatistiksel anlamlılık açısından da ortaya konmuştur. Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden farklı olarak, akış homojenliğini artırmaya yönelik optimizasyon stratejileri de değerlendirilmiş ve sonuçlar istatistiksel analizlerle desteklenerek mühendislik açısından uygulanabilirliği yüksek bir çerçeve sunulmuştur.

3
SAYISAL MODELLEME VE SİMULASYON

3.1 Sayısal Modelleme Yaklaşımı (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

Mühendislikte karşılaşılan basit ya da karmaşık akışkanlar dinamiği problemleri sayısal modelleme ve simülasyon yaklaşımlarıyla çözümlenebilir. Bu yaklaşımlardan biri ise hesaplamalı akışkanlar dinamiğidir. HAD, akışkanlar dinamiği problemlerini çözmek için sayısal analiz tekniklerinin kullanıldığı bir yöntemdir ve Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesine prensibine dayanmaktadır. [23].

3.1.1 Yönetici Denklemler

Hesaplamalalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılırken, temelinde Navier-Stokes denklemleri kullanılmaktadır. Navier-Stokes denklemleri, akışkanlar dinamiğinin temelini oluşturan ve akışkanların hareketini tanımlayan kısmi diferansiyel denklemlerdir. [24]

Navier-Stokes denklemleri, üç boyutlu bir alandaki akışkanın hız vektörünü u, v, w ve basınç, yoğunluk, viskozite gibi temel parametrelerin nasıl değiştiğini belirler. Bu denklemler, akışkanın içinde oluşan kuvvet dengelerini dikkate alarak, özellikle Newtonian akışkanların hareketini modellemek için kullanılır. [25] Genel olarak bir Newtonyen akışkan için Navier-Stokes denklemleri şu şekilde yazılabilir:

3.1.1.1 Kütle Korunumu Denklemi (Süreklilik)

Bu denklem, akışkanın belirli bir hacim içinde kütle korunumunu ifade eder. Sıkıştırılabilir bir akışkan için genel süreklilik denklemi (3.1) şu şekildedir: [26]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla . (\rho u) = 0 \tag{3.1}$$

3.1.1.2 Momentum Korunum Denklemi

Momentum denklemi (3.2), Newton'un ikinci yasasına dayanmaktadır ve bir akışkanın hareketini momentum korunumuna göre tanımlar: [26]

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \mathrm{t}} + \nabla.(\rho \mathrm{uu}) = -\nabla \mathrm{p} + \mu \nabla^2 u + f_e \tag{3.2}$$

Bu denklem, akışkanın bir hacim içerisindeki momentum değişimini ifade ederken, viskoz kuvvetler, basınç gradyanı ve dış kuvvetlerin etkilerini de içerir.

3.1.1.3 Enerji Korunum Denklemi

Enerji denklemi (3.3), akışkanın bir sistem içerisindeki enerji değişimini ifade eder. Bir akışkanın ısı transferi, iç enerji ve mekanik enerji değişimlerini içeren enerji korunum denklemi şu şekildedir:

$$\frac{\partial E}{\partial \mathrm{t}} + \nabla.(\mathrm{E} + \mathrm{p})\mathrm{u} = \nabla.(\mathrm{k}_i \nabla \mathrm{T}) + \phi \tag{3.3}$$

HAD yöntemi, akışkanların hareketini sayısal olarak modellemek ve basınç, hız, sıcaklık ve türbülans gibi parametreleri analiz etmek için kullanılmaktadır. HAD'ın temel ilkesi, karmaşık bir fiziksel alanı küçük hücrelere (mesh) ayırarak, bu hücrelerde denklemlerin sayısal çözümlerini gerçekleştirmektir. Bu yöntemle, akışkanın genel davranışı öngörülebilir hale gelmektedir.

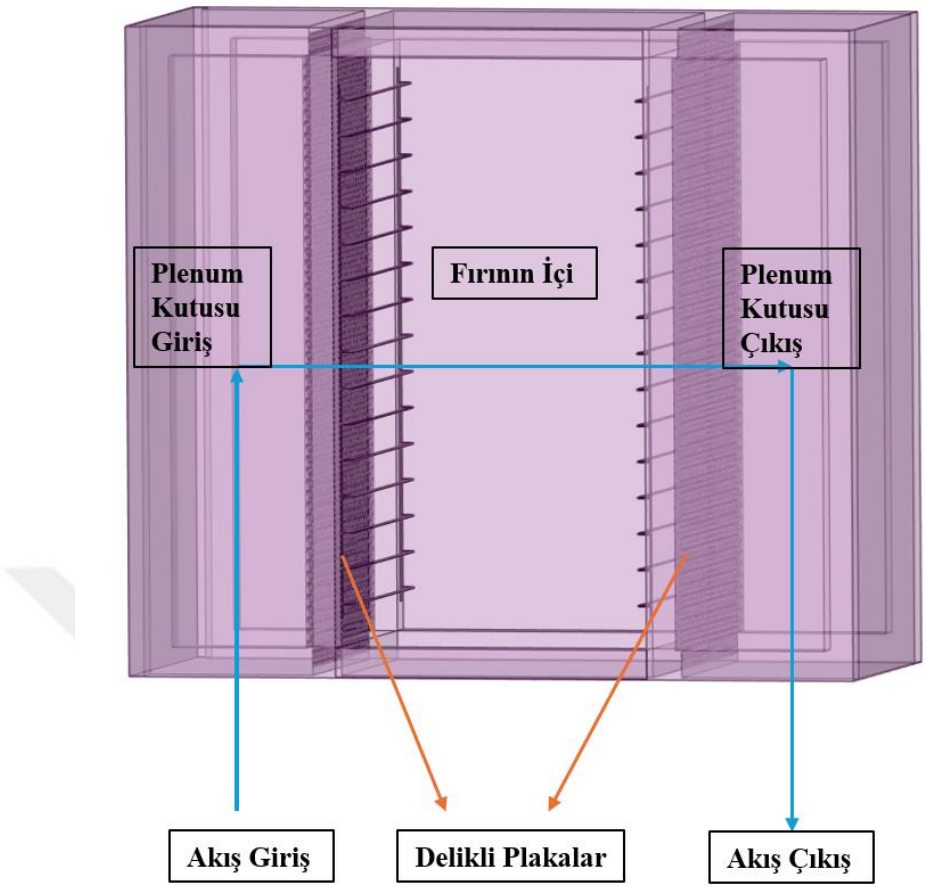
HAD yaklaşımında temel olarak izlenilen adımlar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Geometrinin Tanımlanması: Sayısal modelleme sürecinin ilk adımı, fiziksel sistemin geometrisinin oluşturulmasıdır. Bu adımda, incelenen alanın 2D ya da 3D modeli bilgisayar ortamında oluşturulur ve analiz için gerekli bölgeler belirlenir.
- Ağ Yapısının Oluşturulması (Meshing): Geometri oluşturulduktan sonra, analiz yapılacak alan bir dizi hücreye veya elemana bölünür. Bu işlem, HAD'ın doğruluğu açısından kritik bir öneme sahiptir; daha yoğun ve kaliteli bir ağ yapısı, daha doğru sonuçlar vermesi beklenmektedir. En nihayetinde bir yaklaşım metodu olduğu için yüzde yüz bir doğruluk hiçbir zaman beklenilmemelidir.

- Sınır ve Başlangıç Koşullarının Belirlenmesi: Sınır koşulları, oluşturulmak istenilen fiziksel modeli tanımlamak için kullanılır. Örneğin sistemin bulunduğu ortamın sıcaklığı, basıncı, ortamda bulunan akışkanın fiziksel ve kimyasal özellikleri gibi değerleri tanımlanmsını sağlar. Başlangıç koşulları ise modelin başlangıcında sistemin sıfır anındaki durumunu tanımlar. Sınır koşulları ve başlangıç şartlarıda, tıpkı mesh yapısı gibi simülasyonların doğruluğunu büyük ölçüde etkiler.
- Türbülans Modelleme: Akışkanlar dinamiği problemlerinde türbülans önemli bir faktördür. Türbülans modellenirken RANS, LES ve DNS denklemleri kullanılmaktadır. LES ve DNS denklemleri, oluşturulan fiziği çok iyi çözebilirken aynı zamanda RANS'a göre çok daha fazla kaynak kullanım gereksinimleri vardır. Bu nedenle, endüstrideki bir çok uygulama için yeterli doğrulukta bir yaklaşım veren, RANS denklemleri genellikle kullanılmaktadır. k-epsilon (k-ε) ve k-omega (k-ω) gibi türbülans modelleri, akışkanların kararsız hareketini simüle etmek için çoğu uygulamada doğru tahminler yapmakatdır.
- Sonuçların Çözülmesi ve Analizi: HAD yazılımları kullanılarak denklemler iteratif bir şekilde çözülür. Bu aşamada, çeşitli iterasyonlar sonucunda oluşturulan fiziğe göre basınç, hız ve sıcaklık dağılımları gibi sonuçlar elde edilir.

3.2 Model Kurulumu

Hali hazırda tasarlanmış bir endüstriyel fırında homojen akış dağılımı istenmektedir (Şekil 3.1). Fırında elde edilecek uniform dağılım sayesinde hem enerji tasaraffu sağlanmış olacak, hem de ürünlerin üzerinde oluşacak olan hava dağılımı eşit olacaktır. Bu şekilde tüm ürünler aynı derecede ve eşit miktarlarda pişecektir. Fırın içindeki akışı üniform yapmak için bir çok yöntem bulunmaktadır. Delikli plakalar ise bu yöntemlerden birisidir. Bu çalışma kapsamında, fırının giriş ve çıkış kısımlarına yerleştirilecek olan delikli plakaların optimum tasarımının bulunması hedeflenmiştir.

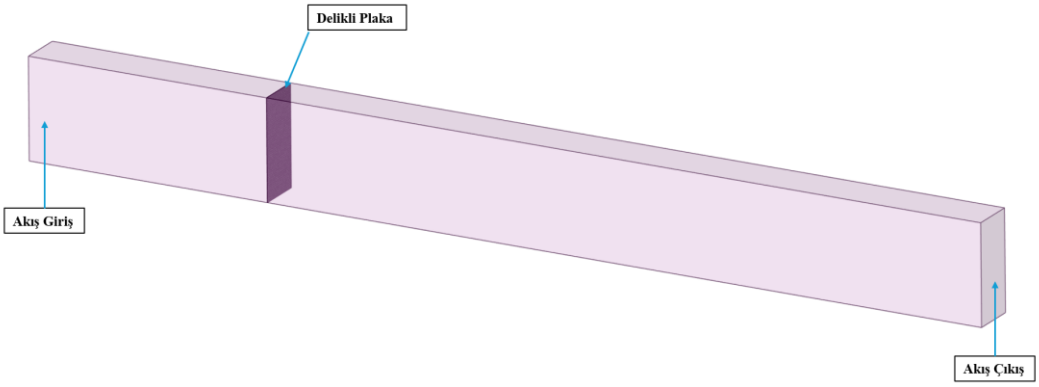


Şekil 3. 1 Endüstriyel fırın geometrisi

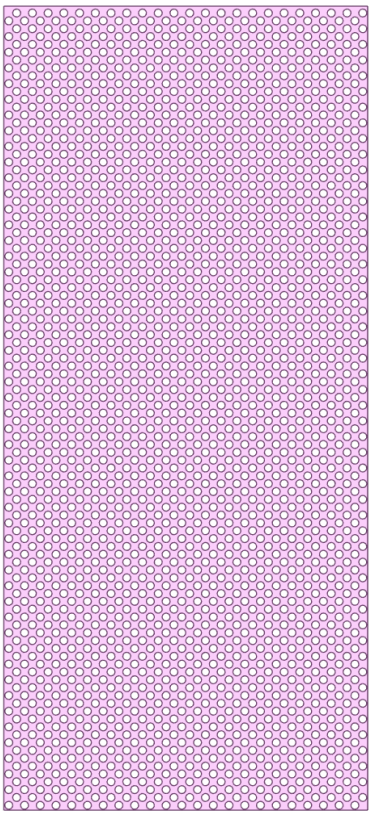
3.2.1 Geometri

Tezde ele alınan geometri, büyük bir endüstriyel fırın içinde akışın homojen bir şekilde dağılımını sağlamak amacıyla tasarlanmış delikli plakalara dayanmaktadır. Ancak, fırının genel geometrisi oldukça büyük ve karmaşık olduğu için, tüm fırını modelleyip delikli plaka optimizasyonu yapmak hesaplama açısından son derece maliyetli olacaktır. Bu nedenle, daha verimli bir yaklaşım benimsenmiştir.

Delikli plakaların fırın içindeki akışı homojenleştirme amacıyla kullanılması, plakaların geometrik parametrelerinin dikkatlice optimize edilmesini gerektirir. Bu kapsamda, delik çapı, plaka kalınlığı, gözeneklilik oranı ve delik dizilimi gibi parametreler optimize edilmiştir. Ancak, tüm fırın geometrisi içinde delikli plakaların analiz edilmesi zaman alıcı olduğu için, optimizasyon sürecinde ilk olarak delikli plaka yerel bir bölge içerisinde, yani tek başına ele alınmıştır.(Şekil 3.2 ve 3.3). Geometriler SpaceClaim 23.2 aracılığıyla modellenmiştir.



Şekil 3. 2 Delikli plaka akış hacmi



Şekil 3. 3 Delikli plaka

Delikli plaka optimizasyon sürecinde, tüm plakadaki deliklerin modellenmesi hesaplama açısından oldukça karmaşık ve zaman alıcı olabileceği için, basitleştirilmiş bir model tercih edilmiştir. Tanner ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada [18], bir delikli plaka üzerindeki deliklerin her birinin benzer basınç

kaybına neden olduğunu ve tek bir deliğin ya da çok daha az bir grup deliğin simüle edilmesiyle tüm plakanın basınç kaybının yeterince doğru bir şekilde modellenebileceğini göstermektedir. Denklem (3.4)

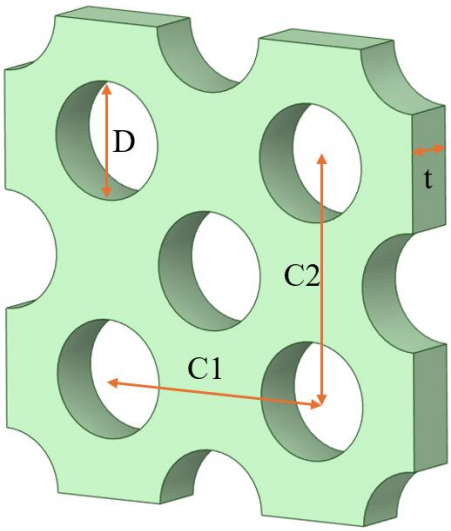
$$\frac{\Delta p}{\rho U_0^2} Re_0 = \alpha + \beta Re_0 \tag{3.4}$$

Burada,

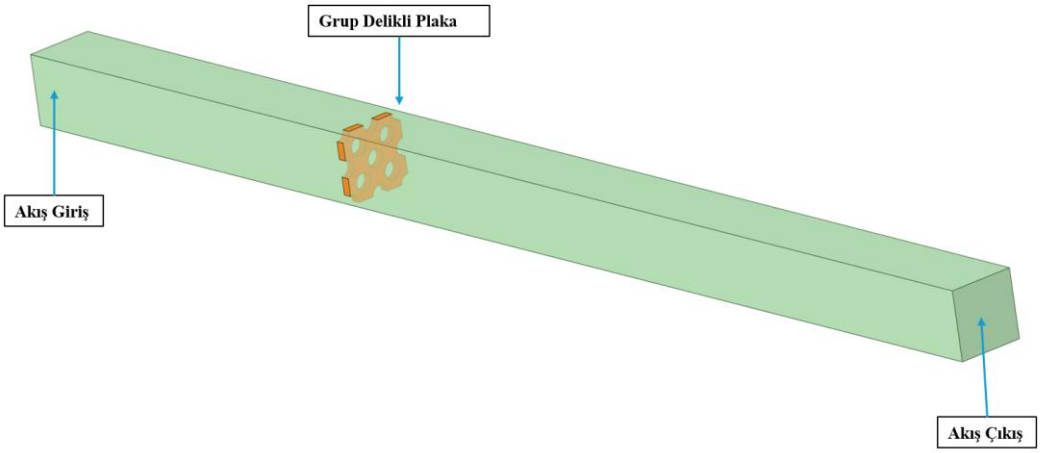
$$Re_0 = \frac{\rho U_0 D_0}{\mu} \tag{3.5}$$

Δp delikli plakadaki basınç kaybını ifade ederken, $\rho U_0^{\,2}$ deliklerde oluşan dinamik basıncı, α ve β, deneysel verilerle belirlenen katsayıları, U_0 delikteki hızı, D_0 delik çapını vermektedir.

Bu bağlamda, delikli plakanın basınç düşüşünü ve akış karakteristiklerini anlamak için önce küçük bir grup delik üzerinden simülasyonlar yapılmıştır. Bu yöntem, basınç kaybı ve akış homojenliğini belirlemek için kullanılan modelin hesaplama süresini büyük ölçüde azaltmıştır. Grup delik modeli ile elde edilen sonuçlar, plakanın tümündeki basınç kaybını ve akış dağılımını yeterince doğru bir şekilde yansıtabilmiştir. Böylece, çok delikli model yerine grup delikli model kullanılarak simülasyon süreleri kısaltılmış, hesaplama maliyetleri düşürülmüş ve optimizasyon süreci hızlandırılmıştır. Kullanılan grup delik modeli (Şekil 3.4) ve ona göre oluşrulmuş akış hacmi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 4 Tek grup delikli plaka modeli



Şekil 3. 5 Tek grup delikli plaka modeli akış hacmi

Şekil 3.4'te gösterilen C1 ve C2 katsayıları, modelde her zaman 2D olarak seçilmiştir. (C1=C2=2D). D çalışılan delikli plakanın çapını temsil ederken, t plaka kalınlığını göstermektedir. Boşluk oranı (f) ise denklem (3.6)'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$f = \frac{1.5705D^2}{C1C2} \tag{3.6}$$

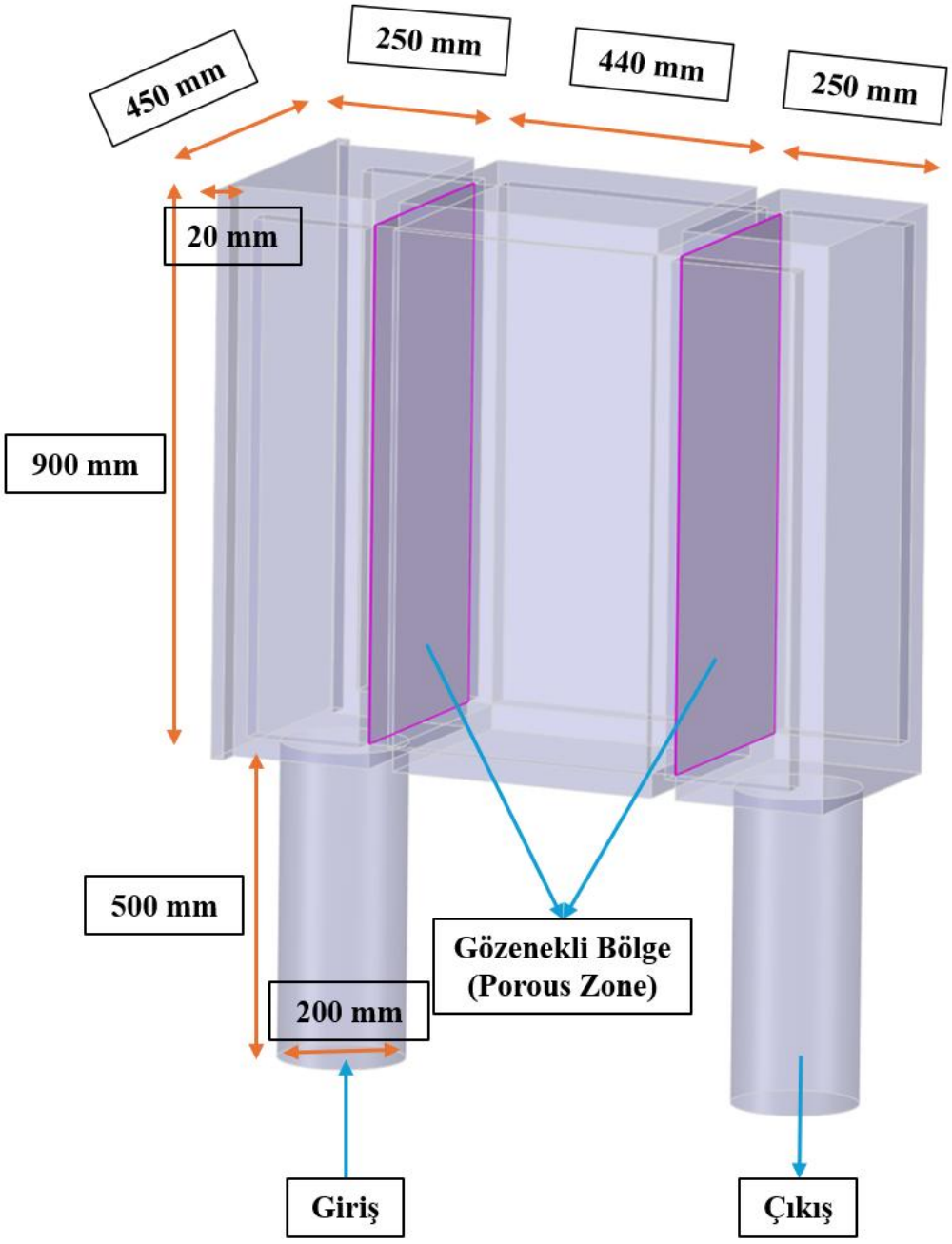
Bu modelin akış hacmi oluşturulurken (Şekil 3.5), akışın giriş kısmı delikli plakadan 50D ve çıkış kısmı ise 100D uzaklık olacak şekilde modellenmiştir. Bu sayede giriş ve çıkış bölgelerindeki vorteksler ve geri akış problemlerinin önüne geçilmiştir.

Simülasyonlarda kullanılan delikli plaka geometrisi şu temel parametrelerle karakterize edilmiştir:

- Delik Çapı: 0,5 mm ile 4 mm arasında değişen farklı çap geometrileri oluşturulmuştur.
- Boşluk Oranı (f): %20 ile %60 arasında değişmiştir.
- Plaka Kalınlığı: 0,5 mm ,1mm,2 mm ve 4 mm plaka kalınlıkları denenmiştir.
- Delik Dizilimi: Delikler, akışın üniform hale getirilmesi amacıyla belirli düzenlerde sıralanmıştır. Karışık dizilim tercih edilmiştir.

Daha sonra bu optimizasyon parametreleri ve farklı hızlarda analizler koşturularak hızlara göre basınç kaybı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre fırın

modeli için gözenekli bölge (porous zone) yaklaşımı kullanılarak, iç hacimde maksimum üniformite ve minimum basınç kaybı verecek olan plaka geometrisi belirlenmiştir. Gözenekli bölge modeline sahip HAD fırın modeli Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 6 Gözenekli fırın modeli

Modelde ölçüsü verilmeyen bütün çıkıntılar 40 mm uzunluğundadır. Bu model oluşturulurken giriş ve çıkış bölgeleri uzatılmıştır. Bu sayede, giren akışın tam olarak gelişmiş akış olarak sisteme girmesi sağlanmıştır. Aynı şekilde çıkış bölgesi

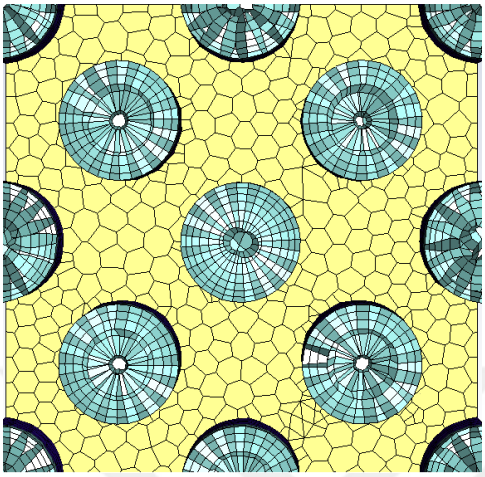
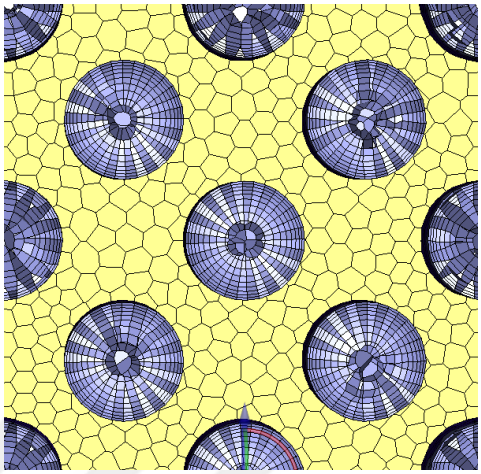
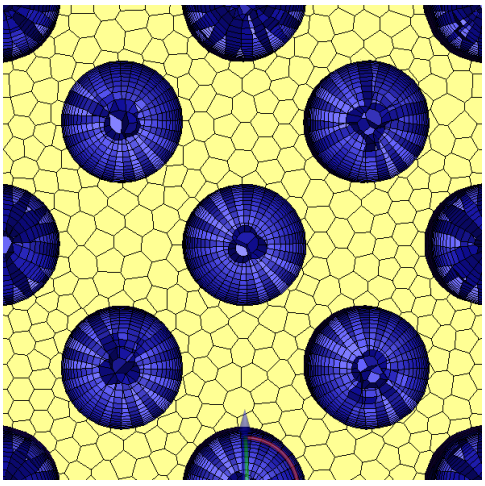
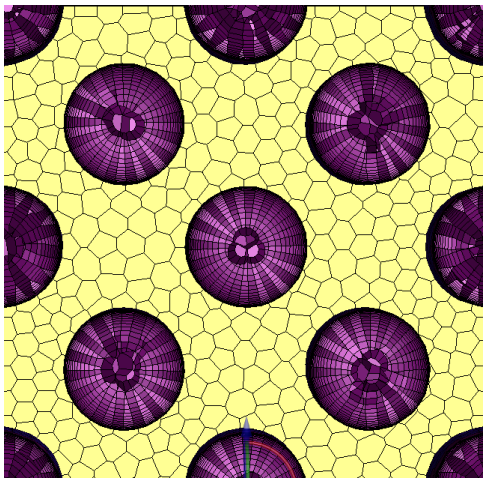
de genişleterek, çıkış bölgesinde meydana gelebilecek geri akımlardan dolayı doğacak olan hatalı hesaplamaların ve yakınsama problemlerinin önüne geçilmiştir. Gözenekli bölgenin kalınlığı,kullanılan delikli plaka kalınlığıyla aynı tutulmuştur. Geçirgenlik katsayıları plaklardan elde edilen basınç-hız grafiğine göre elde edilmiştir. Daha detaylı bilgi sınır şartları ve çözücü ayarları kısmında paylaşılmıştır.

3.2.2 Ağ Örgüsü (Meshing)

HAD analizlerinde, doğru sonuçlar elde etmek için meshing işlemi oldukça önemlidir. Bu süreçte, modelin geometrisi küçük hücrelere veya elemanlara bölünerek çözüm alanı oluşturulur. Her bir hücrede, akışkanın hareketi ve diğer fiziksel özellikleri hesaplanır. Meshing, çözüm doğruluğunu etkileyen kritik bir adımdır. Çok yoğun (küçük elemanlar) bir ağ yapısı daha hassas sonuçlar verirken, daha büyük elemanlar çözüm süresini kısaltabilir, ancak doğruluk kaybına neden olabilir. Bu yüzden, özellikle delikli plakalar gibi karmaşık geometrilerde, ağ yapısının doğru seçilmesi büyük önem taşır. Bu optimizasyon, hem doğru sonuçlar elde etmek hem de simülasyon süresini dengelemek için gereklidir.

Bunun nedenle mesh bağımsızlığı yapılması gerekmektedir. Öncelikle tek gruplu delikli plaka geometrisi için mesh bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. Bu çalışma en küçük çaplı (0,5 mm) ve 1 mm kalınlıklı geometri üzerinden gerçekleştirilmişitr. Böylece yapılacak olan mesh bağımsızlığı sonucundaki mesh ayarları diğer geometriler içinde kabul edilebilir olacaktır.

Mesh bağımsızlığı, ilk önce delik geometrisinin çevresindeki sınır tabakada daha sonra ise genel hacimde kontrol edilmiştir. Şekil 3.7’de sınır tabakada kullanılan ağ örgüleri ve ayarları gösterilmiştir. Ağ örgüleri Fluent meshing 23.2 paket programıyla oluşturulmuştur.

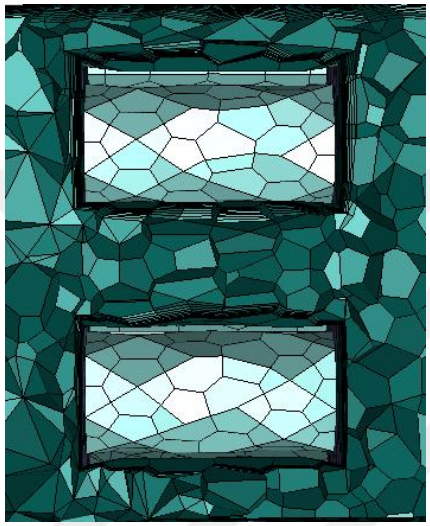
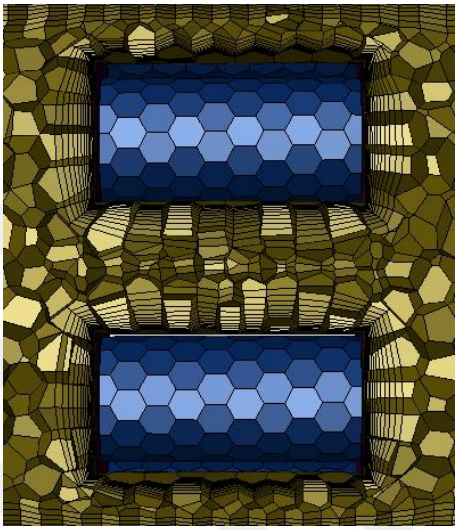
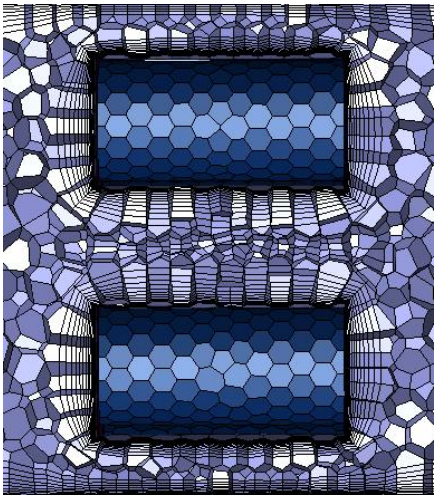
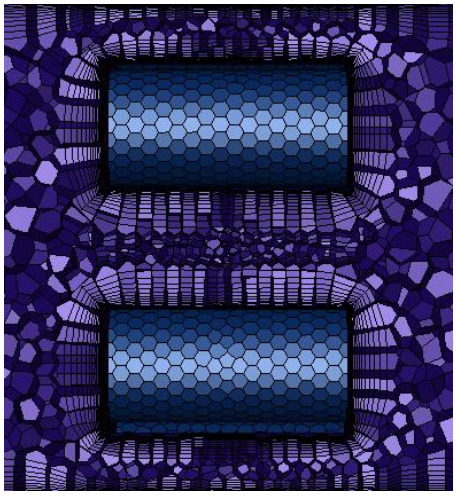
Mesh-1: 5 Tabaka, 4,16e-5 İlk Tabaka Kalınlığı, Maksimum y+ 1,86	Mesh-2: 8 Tabaka, 1e-5 İlk Tabaka Kalınlığı, Maksimum y+ 0,65
	
Mesh-3: 12 Tabaka, 4e-6 İlk Tabaka Kalınlığı, Maksimum y+ 0,3	**Mesh-4: 15 Tabaka, 2,2e-6 İlk Tabaka Kalınlığı,Maksimum y+ 0,16**
	

Şekil 3. 7 Sınır tabaka bağımsızlığı

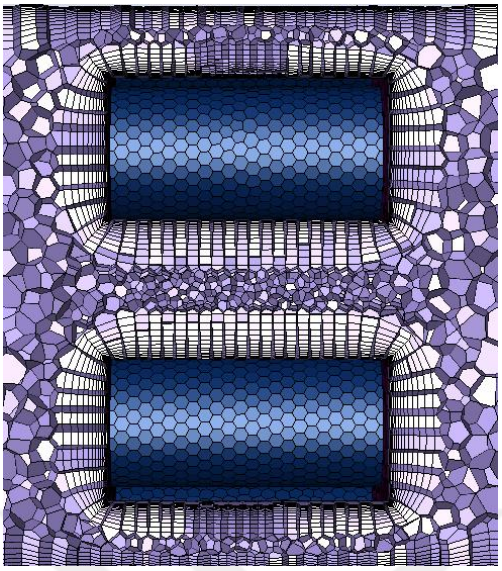
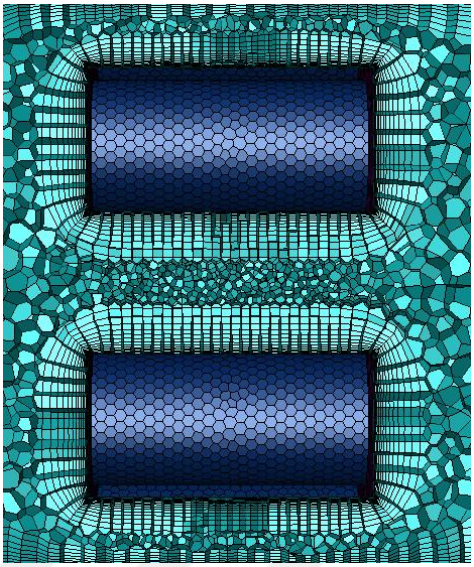
Karşılşatırmalar Fluent 23.R2 çözücüsü kullanılarak ve 2,5 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Verilen y+ değerleri Fluent çıktısı olup, yüzeyler üzerindeki maksimum değerlerdir. Bu dört ağ yapısı karşılaştırılması yapılırken, kanalda oluşan basınç kayıpları ve deliklerdeki ortalama hız değerleri göz önünde

bulundurulmuştur. Mesh-3 ile Mesh-4 arasında fark %1'den az olduğu için Mesh-3 ile devam edilmesine karar verilmiştir.

Seçilen sınır tabaka ayarlarıyla bu kez de, bütün hacim için mesh bağımsızlığı çalışması gerçekleştirilmiştir. Altı farklı ağ örgüsü oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ örgüleri Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

Mesh-1	**Mesh-2**
	
Mesh-3	**Mesh-4**
	

Şekil 3. 8 Tek grulu delikli plaka modeli mesh bağımsızlığı

Mesh-5	Mesh-6
	

Şekil 3. 8 Tek grulu delikli plaka modeli mesh bağımsızlığı(devamı)

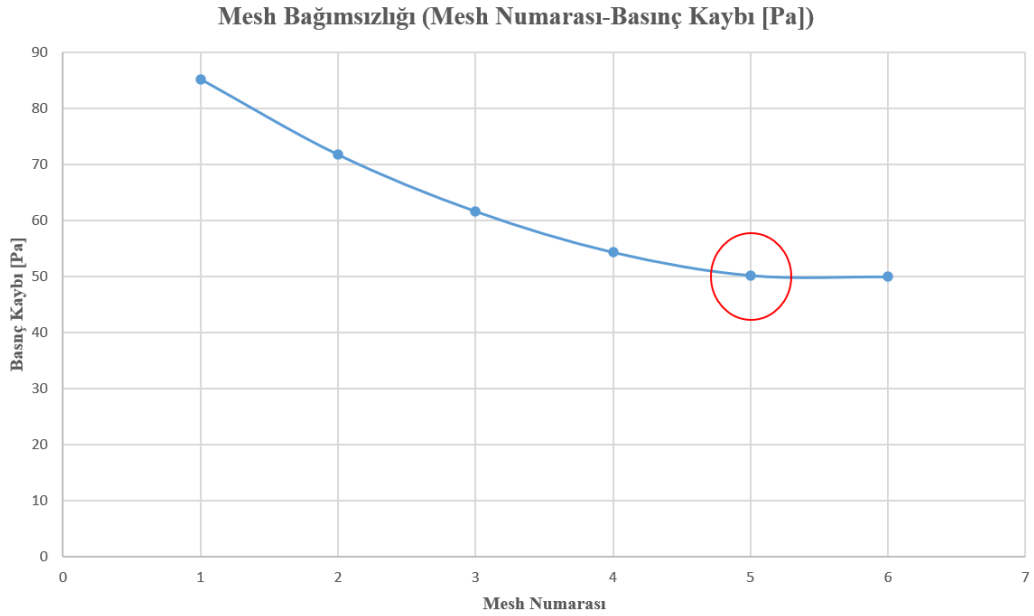
Oluşturulan ağ örgülerinin özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Ağ örgüleri karşılaştırmaları yapılırken 2,5 m/s hızda, kanal geometrilerinde oluşan basınç kayıplarına ve deliklerin olduğu bölgedeki hız ortalamaları referans alınmıştır. 8Mesh bağımsızlığı grafiğine (Şekil 3.9) bakıldığında basınç düşüşlerinde çok az değişikler olduğu görülmektedir. Mesh sayılarındaki farklılıkta göz önünde bulundurulduğunda, 5 numaralı mesh yapısıyla devam edilmesine karar verilmiştir.

Tablo 3. 1 Mesh bağımsızlığı basınç ve hız değerleri

Ağ Örgüsü İsmi	Ağ Örgüsü Eleman Sayısı	Basınç Kaybı [Pa]	Ortalama Hız [m/s]
Mesh-1	44557	85,23	7,1
Mesh-2	129012	71,75	6,7
Mesh-3	190970	61,62	6,59
Mesh-4	400302	54,31	6,5

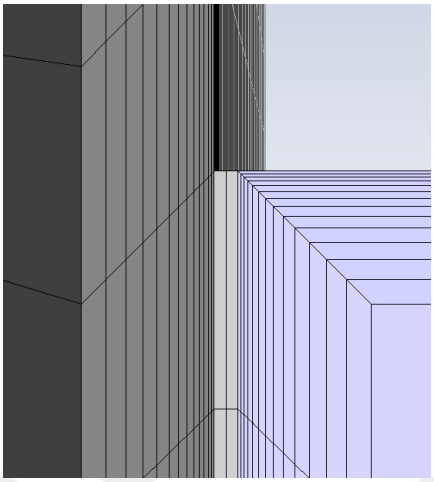
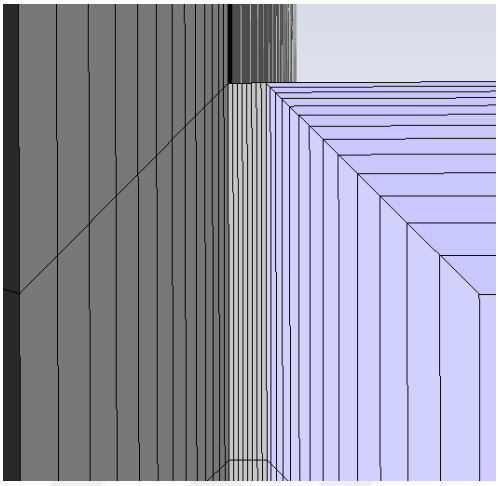
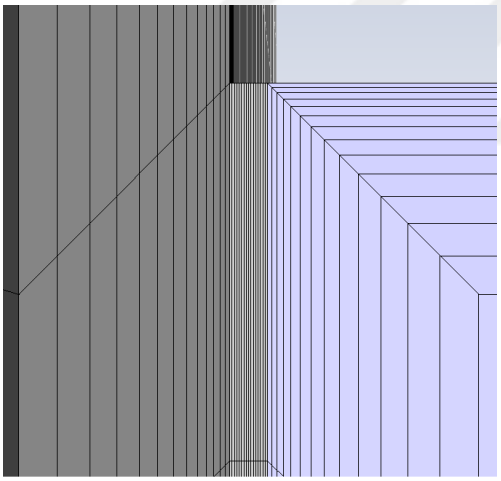
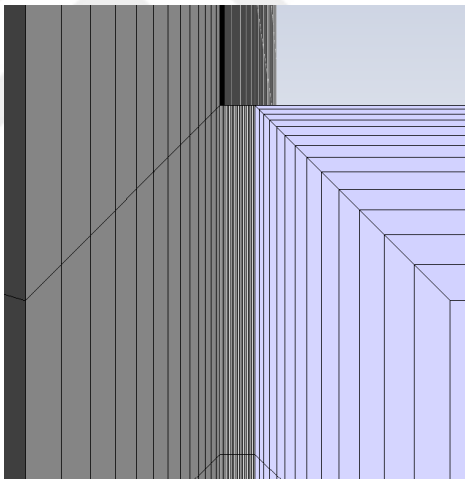
Tablo 3. 1 Mesh bağımsızlığı basınç ve hız değerleri (devamı)

Mesh-5	677649	50,18	6,45
Mesh-6	979880	49,95	6,44



Şekil 3. 9 Tek gruplu delilkli plaka modeli mesh bağımsızlığı

Seçilen ağ örgüsü ayarlarıyla plaka optimizasyon parametrelerinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz çıktıları kullanılarak gözenekli fırın modeli için girdiler oluşturulmaktadır. Bu nedenle gözeneklli fırın modeli (Şekil 3.6) içinde bir mesh bağımsızlığı çalışması yapılması gerekmektedir. Bu model için mesh bağımsızlığı yapılırken öncelikle gözenekli bölgedeki eleman sayısının etkisine bakılmıştır. Bunun için dört farklı hexcore mesh ANSYS Meshing 23.2 paket program kullanılarak oluşturulmuştur. (Şekil 3.10)

Mesh-1: Gözenekli Bölge 2 Eleman	Mesh-2: Gözenekli Bölge 8 Eleman
	
Mesh-3: Gözenekli Bölge 16 Eleman	**Mesh-4: Gözenekli Bölge 20 Eleman**
	

Şekil 3. 10 Gözenekli bölge mesh bağımsızlığı

Mesh bağımsızlığı karşılaştırması yaparken kullanılan hız 2,5 m/s'dir. Ayrıca karşılaştırma paramateresi olarak homojenlik indeksi (üniformite indeks) parametresi kullanılmıştır. Bu parametre, belirlenen bir alan üzerinde bir alan değişkeninin (örneğin hız, sıcaklık veya basınç gibi) nasıl değiştiğini ölçer. 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Değer 1'e yaklaştıkça homojenliğin arttığını gösterirken, uzaklaştıkça homojenliğin azaldığını ifade eder.

3.2.2.1 Homojenlik İndeksi

Fırın içindeki akışın homojenlik indeksi, fırını on iki eşit parçaya bölen düzlemler üzerinden hesaplanmıştır. Her bir düzlemde ortalama hız değeri (ϕ) için homojenlik indeksi değeri hesaplanmış ve sonuçlar mesh bağımsızlığını değerlendirmek için karşılaştırılmıştır.

Alan ağırlıklı homojenlik indeksi (γ_a), belirli bir alan değişkeninin yüzey üzerindeki değişimini denklem (3.7)'daki gibi hesaplanmaktadır:

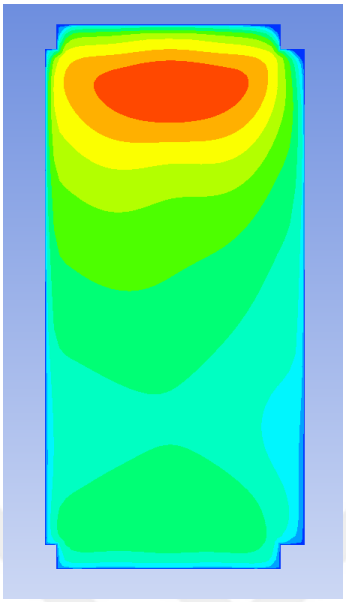
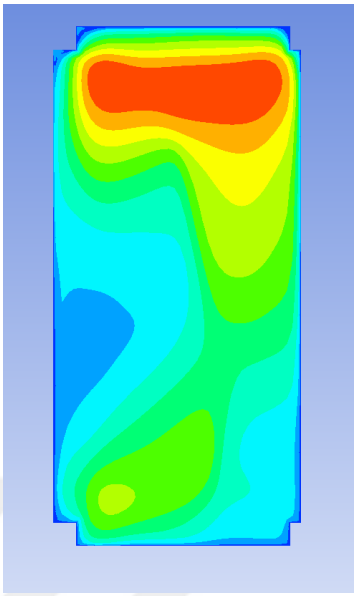
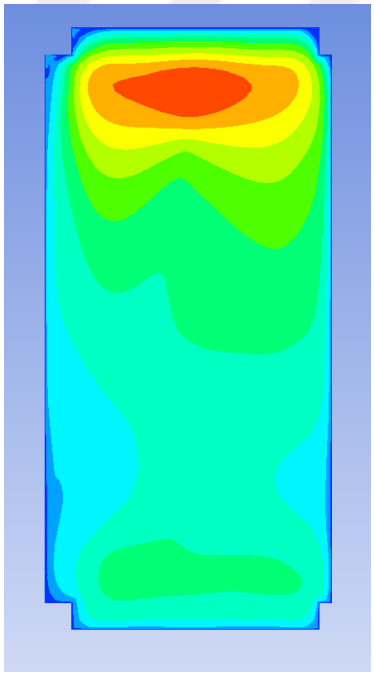
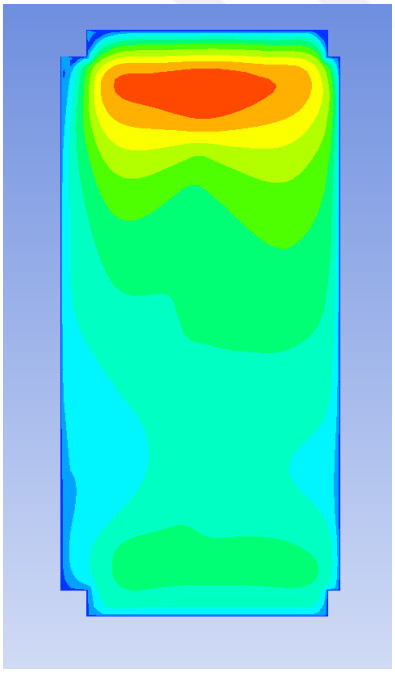
$$\gamma_a = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} [(|\phi_i - \overline{\phi_a}|)A_i]}{2|\overline{\phi_a}| \sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{3.7}$$

Burada n, yüzeydeki mesh sayısı, A_i, her bir meshin yüzey alanını, ϕ_i i'ninci mesh yüzeyindeki alan değişkeninin değerini, $\overline{\phi_a}$ yüzey üzerindeki alan değişkeninin ortlama değerini ifade eder.

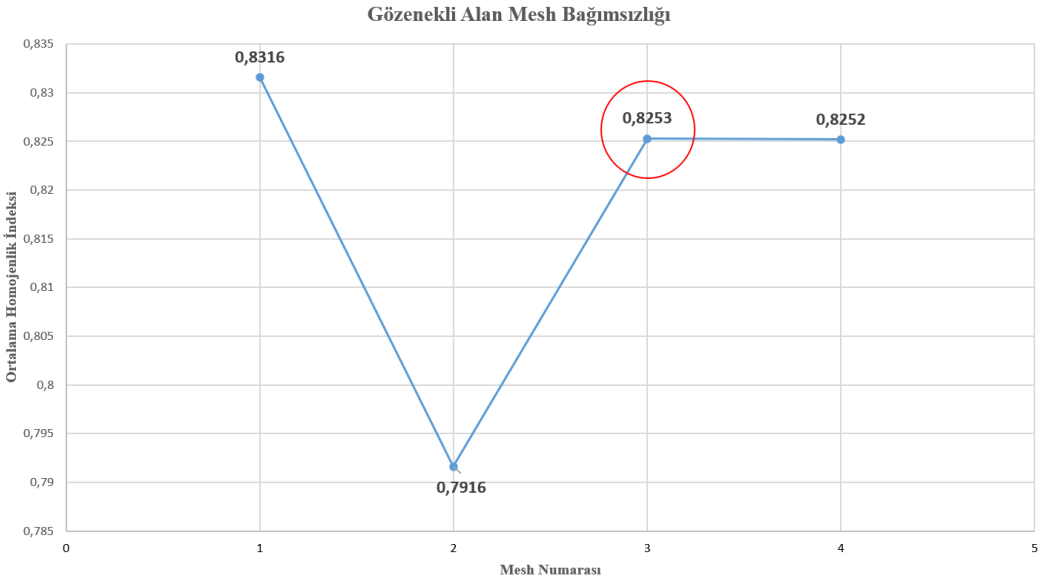
Alan değişkeninin ortalama değeri ($\overline{\phi_a}$) denklem (3.8)'deki gibi hesaplanır:

$$\overline{\phi_a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \phi_i A_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{3.8}$$

Şekil 3.10'da yer alan dört farklı mesh yapısının, fırın içinde oluşturulan plaka üzerindeki hız dağılımları Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Şekil 3.12'de ise fırın içinde yer alan on iki plaka üzerindeki mesh yapılarına göre ortalama homojenlik indeks grafiği verilmiştir.

Mesh-1: Gözenekli Bölge 2 Eleman	Mesh-2: Gözenekli Bölge 8 Eleman
	
Mesh-3: Gözenekli Bölge 16 Eleman	**Mesh-4: Gözenekli Bölge 20 Eleman**
	

Şekil 3. 11 Gözenekli bölge mesh bağımsızlığı hız dağılımı



Şekil 3. 12 Gözenekli bölge mesh bağımsızlığı

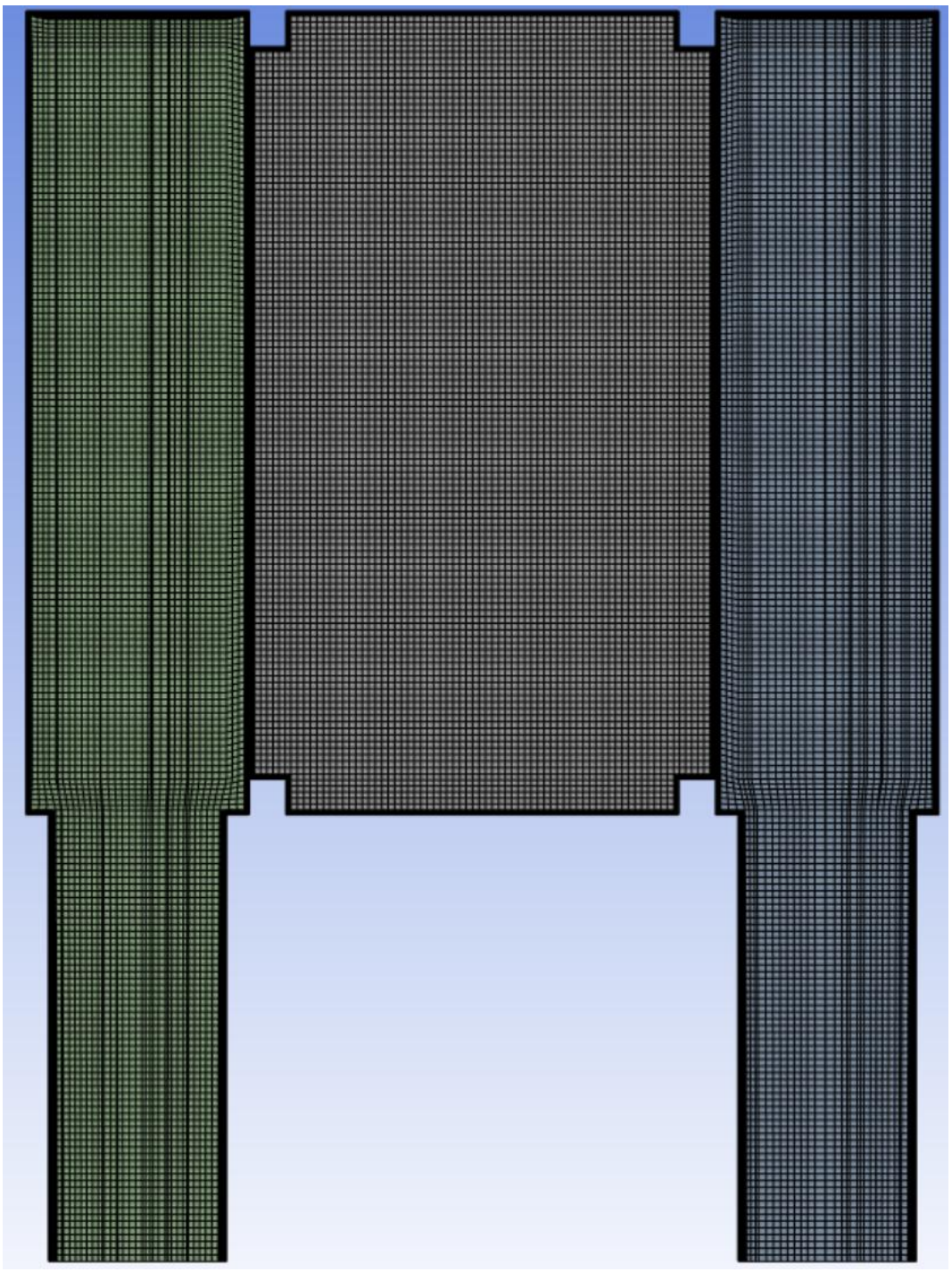
Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 incelendiğinde, Mesh-3 ile Mesh-5 arasında hem hız dağılımlarında hem de homojenlik indeksinde çok az farklılıklar görülmektedir. Bu nedenle gözenekli yapının 16 elemanla (Mesh-3) geçilmesine karar verilmiştir. Gözenekli yapının ağ örgüsü belirlendikten sonra bu kez bütün fırın hacimi için bir mesh bağımsızlığı gerekmektedir. Bu nedenle dört farklı ağ örgüsü oluşturulmuştur. Oluşturlan ağ örgülerinin özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3. 2 Fırın mesh bağımsızlığı özellikleri

Ağ Örgüsü İsmi	Ağ Örgüsü Eleman Sayısı	Ortalama Homojenlik İndeksi
Mesh-1	274811	0,8402
Mesh-2	1298330	0,8374
Mesh-3	2651356	0,8235
Mesh-4	6867023	0,8212

Tablo 3.2 incelendiğinde, Mesh-3 ve Mesh-4 ağ örgüleri arasında homojenlik indeksinde çok düşük bir fark (yaklaşık %0,3) oluşmaktadır. Buna karşılık eleman

sayısında çok büyük bir fark (yaklaşık %160) gözlenmektedir. Fırın geometrisi için Mesh-3 (Şekil 3.13) ağ örgüsü kullanılmıştır.



Şekil 3. 13 Fırın geometrisi Mesh-3 ağ yapısı

3.2.3 Sınır Koşulları ve Çözücü Ayarları

Bu başlık, iki alt ana başlık altında incelenmiştir. Öncelikle, delikli plakaların akış homojenliğini sağlamak için oluşturulan tek gruplu delikli plaka modeli ve daha

sonra bu modelden elde edilen çıktıları, girdi olarak kullanan gözenekli fırın modeli ayrı ayrı ele alınmıştır. Bununla birlikte her iki model içinde bir çok ortak ayar kullanılmıştır.

İki modelde de akışların türbülans modellemesi için Realizable k-ε türbülans modeli ile ayarlanabilir duvar fonksiyonu birlikte kullanılmıştır. Bu modeller, özellikle delikli plakalar çevresindeki karmaşık akışlar için tercih edilmiştir. Düşük Reynolds sayılarında çalışılmasına ragmen, delik yakınındaki akışların doğru bir şekilde temsil edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu model, özellikle akışların ayrışma ve yeniden birleşme noktalarında daha güvenilir sonuçlar vermektedir [27]. Realizable k-ε modelinin türbülans kinetik enerjisi (k) ve enerji yayılım oranı (ε) eşitlikleri denklem (3.9) ve (3.10)'da gösterilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{3.9}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_k) + C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{3.10}$$

EWT yaklaşımı ise, duvar yakınlarındaki ince viskoz alt tabakayı ve duvar fonksiyonlarını birleştirerek hem düşük y^+ hem de yüksek y^+ bölgelerde geçerli sonuçlar sunar. Bu özellik, mesh'in duvarlara çok yakın olduğu ve y^+ değerlerinin 1'e yakın olduğu durumlarda oldukça etkilidir. Bu çalışmada ise her iki model içinde y+ 1'e yakın değerlerdedir ve duvarın çok yakınındaki akış detaylarının doğru bir şekilde yakalanmasını sağlamaktadır. Bu sayede duvar fonksiyonu yaklaşımı, akışın duvar yakınında olduğu bölgelerde yüksek hassasiyet sağlar [27].

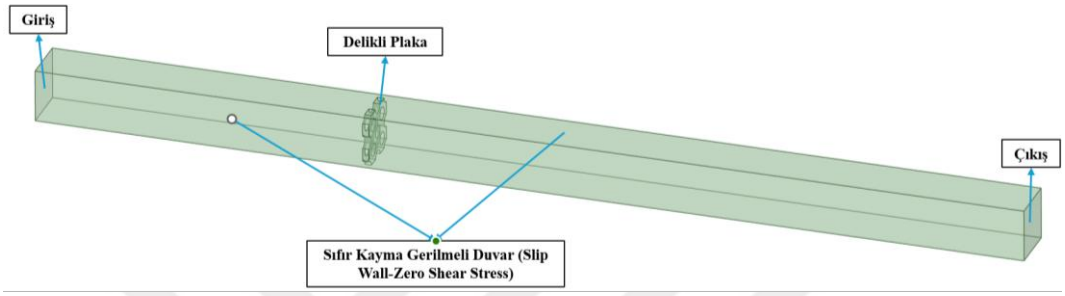
Ayrıca, her iki model (tek grup optimizasyon modeli ve tüm fırın geometrisinde kullanılan gözenekli medya modeli) analizleri gerçekleştirirken basınç merkezli çözücü ayarları tercih edilmiştir. Basınç merkezli çözücü, düşük hızlardaki sıkıştırılamaz akışlar için uygundur ve analizlerdeki düşük Reynolds sayıları göz önünde bulundurulduğunda en doğru sonucu vermektedir.

Basınç merkezli eşlenik çözücü, momentum ve süreklilik denklemlerini birbirine bağlı olarak çözer. Bu yaklaşım, basınç ve hız alanlarının aynı anda çözülmesini sağlar. Özellikle karmaşık akışlarda çözümün hızlanmasına ve doğruluğunun artmasına olanak tanır. Bu nedenle, delikli plaka ve gözenekli medya modellerinin simülasyonlarında basınç merkezli eşlenik çözücü kullanılmıştır [27].

Bununla birlikte modeller, sürekli(steady), yer çekimi ihmal edilerek, sabit kütlesel debiye sahip hava; basınç, momentum, türbülans kinetik enerji ve türbülans yayınım oranı ikinci dereceden ayrıklaşma şemaları kullanılarak gerçeleştirilmiştir. Analizler, süreklilik denklemleri en az 1e-5'e ulaşıncaya kadar devam ettirilmiştir.

3.2.3.1 Tek Gruplu Delikli Plaka Modeli

Optmizasyon çalışmaları tek gruplu delikli plaka modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.14'de kullanılan modelin akış hacmi gösterilmiştir.



Şekil 3. 14 Tek gruplu delikli plaka akış hacmi

Tek gruptan oluşlan delikli plakanın akış hacmi modellenirken, akış hacminin duvarları kayma koşulu (slip-wall) ve sıfır kayma gerilmesi ile modellenmiştir. Bu seçim, akışın dış duvarlar ile minimum etkileşime girmesini sağlamak ve akış dinamiklerinin sadece delikli plaka üzerinde odaklanmasını mümkün kılmak amacıyla yapılmıştır. Bu sayede tek gruplu delikli plaka modeliyle, bütün deliklerin yer aldığı gerçek delikli plaka modeli (Şekil 3.2) arasındaki fark minimize edilmiştir.

Tek gruplu delikli plaka modeli kullanılarak yapılan optimizasyon çalışmasının analiz matrisi Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3. 3 Tek gruplu delikli plaka modeli optimizasyon analiz matrisi

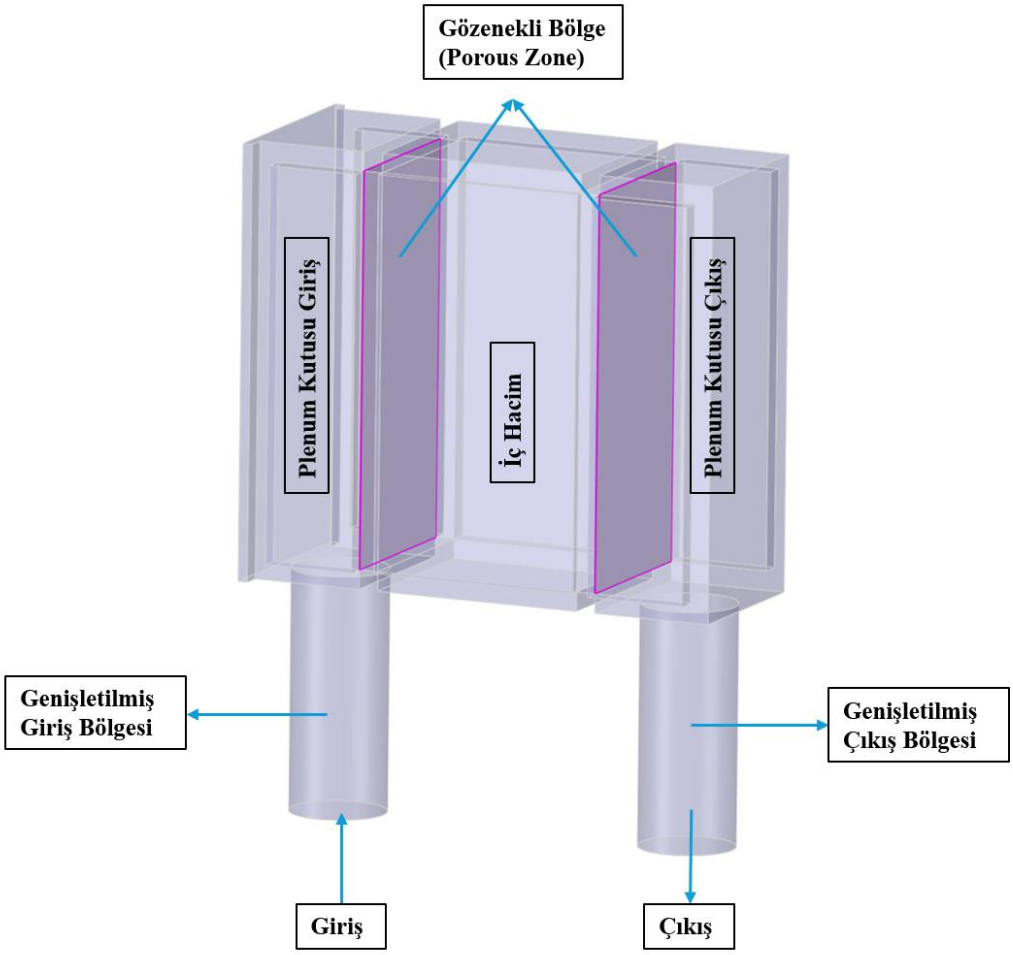
Boşluk Oranı (*f*)	**Delik Çapı [mm]**	**Plaka Kalınlığı [mm]**	**Akışkan Hızı [m/s]**
0,2	0,5 1 2 3 4	0,5 1 2 4	0,5 1 1,5 2 2,5
0,3	0,5 1 2 3 4	1	0,5 1 1,5 2 2,5
0,4	0,5 1 2 3 4	1	0,5 1 1,5 2 2,5

Tablo 3. 3 Tek gruplu delikli plaka modeli optimizasyon analiz matrisi (devamı)

0,5	0,5 1 2 3 4	1	0,5 1 1,5 2 2,5
0,6	0,5 1 2 3 4	1	0,5 1 1,5 2 2,5

3.2.3.2 Gözenekli Yapıya Sahip Fırın Modeli

Gözenekli fırın modeli Şekil 3.15'te gösterilmiştir. Delikli plaka tasarımlarında elde edilen basınç-hız ilişkilerine dayalı olarak, tüm fırın geometrisinde porous media (gözenekli bölge) modeli kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Gözenekli bölge modeli, özellikle yüksek sayıdaki delikli plakaların bulunduğu bölgelerde akışın homojen dağılmasını sağlamak ve hesaplama maliyetini azaltmak için tercih edilmiştir. Delikli plaka yerleştirilmiş bölgeler, basınç kaybı ve hız ilişkilerine göre gözenekli ortam katsayıları ile temsil edilmiştir. Bu yaklaşım, fırın içinde daha geniş çaplı akış simülasyonlarının hesaplama yükünü hafifletmek için ideal bir yöntem olarak kullanılmıştır.



Şekil 3. 15 Gözenekli yapıya sahip fırın modeli

Gözenekli yapı, momentum denklemlerine eklenen bir momentum kaynağı ile temsil edilir. Bu kaynak, akışın viskoz ve atalet etkilerinden kaynaklanan basınç kaybını modellemek için kullanılır. Gözenekli bölge, akışın geometrik bir engelle karşılaştığı durumu simüle eder, ancak fiziksel engelleri hesaba katmadan basınç kaybını ve hız dağılımını doğru bir şekilde modellemeye olanak tanır.

Darcy-Forchheimer modeli, gözenekli ortamlarda akışın davranışını incelemek ve akışın maruz kaldığı dirençleri hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir matematiksel modeldir. Bu model, Darcy Yasası ve Forchheimer Düzeltmesi olmak üzere iki temel bileşene dayanır. Gözenekli ortamlardaki düşük hızlarda Darcy Yasası geçerlidir; ancak akış hızı arttığında atalet etkileri devreye girer ve Forchheimer Düzeltmesi uygulanır. Bu iki bileşen birlikte, gözenekli ortamlardaki akışın tam bir tanımını sağlar [28].

Darcy Yasası, düşük hızlardaki akışlar için gözenekli bir ortamdan geçen akışın basit bir lineer modelidir. Temel olarak akışın viskoz etkilerini dikkate alır ve gözenekli ortamlardaki basınç kaybının, akış hızı ile orantılı olduğunu varsayar.Denklem 3.11'de Darcy yasasına göre basınç kaybı eşitliği gösterilmiştir:

$$\Delta p = \mu \frac{u}{\alpha} \tag{3.11}$$

Bu yasa, düşük hızlarda akışın viskoz etkilerle sınırlı olduğunu ve basınç kaybının akış hızına lineer olarak bağlı olduğunu varsayar. Ancak, yüksek hızlarda sadece viskoz etkiler yeterli değildir ve atalet etkilerinin de hesaba katılması gerekir.

Forchheimer düzeltmesi, yüksek hızlarda akışın atalet etkilerini de hesaba katmak için Darcy Yasası'na eklenen bir düzeltmedir. Bu düzeltme, hızın karesiyle orantılı ek bir terim ekleyerek, gözenekli ortamdaki basınç kaybının daha doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar. Forchheimer denklemi (3.12) şu şekildedir:

$$\Delta P = \mu \frac{u}{\alpha} + C_2 \rho u^2 \tag{3.12}$$

Bu denklem, viskoz etkilere ek olarak atalet etkilerini de içerir ve basınç kaybının artık hem hıza hem de hızın karesine bağlı olduğunu gösterir.

Bu iki katsayı, delikli plakaların her biri için yapılan basınç-hız ölçümleriyle elde edilmiştir. Her bir plaka için viskoz direnç katsayısı ve atalet direnç katsayısı, delikli plaka üzerindeki basınç-hız grafiklerinden elde edilen ikinci dereceden denklemler kullanılarak belirlenmiştir. Denklemlerde yer alan ikinci dereceli katsayılar denklem (3.12) kullanılarak atalet direncini hesaplarken, birinci dereceli katsayılar denklem (3.11) kullanılarak viskoz rezistansını hesaplamaktadır. Bu katsayılar, gözenekli bölgede basınç kaybını hesaplamak için modelde yerleştirilmiştir. Modele yerleştirilirken, akış yönü (+x) yönü olduğu için diğer yönlerdeki atalet direnci ve viskoz rezistans değerleri hesaplanan değerlerden 1000 kat büyük girilmiştir.

3.3 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

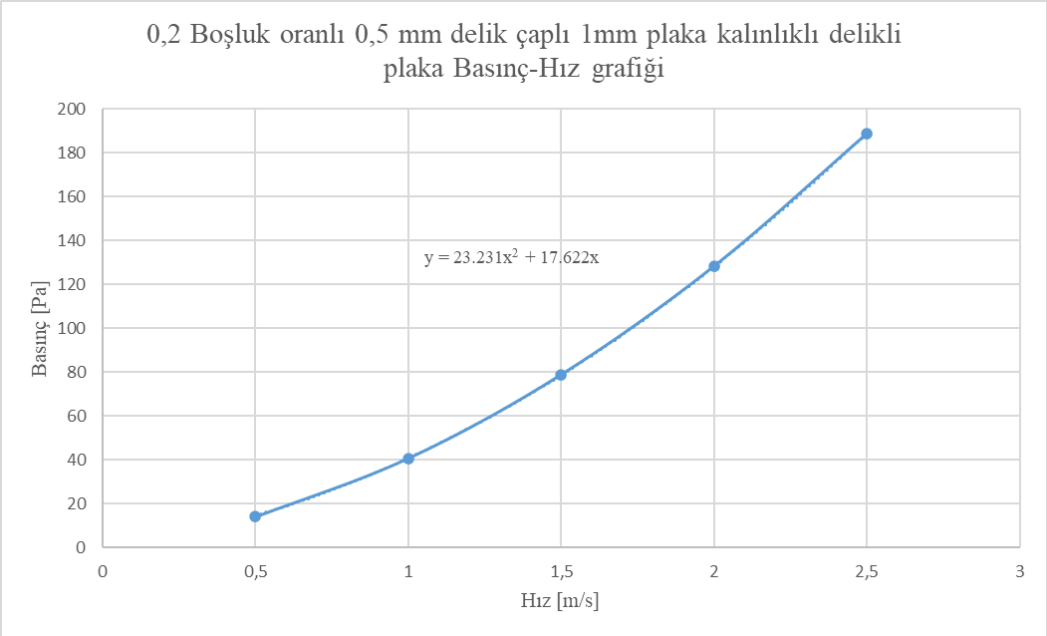
3.3.1 Tek Gruplu Delikli Plaka Modeli

Tek gruplu delikli plaka için oluşturulan analiz matrisi (Tablo 3.3) simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonlar neticesinde her bir plaka geometrisi için basınç-hız grafiği elde edilmiştir. Çıkış basıncı atmosferik basınç kabul edilidiğinden, girişte oluşan statik basınç kanaldaki basınç kaybını vermektedir.Elde edilen basınç-hız grafiklerinden ikinci dereceden denklemler türetilerek, (3.11) ve (3.12)'ye göre gözenekli bölge (porous) katsayıları hesaplanmıştır.

0,2 boşluk oranlı ve 1 mm et kalınlığına sahip tek gruplu delikli plaka için yapılan simülasyonların sonuçları Tablo 3.4'de gösterilmiştir. Verilen atalet direnci ve gözenekli ortam geçirgenliği katsayıları ise Şekil 3.16'da gösterilen ve örnek olarak; 0,2 Boşluk oranlı, 0,5 mm delik çaplı ve 1 mm plaka kalınlıklı delikli plaka için hazırlanmış olan basınç-hız grafiğine göre hesaplanmıştır. Grafiğin ikinci dereceden denklemi çıkıralıp, x^2'li terimin katsayısı atalet dirençlerine ve x'li terimin katsayısı ise gözenekli ortam geçirgenliği eşitlenerek gözenekli ortam katsayıları elde edilir. Bütün boşluk oranlarında, çaplarında ve plaka kalınlıklarında Şekil 3.16'daki gibi basınç-hız grafikleri oluşturularak katsayılar elde edilmiştir.

Tablo 3. 4 0,2 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları

Boşluk Oranı	Delik Çapı [mm]	Hız [m/s]	Basınç Kaybı [Pa]	C2 (Atalet Direnci) [1/m]	1/alpha (Gözenekli Ortam Geçirgenliği) [1/m^2]
0,2	0,5	2,5	188,98	37928	984799374
		2	128,48		
		1,5	79,01		
		1	40,75		
		0,5	14		
	1	2,5	142,22	33850	277797027
		2	92,54		
		1,5	53,99		
		1	25,92		
		0,5	7,85		
	2	2,5	135,56	33582	205286688
		2	93,45		
		1,5	52,11		
		1	22,16		
		0,5	5,8		
	3	2,5	137,53	31956	375427518
		2	93,37		
		1,5	56,83		
		1	24,25		
		0,5	5,6		
	4	2,5	144,22	33722	361646362
		2	96,56		
		1,5	57,95		
		1	26,38		
		0,5	5,87		

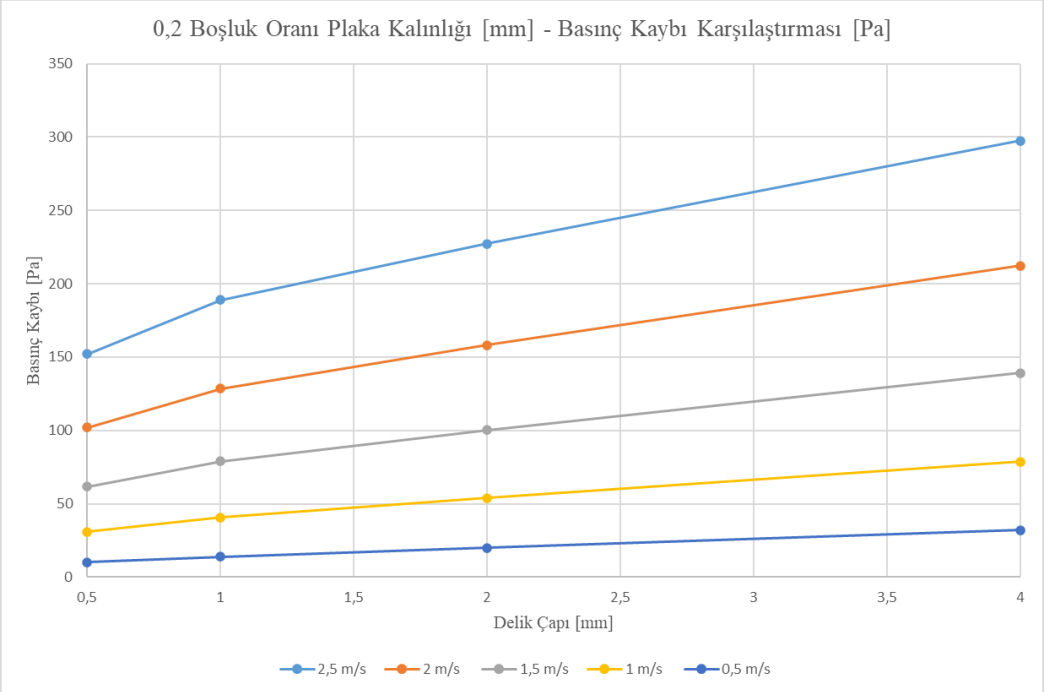


Şekil 3. 16 0,2 Boşluk oranlı 0,5 mm delik çaplı 1 mm plaka kalınlıklı delikli plaka modeli Basınç-Hız Grafiği

Plaka kalınlığının delikli plakaların akış homojenliği ve basınç kaybı üzerindeki etkilerini incelemek için sadece 0,2 boşluk oranına sahip plakalarda farklı kalınlık değerleri kullanılmıştır. Bu sınırlama, analiz sayısının artmaması adına yapılmış olup, elde edilen sonuçlar genel eğilimleri belirlemek açısından yeterli kabul edilmiştir. Tablo 3.5 ve Şekil 3.17'de 0,2 boşluk oranı ve 0,5 mm delik çapı için farklı kalınlıktaki delikli plaka analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 3. 5 0,2 Boşuk oranlı 0,5 mm delik çaplı farklı kalınlıktaki delikli plaka analiz sonuçları

Boşluk Oranı	Çap [mm]	Kalınlık [mm]	Hız [m/s]	Basınç Kaybı [Pa]	C2 (Atalet Direnci) [1/m]	1/alpha (Gözenekli Ortam Geçirgenliği) [1/m^2]
0,2	0,5	0,5	2,5	152,11	65055	1240974628
			2	102,06		
			1,5	61,72		
			1	30,98		
			0,5	10,08		
		2	2,5	227,15	20044	828489997
			2	158,05		
			1,5	100,18		
			1	53,97		
			0,5	20,09		
		4	2,5	297,5	10923	730454342
			2	212,23		
			1,5	139,07		
			1	78,73		
			0,5	32,04		



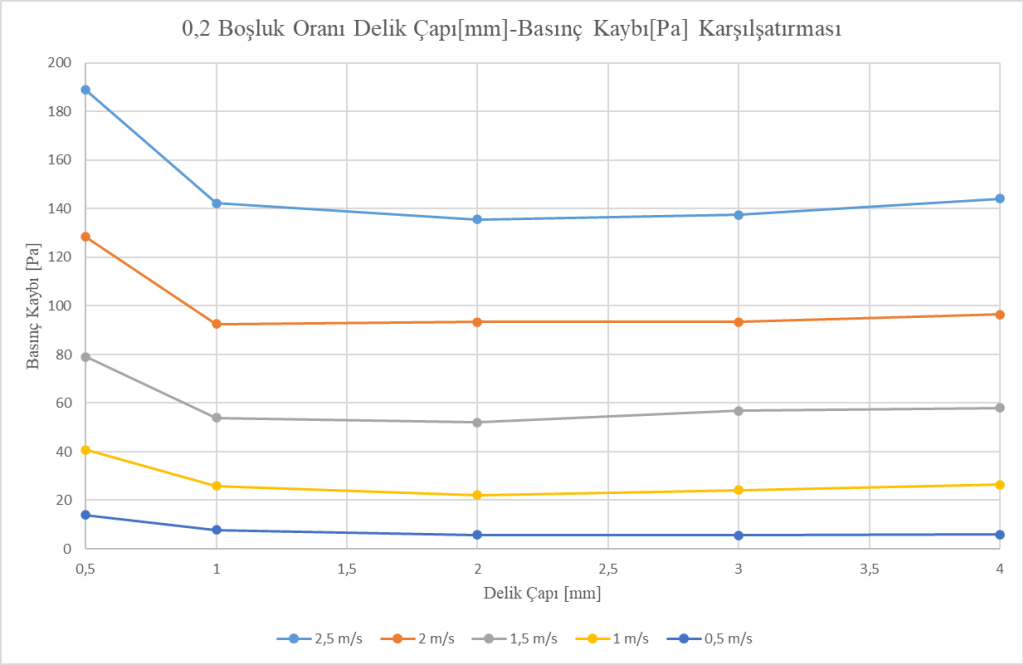
Şekil 3. 17 0,2 Boşluk oranında plaka kalınlığına göre basınç kaybının değişimi

Şekil 3.17 incelendiğinde, tüm hız değerlerinde, plaka kalınlığı arttıkça basınç kaybı doğrusal bir şekilde artmaktadır. Bu durum, kalın plakalarda akışın daha fazla dirençle karşılaştığını göstermektedir. Kalınlık arttıkça akış, plakadaki deliklerden geçerken daha uzun bir yol kat etmekte ve bu da enerji kaybını artırmaktadır. Örneğin, 2,5 m/s hızda plaka kalınlığı 0,5 mm'den 4 mm'ye çıkarıldığında basınç kaybı yaklaşık 150 Pa'dan 300 Pa'ya kadar yükselmektedir.

Hız arttıkça (örneğin 2,5 m/s), plaka kalınlığındaki artışın basınç kaybına etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Yüksek hızlar, akışkanın deliklerden geçerken daha fazla sürtünme ve türbülans yaratmasına neden olur. Bu, enerji kaybını ve

dolayısıyla basınç kaybını artırır. Düşük hızlarda (0,5 m/s) ise basınç kaybı artışı daha sınırlıdır. Örneğin, aynı plaka kalınlık artışında basınç kaybı yaklaşık 0'dan 25 Pa'ya kadar çıkmaktadır. Bu, düşük hızlarda akışın daha az dirençle karşılaştığını göstermektedir. Özetle, plaka kalınlığındaki artış, basınç kaybında doğrusal bir artışa neden olmaktadır. Özellikle yüksek hızlarda bu etki daha belirgin hale gelmektedir.

0,2, 0,3, 0,4, 0,5 ve 0,6 boşluk oranlı ve 1 mm et kalınlıklı delikli plaka tasarımları için yapılan simülasyonların sonuçları sırasıyla verilmiştir.

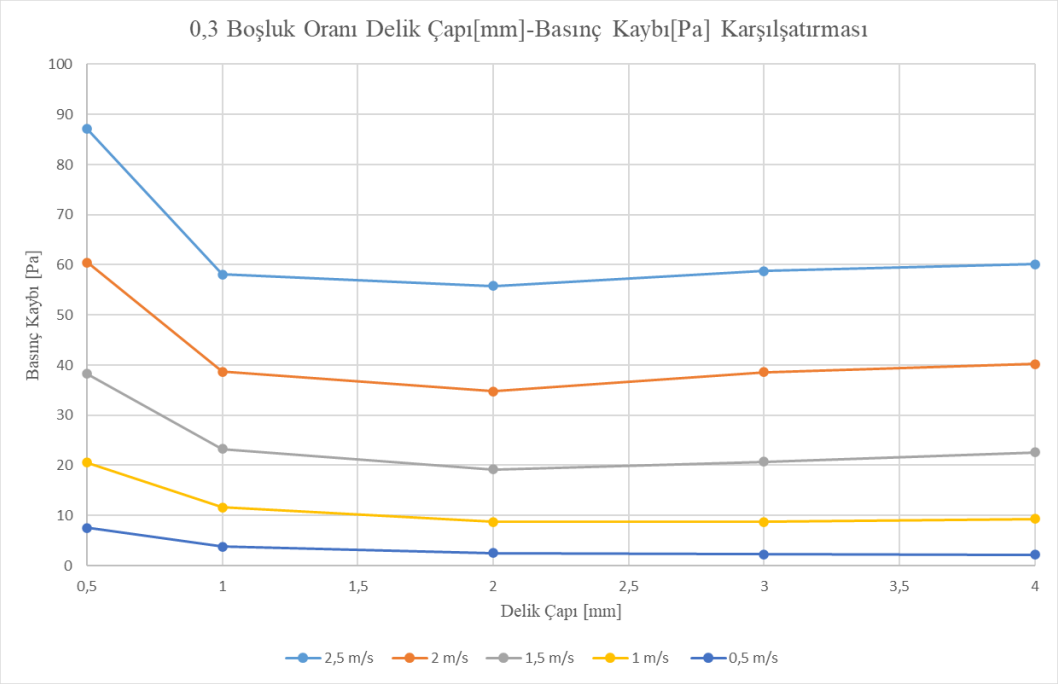


Şekil 3. 18 0,2 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi

Tablo 3.4'te paylaşılan sonuçlar ve Şekil 3.18'de gösterilen grafik incelendiğinde, en yüksek basınç kaybı 0,5 mm delik çapında ve 2,5 m/s hızda yaklaşık 200 Pa'ya ulaşmaktadır. Bu, küçük deliklerin akışa karşı daha fazla direnç oluşturduğunu göstermektedir. Delik çapı 1 mm'ye ulaştığında basınç kaybı keskin bir şekilde düşmekte, ardından daha büyük çaplarda eğim yataylaşmaktadır. Örneğin, 2 mm ve üzeri çaplarda basınç kaybındaki azalma daha az belirgin hale gelmiştir. Hız arttıkça basınç kaybı değerleri tüm delik çaplarında belirgin bir şekilde artış göstermektedir. Ancak, 0,5 m/s hızda basınç kaybı neredeyse ihmal edilebilir seviyelerdedir. Bu, düşük hızlarda akışın daha az enerji kaybına uğradığını göstermektedir. Sonuç olarak, 2 mm delik çapından itibaren basınç kaybı optimizasyonu açısından bir denge noktası oluştuğu görülmektedir.

Tablo 3. 6 0,3 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları

Boşluk Oranı	Delik Çapı [mm]	Hız [m/s]	Basınç Kaybı [Pa]	C2 (Atalet Direnci) [1/m]	1/alpha (Gözenekli Ortam Geçirgenliği) [1/m^2]
0,3	0,5	2,5	87,12	15569	618699005
		2	60,47		
		1,5	38,24		
		1	20,54		
		0,5	7,57		
	1	2,5	58,08	12674	214116464
		2	38,71		
		1,5	23,26		
		1	11,62		
		0,5	3,75		
	2	2,5	55,74	14383	7209120
		2	34,73		
		1,5	19,18		
		1	8,73		
		0,5	2,48		
	3	2,5	58,8	15288	7192354
		2	38,63		
		1,5	20,75		
		1	8,71		
		0,5	2,22		
	4	2,5	60,14	15495	33340785
		2	40,22		
		1,5	22,59		
		1	9,35		
		0,5	2,2		



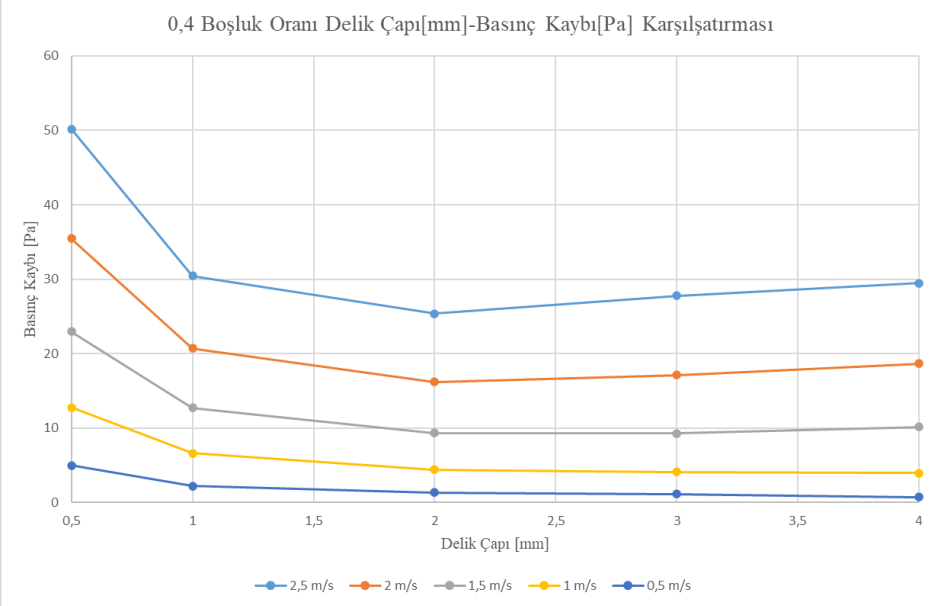
Şekil 3. 19 0,3 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi

Tablo 3.6 ve Şekil 3.19 incelendiğinde, gözeneklilik oranı %30 olduğunda, basınç kaybı azalmış ve delik çapına olan duyarlılık biraz daha düşük hale gelmiştir. Tüm hızlarda, basınç kaybı %20 gözeneklilik oranına kıyasla daha düşüktür. Örneğin, 0,5 mm delik çapında en yüksek hızda bile basınç kaybı 90 Pa'ya düşmüştür. Delik çapı arttıkça basınç kaybı azalmaya devam etmektedir. Ancak bu azalma, 2 mm

delik çapından sonra daha stabil hale gelmiştir. Bu, daha büyük delik çaplarının akış üzerindeki etkisinin bir noktadan sonra azalacağını göstermektedir. Yüksek hızlarda basınç kaybı hala belirgindir. Ancak düşük hızlarda (1 m/s ve altı), basınç kaybı değerleri daha dengeli bir dağılım göstermektedir. Gözeneklilik oranının artışıyla birlikte basınç kaybı önemli ölçüde azalmaktadır.

Tablo 3. 7 0,4 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları

Boşluk Oranı	Delik Çapı [mm]	Hız [m/s]	Basınç Kaybı [Pa]	C2 (Atalet Direnci) [1/m]	1/alpha (Gözenekli Ortam Geçirgenliği) [1/m^2]
0,4	0,5	2,5	50,18	7938	444746843
		2	35,49		
		1,5	22,99		
		1	12,76		
		0,5	4,99		
	1	2,5	30,43	6085	160450430
		2	20,7		
		1,5	12,73		
		1	6,62		
		0,5	2,23		
	2	2,5	25,37	6258	29115905
		2	16,21		
		1,5	9,34		
		1	4,45		
		0,5	1,34		
	3	2,5	27,79	7102	5487873
		2	17,13		
		1,5	9,27		
		1	4,11		
		0,5	1,13		
	4	2,5	29,5	7680	5336984
		2	18,69		
		1,5	10,17		
		1	3,99		
		0,5	0,73		



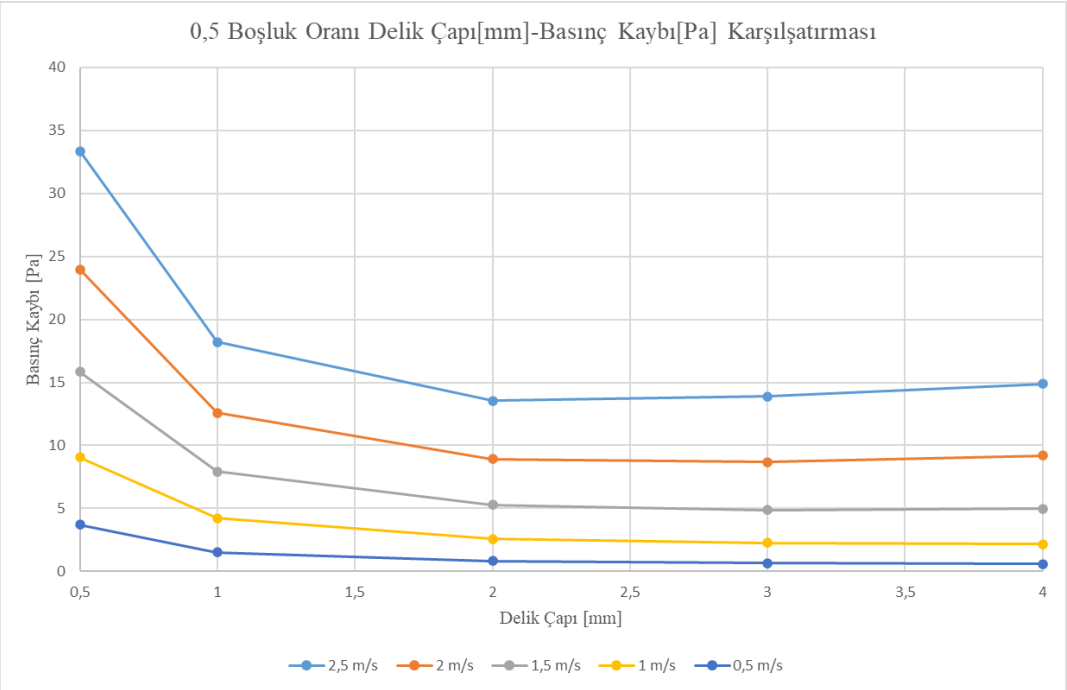
Şekil 3. 20 0,4 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi

Tablo 3.7 ve Şekil 3.20 incelendiğinde, gözeneklilik oranının %40'a çıkarılmasıyla basınç kaybı daha da azalmış ve grafiklerdeki eğim daha yatay bir hale gelmiştir.

Delik çapı 1 mm'den sonra basınç kaybındaki düşüşler daha az belirgin hale gelmektedir. 2 mm ve üzeri çaplarda eğri neredeyse sabit bir hale gelmiştir. 0,5 m/s ve 1 m/s hızlarda, basınç kaybı minimum seviyelere düşmektedir. Örneğin, 2 mm delik çapında 0,5 m/s hızda basınç kaybı 5 Pa'nın altına inmektedir. 2,5 m/s hızda bile basınç kaybı, düşük gözeneklilik oranlarına kıyasla çok daha düşük seviyelerdedir (yaklaşık 50 Pa).

Tablo 3. 8 0,5 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları

Boşluk Oranı	Delik Çapı [mm]	Hız [m/s]	Basınç Kaybı [Pa]	C2 (Atalet Direnci) [1/m]	1/alpha (Gözenekli Ortam Geçirgenliği) [1/m^2]
0,5	0,5	2,5	33,34	4645	349323796
		2	23,97		
		1,5	15,85		
		1	9,05		
		0,5	3,71		
	1	2,5	18,22	3344	121895607
		2	12,59		
		1,5	7,92		
		1	4,22		
		0,5	1,52		
	2	2,5	13,55	3082	38739242
		2	8,91		
		1,5	5,28		
		1	2,6		
		0,5	0,83		
	3	2,5	13,88	3629	1145635
		2	8,68		
		1,5	4,87		
		1	2,26		
		0,5	0,66		
	4	2,5	14,88	3818	810327
		2	9,21		
		1,5	4,98		
		1	2,18		
		0,5	0,59		

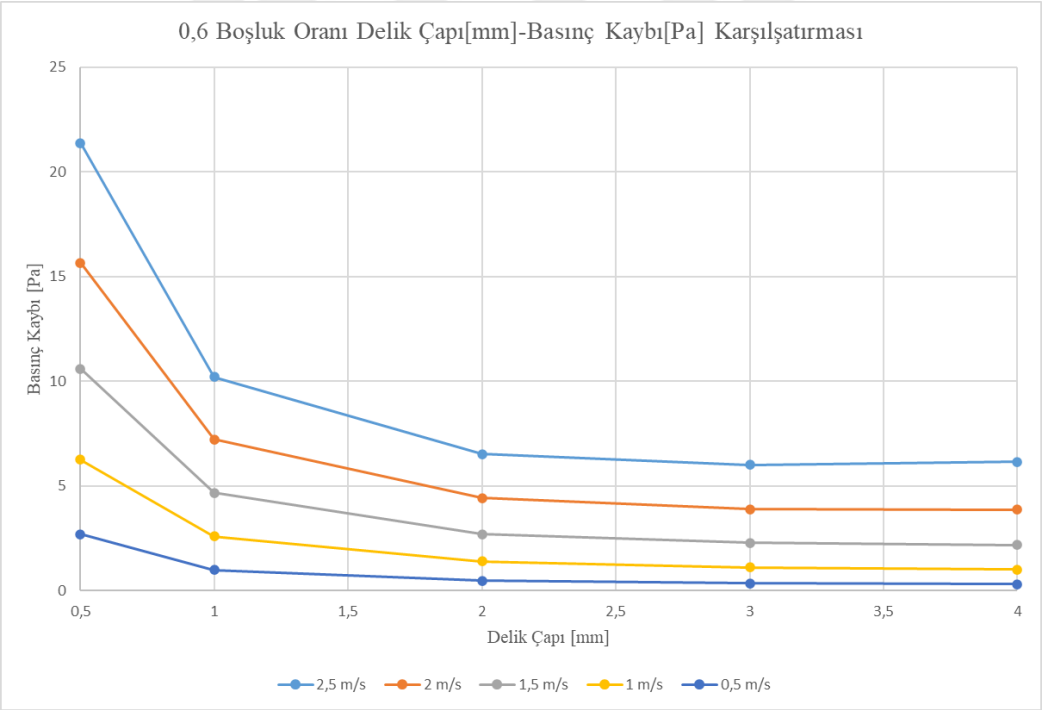


Şekil 3. 21 0,5 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi

Tablo 3.8 ve Şekil 3.21 incelendiğinde, gözeneklilik oranının %50 olduğu bu durumda, basınç kaybı önceki oranlara göre ciddi şekilde azalmıştır. Tüm hızlarda ve delik çaplarında basınç kaybı oldukça düşük seviyelerdedir. Örneğin, 0,5 mm delik çapında 2,5 m/s hızda bile basınç kaybı 35 Pa civarındadır. Delik çapı 2 mm'yi geçtiğinde, tüm hızlarda basınç kaybı neredeyse sabit kalmaktadır. Bu, daha büyük delik çaplarının akış üzerindeki etkisinin minimal olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. 9 0,6 Boşluk oranlı 1 mm et kalınlıklı tek grup delikli plaka modeli analiz sonuçları

Boşluk Oranı	Delik Çapı [mm]	Hız [m/s]	Basınç Kaybı [Pa]	C2 (Atalet Direnci) [1/m]	1/alpha (Gözenekli Ortam Geçirgenliği) [1/m^2]
0,6	0,5	2,5	21,38	2481	266396558
		2	15,66		
		1,5	10,6		
		1	6,26		
		0,5	2,71		
	1	2,5	10,21	1626	89661339
		2	7,22		
		1,5	4,68		
		1	2,59		
		0,5	0,99		
	2	2,5	6,53	1319	33150777
		2	4,42		
		1,5	2,71		
		1	1,41		
		0,5	0,48		
	3	2,5	6,02	1412	13283782
		2	3,9		
		1,5	2,29		
		1	1,12		
		0,5	0,36		
	4	2,5	6,15	1579	1620655
		2	3,88		
		1,5	2,19		
		1	1,02		
		0,5	0,31		

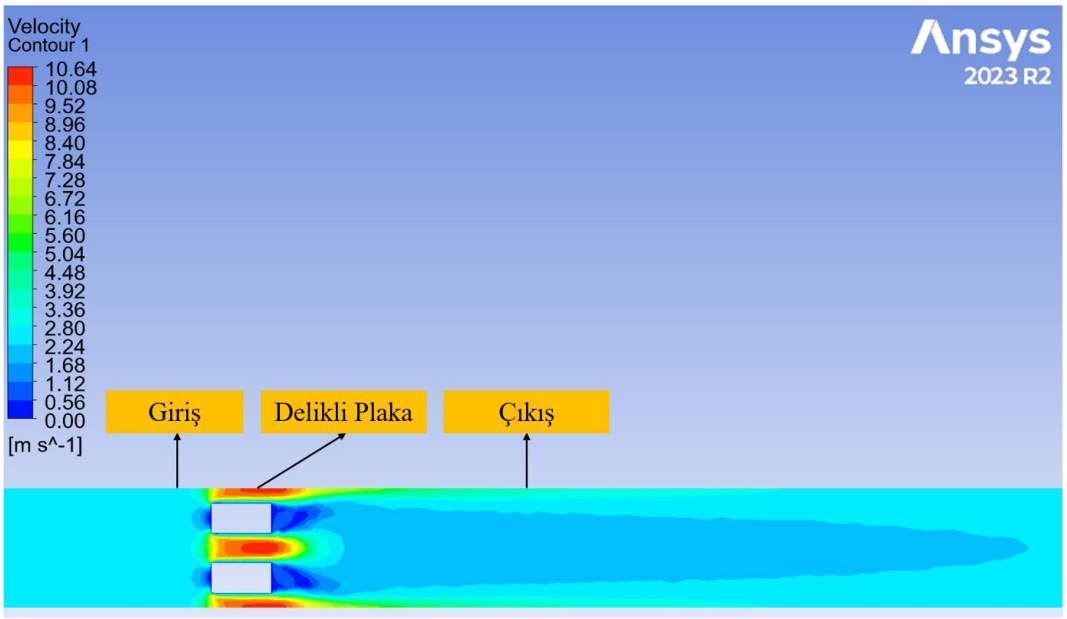


Şekil 3. 22 0,6 Boşluk oranında delik çapına göre basınç kaybı değişimi

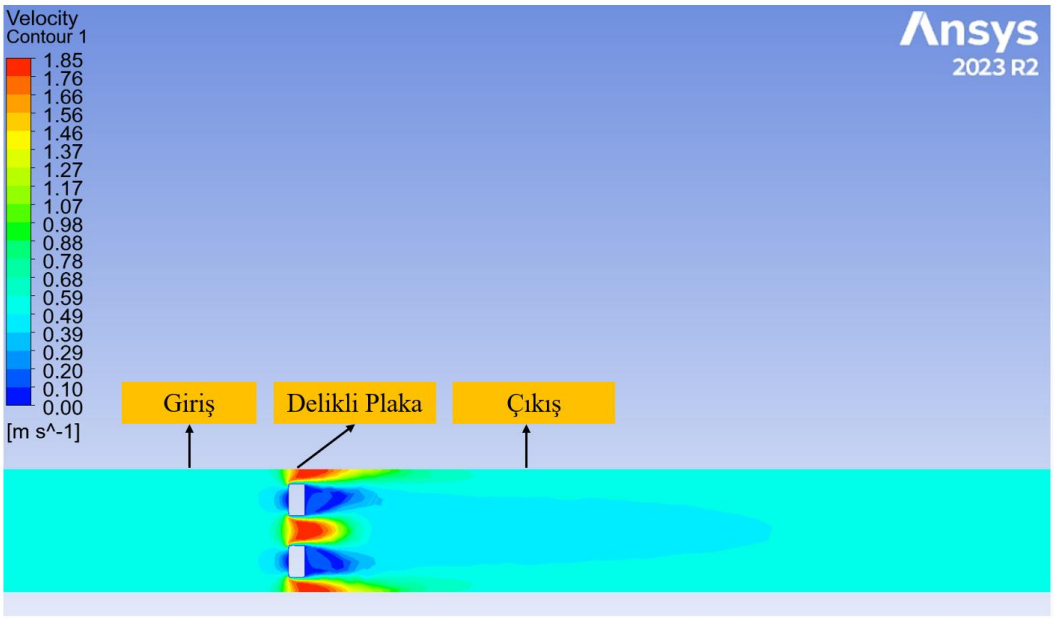
Tablo 3.13 ve Şekil 3.22 incelendiğinde, en yüksek gözeneklilik oranında, basınç kaybı minimum değerlere ulaşmıştır. Tüm hızlarda basınç kaybı oldukça düşüktür. Örneğin, 0,5 mm delik çapında 2,5 m/s hızda bile basınç kaybı yalnızca 20 Pa civarındadır. Delik çapı 2 mm'yi geçtiğinde basınç kaybı neredeyse

değişmemektedir. Bu, yüksek gözeneklilik oranlarının büyük delik çaplarıyla birleştiğinde akış üzerindeki etkisinin çok minimal olduğunu göstermektedir. Bu gözeneklilik oranı, düşük basınç kaybı hedefleyen uygulamalar için oldukça uygundur. Ancak akış homojenliği gibi diğer faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

Delik çapının 2 mm'den sonra basınç kaybındaki azalmanın daha dengeli bir hale gelmesinin temel nedeni, akış dinamiklerinin ve geometrik etkilerin akış üzerindeki dirençleri azaltmasıdır. Küçük çaplı deliklerde (örneğin 0,5-1 mm), yüzey alanı/akış kesiti oranı yüksektir ve bu durum, akışkanın delik yüzeyleriyle daha fazla temas etmesine neden olarak sürtünme direncini artırır. Ayrıca, küçük çaplarda jet etkisi daha belirgin olup, akışın karışma kayıpları ve türbülans seviyeleri yükselmektedir. Ancak delik çapı büyüdükçe, çıkış alanı artar, jet etkisi azalır ve akış daha stabil hale gelir. Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te örnek bir durum için delik çevresinde oluşan akış davranışları gösterilmiştir.



Şekil 3. 23 0,4 Boşluk oranı, 0,5 mm delik çapı ve 1 mm kalınlığa sahip plakanın hız dağılım grafiği



Şekil 3. 24 0,4 Boşluk oranı, 2 mm delik çapı ve 1 mm kalınlığa sahip plakanın hız dağılım grafiği

Bu durum, türbülansın ve sürtünme kayıplarının azalmasıyla birlikte basınç kaybının daha dengeli bir eğilim gösternesini sağlar. Bu fenomenler, 2 mm'den sonra basınç kaybındaki azalmanın nispeten daha yavaş bir seyir izlemesine neden olmaktadır ve delikli plaka tasarımında kritik bir optimizasyon parametresi olarak öne çıkmaktadır.

Yapılan analizlerin çıktıları özetlenirse, daha büyük delik çapları genel olarak basınç kaybını azaltmaktadır. Ancak bu, özellikle 2 mm çapından sonra daha az belirgin hale gelmektedir. Artan gözeneklilik oranı, akış direncini azaltarak basınç kaybını önemli ölçüde düşürmektedir. Bu, tasarımda gözeneklilik oranının optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır. Daha yüksek hızlar, basınç kaybını artırmaktadır. Ancak, gözeneklilik oranı ve delik çapı arttıkça bu artışın etkisi azalmaktadır.

Bu analizler, delikli plaka tasarımında kullanılan parametrelerin basınç kaybı üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Basınç kaybı yanı sıra incelenmesi gereken diğer bir önemli parametrede akış homojenliğidir.Akış homojenliğine sonraki bölümlerde değinilecektir.

Elde edilen bu ilk sonuçlar doğrultusunda, optimum delik çapı, boşluk oranı ve kalınlık değerlerine ulaşılabilecek tasarımlar için daha detaylı analizler yapılacak ve deneysel doğrulamalarla bu tasarımlar test edilecektir.

Bu aşamada elde edilen bulgular, daha sonra gözenekli fırın modeli kullanılarak fırın içerisindeki akış homojenliğinin sağlanması ve basınç kayıplarının minimize edilmesi amacıyla kullanılacaktır. Seçilen plakaların deneysel sonuçlarla doğrulanması, nihai tasarımın belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

3.3.2 Deney Düzeneğinin Kurulumu ve Deneysel Ölçüm Verileri

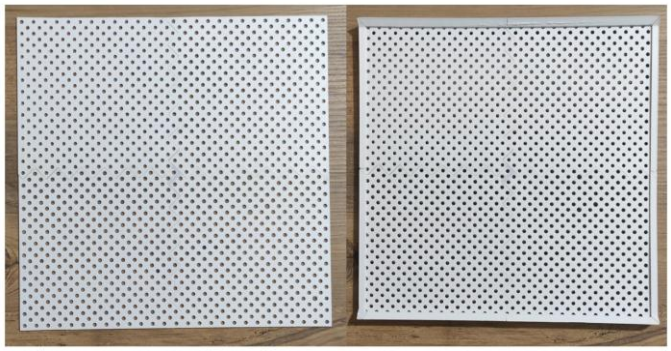
Bu çalışmada, sayısal analizleri gerçekleştirilen 0,2 boşluk oranına, 4 mm delik çapına ve 1 mm plaka kalınlığına sahip delikli plakaların deneysel doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Yıldız Teknik Üniversitesi'ndeki 30x30 cm kesit genişliğine sahip rüzgar tünelinde ve yaklaşık 25^{o}C hava sıcaklığında yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan rüzgar tüneli (Şekil 3.25), açık devreli bir sistem olup, akış hızlarının hassas bir şekilde ayarlanabildiği ve ölçümlerin güvenilir şekilde yapılabildiği bir altyapıya sahiptir.



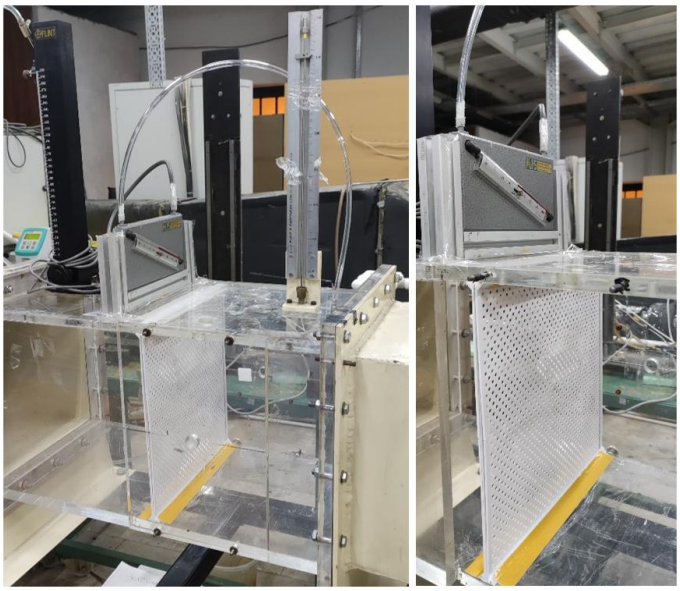
Şekil 3. 25 Yıldız Teknik Üniversitesi rüzgâr tüneli

3.3.2.1 Deney Düzeneğinin Kurulumu

Deneylerde kullanılacak olan plaka, 3 boyutlu yazıcı kullanılarak PLA (Polylactic Acid) malzemeden üretilmiştir. Plakanın boyutları, rüzgâr tünelinin kesit boyutlarına uygun olacak şekilde 30x30 cm olarak tasarlanmıştır. Ayrıca plakayı rüzgâr tüneline yerleştirmek için 3 boyutlu yazıcı yardımıyla bir çerçeve üretilmiştir. PLA malzemenin seçimi, kolay üretilebilirliği ve deney koşullarına dayanıklı olması nedeniyle tercih edilmiştir. Üretilen delikli plaka (Şekil 3.26), rüzgâr tünelinin test bölümüne yerleştirilerek ölçüm için sabitlenmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3. 26 0,2 Boşluk oranlı, 4 mm delik çaplı ve 1mm et kalınlıklı delikli plaka ve çerçevesi



Şekil 3. 27 Rüzgâr tüneline delikli plakanın yerleştirilmesi

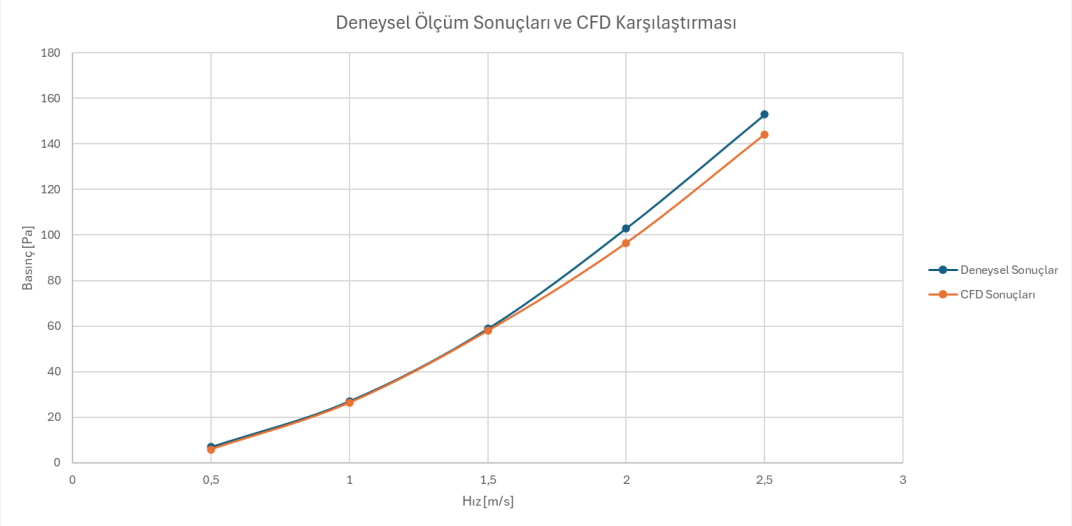
Rüzgâr tünelindeki akış hızını ölçmek ve ayarlamak için tel anemometre kullanılmıştır. Bu cihaz ile plakanın önünde yapılan ölçümler sonucunda her bir deney için hızlar 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, 2 m/s ve 2,5 m/s olarak ayarlanmıştır.

Plakanın ön ve arkasındaki statik basınç farkını ölçmek içinse sulu manometre kullanılmıştır. Sulu manometre, plakanın ön ve arkasındaki statik basınç farkını milimetre cinsinden sıvı yükseklik farkı (Δh) olarak vermektedir. Bu yükseklik farkı (3.13) kullanılarak basınç dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Suyun termodinamik özellikleri 4°C'ye göre belirlenmiştir. Her bir hız değeri için basınç farkı ölçümleri birden fazla kez tekrarlanmış ve ölçümlerin ortalaması alınarak deneysel doğruluğun artırılması sağlanmıştır.

$$\Delta p = \rho_{su} * g * \Delta h \tag{3.13}$$

3.3.2.2 Deneysel Ölçüm Verileri ve Karşılaştırma

Deney sonucunda, her bir hız için elde edilen basınç farkları kaydedilmiş ve daha önce sayısal analizlerle elde edilen basınç kaybı değerleri ile kıyaslanmıştır. (Şekil 3.28)



Şekil 3. 28 Deneysel veri sonuçları ve HAD karşılaştırması

Deney sonucunda okunan mm-H_2O değerleri ve buna karşılık gelen basınç değerleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3. 10 Deneysel basınç ölçüm verileri ve HAD sonuçları karşılaştırması

Hızlar [m/s]	**Deneysel Basınç Ölçümü [mmH_2O]**	**Deneysel Basınç Ölçümü [Pa]**	**HAD Sonucu [Pa]**	**Yüzdece Hata [%]**
0,5	≈0,75	7,35	5,87	20,1
1	≈2,75	26,96	26,38	2,2
1,5	≈6	58,84	57,95	1,5
2	≈10,5	102,97	96,56	6,2
2,5	≈15,5	152,98	144,22	5,7

Tablo 3.10 ve Şekil 3.28 incelendiğinde deney sonuçlarıyla, yapılan sayısal analizlerin uyumlu olduğunu ispatlamaktadır. Sadece 0,5 m/s için hata oranı %10'dan fazla olmaktadır. Bunun sebebi ise aradaki fark sayısal olarak çok düşük olmasına rağmen (sadece 1,48 Pa), sayılar küçüldükçe yüzdece hata miktarının artmasından kaynaklanmaktadır.

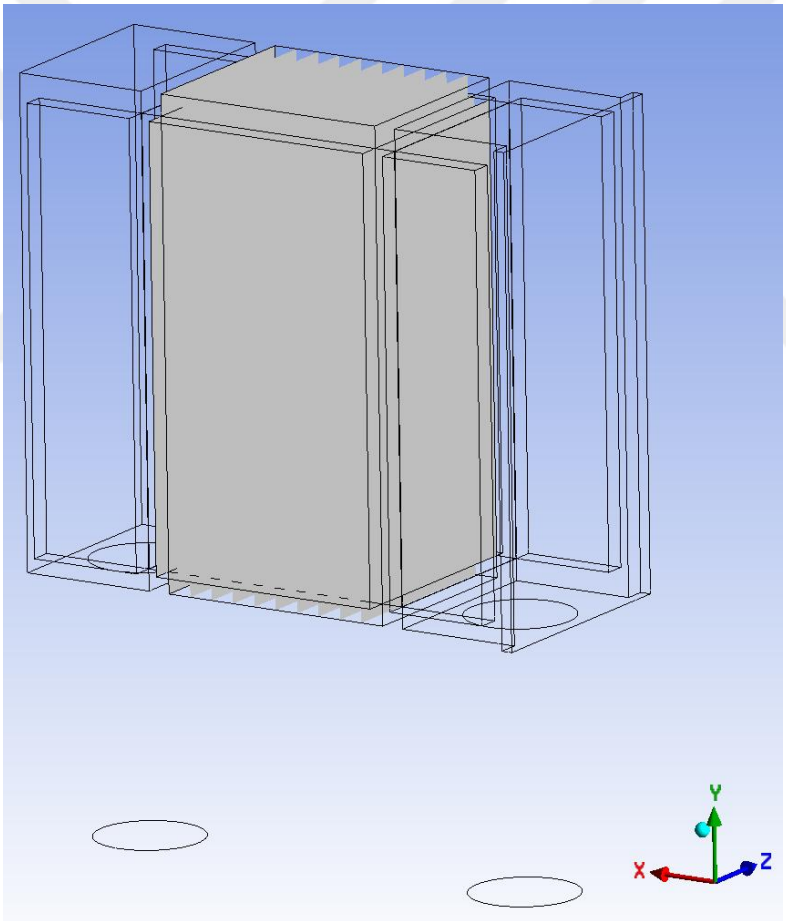
Bu deney çalışması, seçilen plakanın deneysel doğrulama sürecini tamamlayarak hem sayısal analizlerin güvenilirliğini hem de plakanın gerçek kullanım koşullarındaki performansını değerlendirmek açısından önemli bulgular sağlamıştır. Bu veriler, sonraki adımda tüm fırın geometrisi için gözenekli ortam modellemesine geçişte kullanılacaktır.

3.3.3 Gözenekli Fırın Modeli

Tek gruplu delikli plaka analizlerinden elde edilen sonuçlar ve deneysel doğrulamalar, gözenekli fırın modeli için kullanılan katsayıların doğruluğunu göstermiştir. Bu doğrulamalar ışığında, tüm fırın geometrisi için gerçekleştirdiğimiz analizlerde, tasarımın akış homojenliği (üniformite indeks) ve basınç kaybı üzerindeki etkilerini incelemek hedeflenmiştir.

Gözenekli fırın modelinde, akışın fırın içerisinde düzgün bir şekilde dağılması, yani yüksek bir üniformite indeks değerine ulaşılması, tasarımın en kritik hedeflerinden biridir. Bununla birlikte, basınç kaybının da minimum düzeyde tutulması

gerekmektedir. Analizler sonucunda her bir boşluk oranı ve delik çapı için farklı üniformite indeks ve basınç kaybı değerleri elde edilmiştir. Üniformite indeks değeri, (3.7) ve (3.8)'e göre hesaplanmaktadır. Bu denklemlere göre, yüzey üzerinden hız değişimlerini kullanarak üniformite indeks hesaplanmıştır. Bu amaçla, fırın içi akış alanı 44 mm aralıklarla 11 eş parçaya bölünmüş ve bu alanlarda 11 adet sanal yüzey tanımlanmıştır (Şekil 3.29). Bu şekilde fırının her bölgesinde akış homojenliği kontrol edilmiştir. Her bir sanal yüzeydeki hız dağılımlarına bağlı olarak üniformite indeks hesaplanmış ve (Tablo 3.11'de) verilen üniformite indeks değerleri, bu yüzeylerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Verilen basınç kaybı değerleri ise giriş ve çıkış bölgesindeki statik basınç farkı ile hesaplanmıştır.



Şekil 3. 29 Üniformite indeksinin okunduğu sanal yüzeyler

Tablo 3. 11 Gözenekli fırın modeli analiz sonuçları

Boşluk Oranı	Delik Çapı [mm]	Plaka Kalınlığı [mm]	Üniformite İndeksi	Basınç Kaybı [Pa]
0,2	0,5	0,5	0,88	15,12
		1	0,884	18,89
		2	0,885	25,29
		4	0,888	37,26
	1	1	0,872	12,08
	2	1	0,867	11,41
	3	1	0,873	12,82
	4	1	0,875	12,83
0,3	0,5	1	0,872	13,711
	1	1	0,828	9,855
	2	1	0,793	8,289
	3	1	0,796	8,344
	4	1	0,803	8,561
0,4	0,5	1	0,849	11,513
	1	1	0,846	9,285
	2	1	0,816	8,208
	3	1	0,816	8,102
	4	1	0,822	8,15

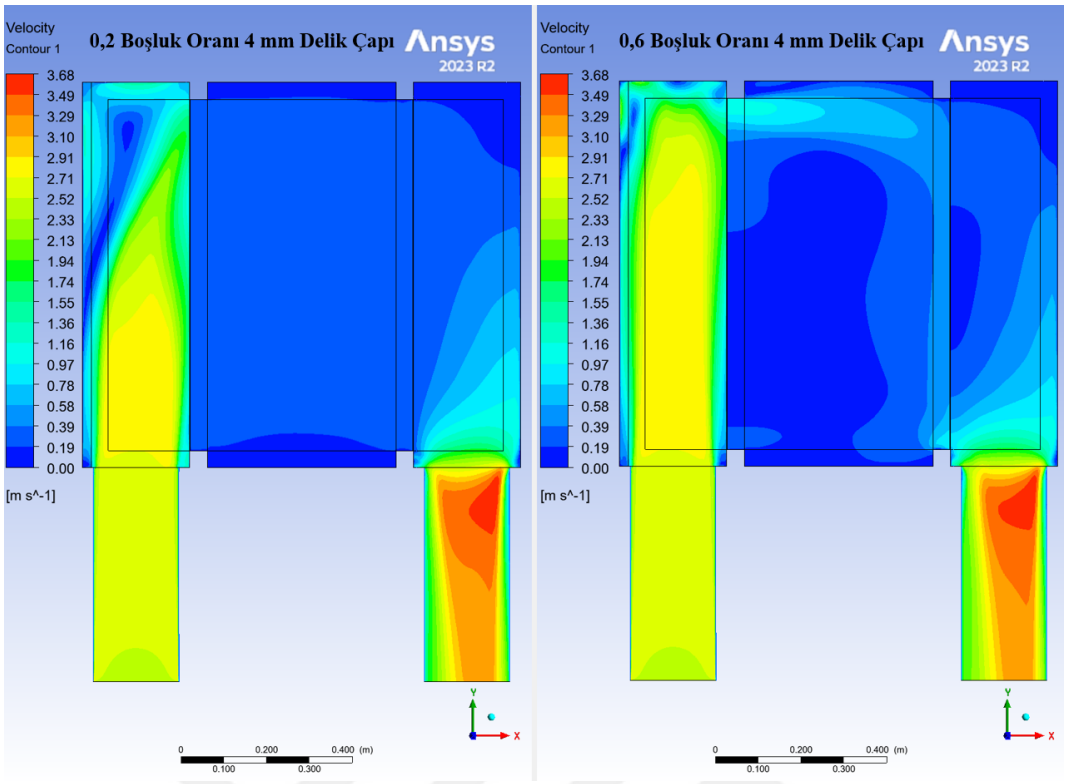
Tablo 3. 11 Gözenekli fırın modeli analiz sonuçları (devamı)

0,5	0,5	1	0,825	10,407
	1	1	0,823	8,753
	2	1	0,791	8,069
	3	1	0,781	7,825
	4	1	0,783	7,836
0,6	0,5	1	0,802	9,551
	1	1	0,799	8,377
	2	1	0,759	7,891
	3	1	0,747	7,757
	4	1	0,742	7,723

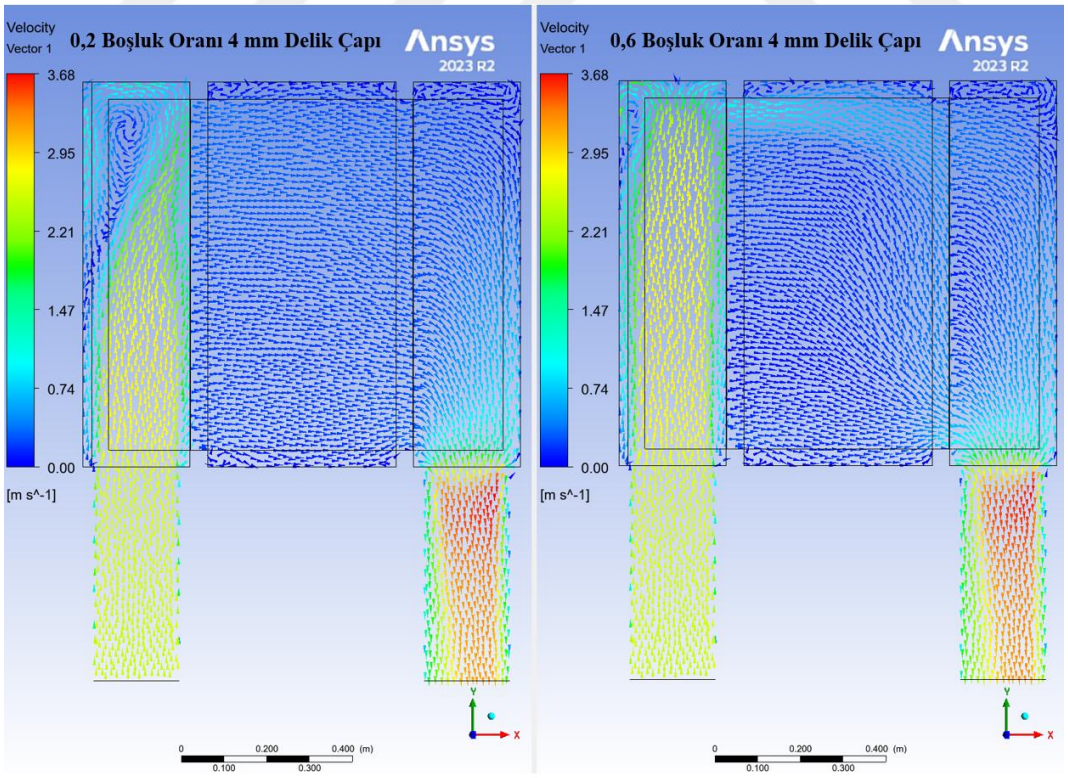
Tablo 3.11 incelendiğinde, üniformite indeksi ve basınç kaybı üzerinde etkili olan üç parametreden söz edilebilir.

3.3.3.1 Boşluk Oranı

Boşluk oranı arttıkça, akışın plakalar arasındaki geniş akış yollarından daha kolay geçmesi nedeniyle üniformite indeks değerinde azalma gözlenmiştir. Örneğin, 0,2 boşluk oranı ve 4 mm delik çapında üniformite indeks 0,875 iken, 0,6 boşluk oranı ve 4 mm delik çapında bu değer 0,742'ye düşmüştür. (Şekil 3.30 ve 3.31)'de her iki plaka için fırının orta kesitinden alınan bir düzlem üzerinden (XY-Düzlemi, Z=0,238) akışın hız davranışları gösterilmiştir.



Şekil 3. 30 0,2 ve 0,6 boşluk oranlı gözenekli fırın modeli- hız konturları karşılaştırması

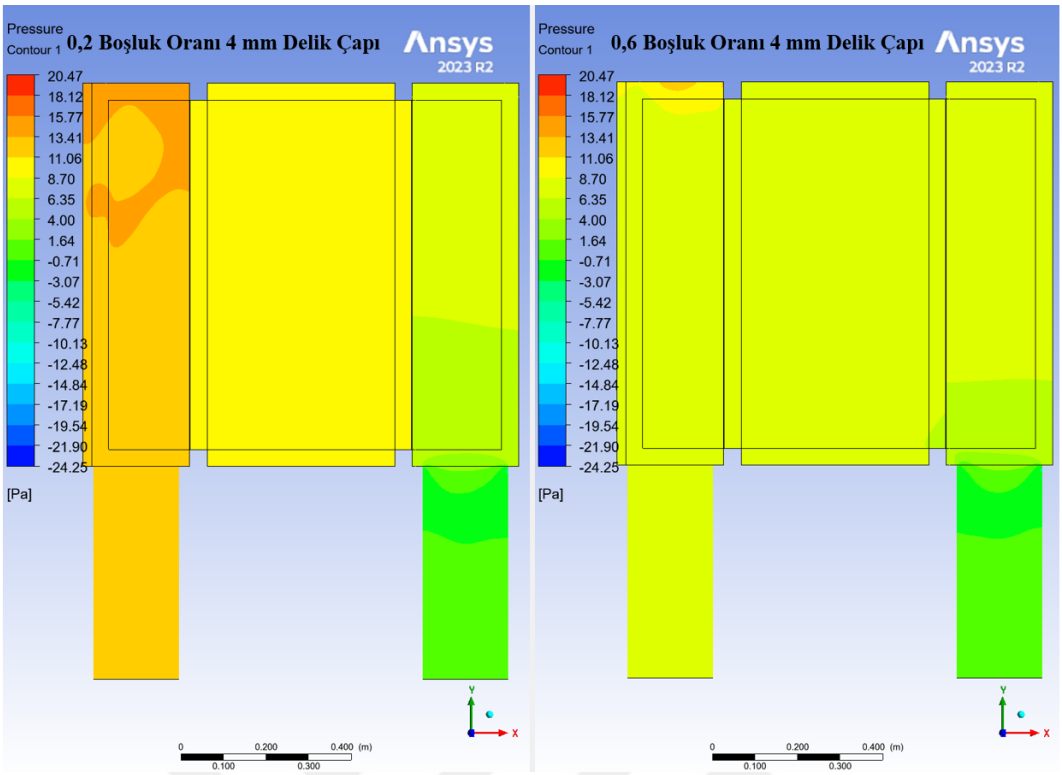


Şekil 3. 31 0,2 ve 0,6 boşluk oranlı gözenekli fırın modeli- hız vektörleri karşılaştırması

Şekil 3.30 incelendiğinde, daha düşük bir boşluk oranı, hızın fırın içindeki dağılımını daha kontrollü hale getirirken daha az türbülanslı bir akış gözlemlenmektedir. Plaka arkasındaki hız dağılımında daha belirgin bir homojenlik sağlanmış ve yüksek hız bölgeleri dar bir alana yayılmıştır. Daha yüksek boşluk oranına sahip bir plaka kullanıldığında ise akış dağılımının daha az homojen olduğu görülmektedir. Yüksek hız bölgeleri, fırının arkasına daha geniş bir alanda yayılmakta ve plaka sonrası akış daha dağınık bir yapı göstermektedir. Bu durum, akışın üniformitesini düşürmektedir.

Şekil 3.31 incelendiğinde ise, düşük boşluk oranı nedeniyle plaka arkasındaki akış vektörleri daha düzenli bir şekilde hizalanmıştır. Akış çizgileri, plakanın fırın içindeki etkisini belirgin bir şekilde göstermekte ve plaka arkasında düşük türbülanslı bir akış elde edilmiştir. Yüksek boşluk oranında ise akış vektörleri daha dağınık ve türbülanslı bir yapı sergilemektedir. Akışın plaka arkasında geniş bir alana yayıldığı ve fırın içindeki hız dağılımını kontrol etmenin daha zor hale geldiği gözlemlenmektedir.

Boşluk oranın değişiminin basınç kaybı üzerindeki etkileri incelendiğinde, boşluk oranı arttıkça, akış direnci azalmakta ve buna bağlı olarak basınç kaybı değerleri düşmektedir. Yine aynı iki plaka için düşünülürse, 0,2 boşluk oranında 12,83 Pa olarak ölçülen basınç kaybı, 0,6 boşluk oranında 7,723 Pa'ya kadar düşmüştür. (Şekil 3.33’te) her iki plaka için fırının orta kesitinden alınan bir düzlem üzerinden (XY-Düzlemi, Z=0,238) fırın içindeki basıç konturları gösterilmiştir.



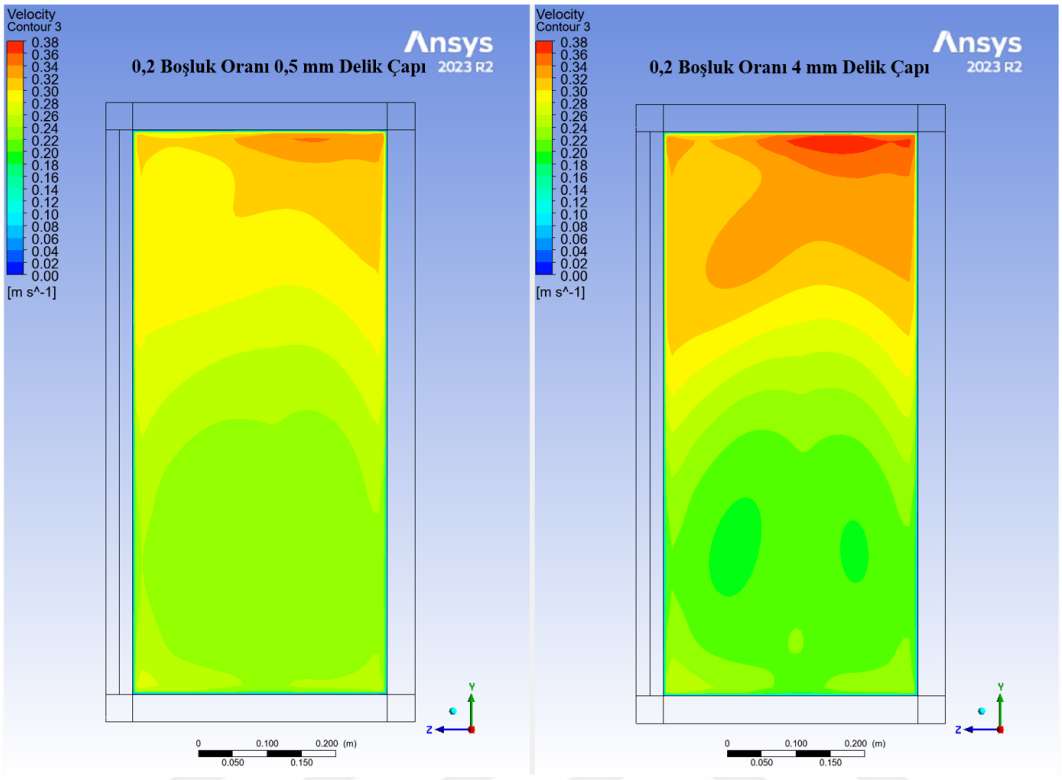
Şekil 3. 32 0,2 ve 0,6 boşluk oranlı gözenekli fırın modeli- basınç konturları karşılaştırması

Şekil 3.32 incelendiğinde, daha düşük bir boşluk oranına sahip plakanın, plaka arkasında belirgin bir basınç düşüşüne neden olduğu gözlemlenmektedir. Plakanın ön tarafında nispeten daha yüksek bir basınç bölgesi oluşmuşken, arka tarafta daha düşük basınç düşüşleri gözlenmektedir. Bu durum, akışın plaka arkasında yüksek hızlara ulaştığı ve basıncın düşüş gösterdiği bölgeleri işaret etmektedir. Düşük boşluk oranı, akışın dar bir alandan geçmesine neden olarak basınç düşüşünün daha belirgin hale gelmesini sağlamaktadır. Daha yüksek boşluk oranına sahip bir plaka kullanıldığında ise, basınç düşüşünün daha az olduğu gözlemlenmektedir. Plakanın ön ve arka tarafları arasındaki basınç farkı daha düşük olup, akış daha geniş bir alana yayılarak basınç düşüşünü azaltmaktadır.

3.3.3.2 Delik Çapı

Delik çapı, plaka üzerindeki akışın homojenliği ve direnci üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Delik çapı arttıkça üniformite indeks değeri hafif bir düşüş göstermektedir. Örneğin, 0,2 boşluk oranı ve 1mm plaka kalınlığı için 0,5 mm delik çapında indeks 0,884 iken, 4 mm delik çapında bu değer 0,875'e düşmüştür. Şekil

3.33'te plakanın hemen önünden alınan kesit (YZ-Düzlemi X=-0,6471) üzerinden fırın içindeki hız dağılımı gösterilmiştir.

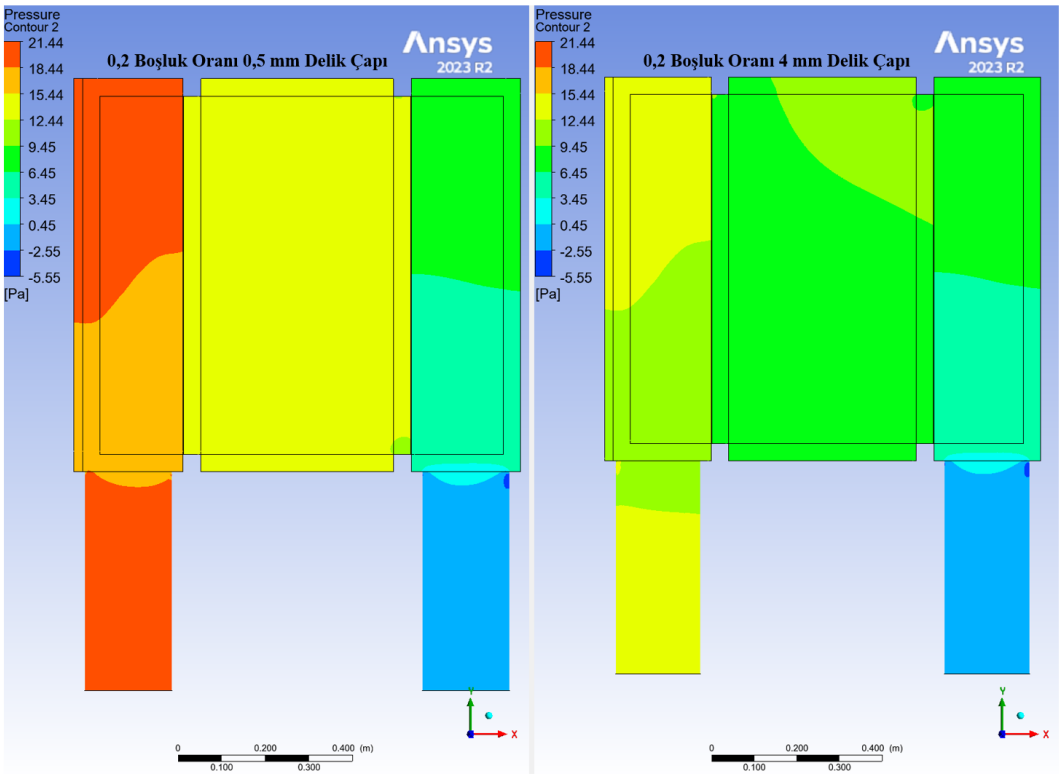


Şekil 3. 33 0,2 Boşluk oranlı plakaların 0,5 mm ve 4 mm delik çapı hız konturları karşılaştırması

Şekil 3.33'te görüldüğü üzere, 0,5 mm delik çapında akış, plaka boyunca oldukça düşük hızlarla hareket etmekte ve daha geniş bir alanda yayılmaktadır. Akış, plaka boyunca oldukça düşük hızlarla hareket etmekte ve daha geniş bir alanda yayılmaktadır. Bu da hız konturlarında genel olarak daha geniş ve homojen bir dağılıma sebep olmaktadır.

Diğer taraftan 4 mm delik çapında ise, delik çapının artışıyla, plaka arkasındaki hız değerleri belirgin şekilde artmış ve hız konturlarında lokal yüksek hız bölgeleri (kırmızı alanlar) oluşmuştur. Bu, daha geniş delik çaplarının akışı serbestleştirdiğini ve plaka arkasında türbülanslı bir akış yapısı oluşturduğunu göstermektedir. Hız konturlarında gözlemlenen lokal farklılıklar, üniformitenin bu durumda daha düşük olabileceğini işaret etmektedir.

Şekil 3.34'te ise her iki plaka için fırının orta kesitinden alınan bir düzlem üzerinden (XY-Düzlemi, Z=0,238) fırın içindeki basıç konturları gösterilmiştir.



Şekil 3. 34 0,2 Boşluk oranlı plakaların 0,5 mm ve 4 mm delik çapındaki basınç konturları karşılaştırması

Şekil 3.34 incelendiğinde, 0,5 mm delik çapında küçük delik çapı nedeniyle, plakanın giriş yüzeyinde daha yüksek basınç değerleri (turuncu-kırmızı bölgeler) görülmektedir. Bu, akışın plaka boyunca geçişinde daha fazla direnç ile karşılaştığını göstermektedir. Plakanın çıkışında ise basınç düşük seviyelere inmiştir (mavi bölgeler), bu durum akışın dar deliklerden geçerken enerji kaybına uğradığını gösterir. 4 mm delik çapında ise giriş yüzeyindeki basıncı önemli ölçüde düşürmüştür. Turuncu-kırmızı bölgeler yerine, giriş yüzeyinde yeşil tonların hâkim olması, akışın daha az dirençle karşılaştığını göstermektedir. Çıkış bölgesinde de daha dengeli bir basınç dağılımı gözlenmektedir, bu da akışın daha serbest hareket ettiğini işaret eder.

Tablo 3.11 incelendiğinde delik çapı ile ilgili bir değişimde göz ardı edilmemelidir. Delik çapının 0,5 mm'den 2 mm'ye kadar artışıyla, üniformite değerinde bir azalma görülmektedir. Bu durum, deliklerin büyümesiyle akışın plaka arkasında daha serbest hareket etmesi ve akışın kontrol edilmesinin zorlaşmasıyla açıklanabilir. Bu esnada basınç kaybı azalmaktadır çünkü daha büyük delik çapları, akışın plaka

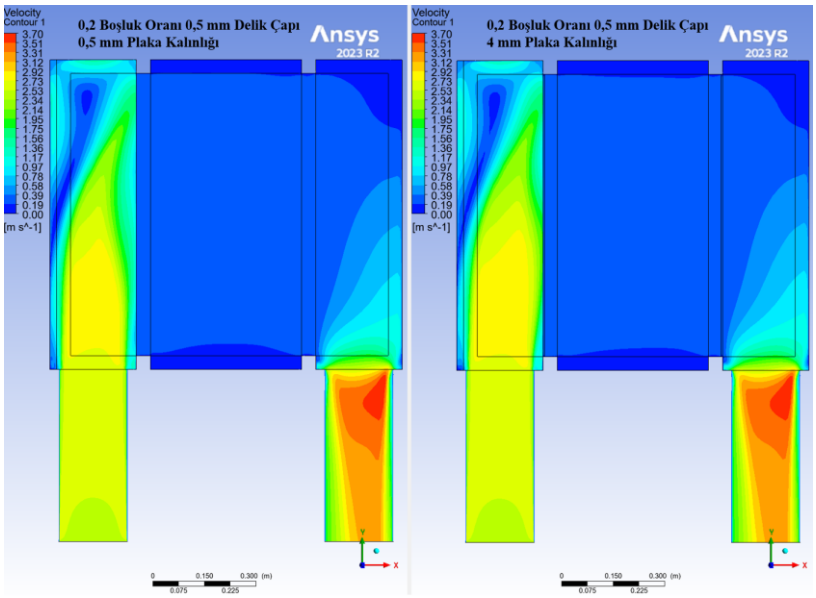
boyunca daha düşük dirençle geçmesine olanak sağlar. Bunun sonucu olarak enerji kayıpları azalmaktadır.

Delik çapı 2 mm'den 4 mm'ye çıktığında, üniformite değerlerinin yeniden yükselmeye başladığı görülmektedir. Bunun nedeni, daha büyük deliklerin akışın dağılımını iyileştirerek daha homojen bir hız profili oluşturması olabilir. Büyük delik çapları, akışın plaka arkasında daha düzenli ve simetrik bir şekilde dağılmasını sağlar. Ancak bu durumda basınç kaybı yeniden artmaktadır. Bunun sebebi, büyük çaplı deliklerde akış hızlarının artması ve daha fazla kinetik enerji kaybına neden olmasıdır.

Bu davranış, akışkan dinamiklerindeki geçiş bölgeleri ile açıklanabilir. Küçük delik çaplarında akış daha dirençli bir şekilde yönlendirilirken, büyük delik çaplarında akışın serbestleşmesi ile hem türbülans oluşumu hem de enerji kayıpları artar. 2 mm çaptan itibaren, delik çapının akış üzerindeki dengeleyici etkisi artar ve akış yeniden homojenleşir. Ancak, daha geniş bir delik açıldığında yüksek hızlar nedeniyle basınç kayıpları da kaçınılmaz hale gelir.

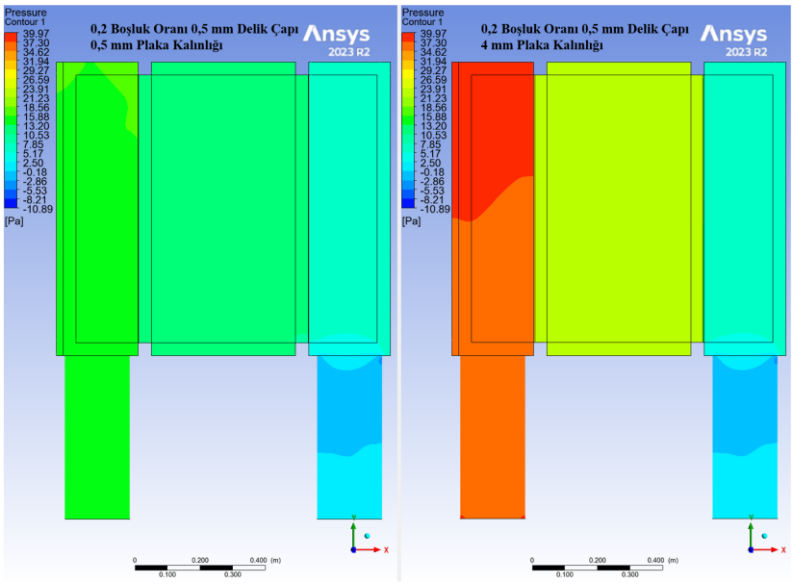
3.3.3.3 Plaka Kalınlığı

Plaka kalınlığı, akışın plakadan geçerken karşılaştığı direnç miktarını belirlemede kritik bir parametredir. Plaka kalınlığı arttıkça üniformite indeksinde belirgin bir değişim görülmemiştir. Örneğin, 0,2 boşluk oranı ve 0,5 mm delik çapı için 0,5 mm kalınlıkta indeks 0,884, 4 mm kalınlıkta ise 0,888 olarak kalmıştır. Şekil 3.35'te orta kesit üzerinden alınan bir düzlem üzerinden fırın içerisindeki akışın hız dağılımları gösterilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü üzere kalınlığın değişimiyle akış homojenliğinde çok büyük bir değişiklik gözlenmemiştir. Hız davranışları her iki plaka kalınlığında da hemen hemen aynı kalmıştır.



Şekil 3. 35 0,2 Boşluk oranı,0,5 mm delik çapında 0,5 mm ve 4 mm plaka kalınlığı hız konturları karşılaştırması

Plaka kalınlığı arttıkça, akışkanın plakadan geçerken karşılaştığı direnç artmaktadır. 0,2 boşluk oranı ve 0,5 mm çap için 0,5 mm kalınlıkta 18,89 Pa olan basınç kaybı, 4 mm kalınlıkta 37,26 Pa'ya yükselmiştir. Daha kalın plakalar, basınç kaybını belirgin bir şekilde artırmıştır. (Şekil 3.36).



Şekil 3. 36 0,2 Boşluk oranı,0,5 mm delik çapında 0,5 mm ve 4 mm plaka kalınlığı basınç konturları karşılaştırması

Şekil 3.36 incelendiğinde daha ince bir plaka kalınlığına sahip olan geometri, akışın daha serbest geçmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle plakanın giriş bölgesinde daha düşük bir basınç alanı görülmektedir. Tam tersinde daha kalın bir plaka, akışa daha fazla direnç göstermekte ve plakanın giriş kısmında turuncu-kırmızı tonlarda daha yüksek basınç değerleri ortaya çıkmaktadır. Kalın plaka nedeniyle giriş ve çıkış basıncı arasındaki fark belirgin şekilde artmaktadır. Bu durum, yüksek basınç kaybı anlamına gelmektedir.

Bu analizlerden ve görsellerden elde edilen veriler ışığında, 0,2 boşluk oranı, 4 mm delik çapı ve 1 mm plaka kalınlığı, maksimum üniformite indeks ve minimum basınç kaybı dengesini sağlayan en uygun tasarım olarak öne çıkmaktadır. Bu kombinasyon, fırın içi akış dağılımında yüksek homojenlik sunarken enerji kaybını makul bir seviyede tutmaktadır. Daha kalın plaka kullanımı akış kontrolünü artırsa da, enerji verimliliği açısından olumsuz etki yaratmaktadır.

3.4 Parametreler Arası İlişki ve Tahmin Yöntemleri

Bu bölümde, delikli plakalar ve gözenekli fırın modelleri için gerçekleştirilen analiz sonuçları, parametreler arası ilişkiler ve basınç kaybı ile üniformite indeksine olan etkileri incelenmiştir. Analizler, Minitab 22 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve parametrelerin birbirleriyle olan ilişkisi Pearson Korelasyon Katsayısı ve regresyon analizi yöntemi ile değerlendirilmiştir. Amaç, parametrelerin basınç kaybı ve üniformite indeksine etkilerini açıklamak, bu değerler üzerinde tahminde bulunmak ve okuyucular için gelecekteki tasarımlara yol gösterici bir yapı sunmaktır.

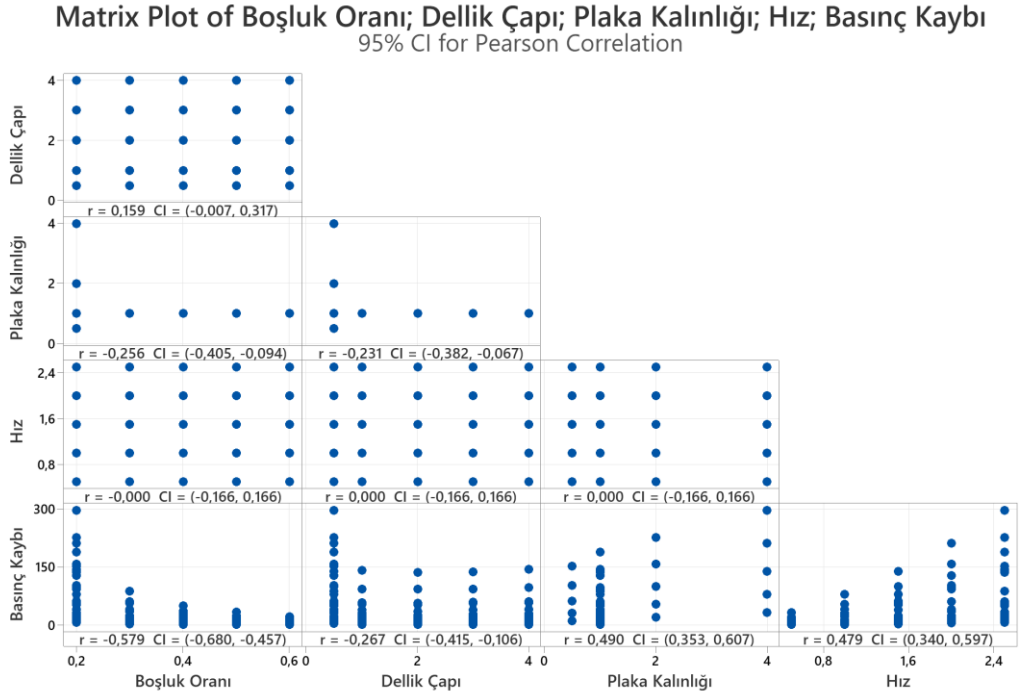
3.4.1 Tek Gruplu Delikli Plaka Modeli

Tek gruplu delikli plaka modeli ile sadece delikli plaka geometrisini içeren modelin analizleri gerçekleştirilmişti. Bu çalışmada, boşluk oranı, delik çapı, plaka kalınlığı ve hız gibi değişkenlerin basınç kaybı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen veriler, Minitab yazılımı kullanılarak korelasyon ve regresyon analizlerine tabi tutulmuş, bu sayede değişkenler arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir.

3.4.1.1 Korelasyon Analizi

Korelasyon analizi ile parametreler arasındaki doğrusal ilişkilerin gücü belirlenmiş, sonuçlar ışığında basınç kaybı tahminlerine yönelik modellemeler yapılmıştır.

Şekil 3.37'de gösterilen korelasyon matris tablosu, her bir parametre çifti arasındaki Pearson korelasyon katsayılarını ve güven aralıklarını göstermektedir.



Şekil 3. 37 Boşluk oranı,delik çapı,plaka kalınlığı ve hız parametrelerinin basınç kaybı ile ilşkisi

Pearson korelasyon katsayısı (r), iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin gücünü ve yönünü ölçen bir istatistiksel ölçüttür.Katsayı -1 ile +1 arasında değer alır:

- r=+1 İki değişken arasında tam pozitif bir doğrusal ilişki vardır
- r=-1 İki değişken arasında tam negatif bir doğrusal ilişki vardır
- r=0 İki değişken arasında doğrusal bir ilişki yoktur.

Pozitif r değerleri, bir değişken artarken diğerinin de arttığını; negatif r değerleri ise bir değişken artarken diğerinin azaldığını ifade eder. |r| büyüklüğü, ilişkinin gücünü gösterir; |r| değeri ne kadar büyükse, ilişki o kadar kuvvetlidir.

Şekil 3.37'de tablonun üstünde yazan %95 güven aralığı, korelasyon katsayısının belirli bir güven düzeyinde (burada %95) hangi aralıkta yer aldığını gösterir. Güven aralığı, r değerinin istatistiksel güvenilirliğini ifade eder. Eğer güven aralığı sıfırı

içermiyorsa, korelasyon katsayısının anlamlı olduğu söylenebilir. Örneğin: Boşluk oranı ile basınç kaybı arasındaki r=−0,579 değeri, güven aralığı [−0,680,−0,457] ile sıfırı içermediği için istatistiksel olarak anlamlıdır.

(Şekil 3.37) incelendiğinde, boşluk oranı ile basınç kaybı arasındaki korelasyon kat saysının r=−0,579 olması, iki değişken arasında negatif ve orta kuvvetli bir ilişki olduğunu gösterir. Boşluk oranı arttıkça basınç kaybının azaldığı söylenebilir.

Delik çapı ve boşluk oranı arasındaki ilişkeye bakılacak olunursa, aralarındaki korelasyon sayısı r=-0,267, iki değişken arasında zayıf bir negatif ilişki olduğunu göstermektedir. Bu durum, delik çapının artmasıyla basınç kaybında azalma eğilimi olabileceğine işaret eder ancak bu ilişki çok güçlü değildir.

Plaka kalınlığının basınç kaybıyla olan ilişkisi incelendiğinde, korelasyon katsayısı r=0,490, iki değişken arasında pozitif ve orta kuvvetli bir ilişki olduğunu gösterir. Plaka kalınlığının artması, basınç kaybını artırmaktadır.

Basınç kaybının hızla olan değişimi incelendiğinde ise, korelasyon katsayısı r=0,479, hızın artışı ile basınç kaybı arasında pozitif ve orta kuvvetli bir ilişki olduğunu ifade eder. Daha yüksek hızlarda, basınç kaybının artması beklenmektedir.

Boşluk oranıyla diğer değişken parametrelerin (delik çapı, plaka kalınlığı ve hız gibi) aynı şekilde diğer bütün değişken parametrelerimiz kendi aralarında anlamlı bir bağlantı beklenmemelidir. Şekil 3.37'de açıkça görüldüğü üzere, korelasyon değerlerinin Cl değerleri arasında sıfır olmaktadır. Aralarında anlamlı bir bağlantı yani bir birinden bağımsız değişkenler olduğu çıkmaktadır.

3.4.1.2 Regrasyon Analizi

Regresyon analizi, bağımlı bir değişken (basınç kaybı) ile bağımsız değişkenler (boşluk oranı, delik çapı, plaka kalınlığı ve hız) arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak modellemek ve bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler üzerindeki etkisini incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu analiz, değişkenler arasında nasıl bir ilişki olduğunu anlamanın yanı sıra, elde edilen formül ile bağımlı değişkenin belirli değerlerini tahmin etmeyi sağlar. Bu çalışma kapsamında, delikli plaka modelinin analizi için yapılan regresyon, basınç kaybını etkileyen ana parametreleri tanımlamak ve etkilerini ölçmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Regrasyon analizi sonucunda elde edilen eşitlik 3.14'te gösterilmiştir:

$$\text{Basınç Kaybı}=20,5-162,4\text{Boşluk Oranı}-4,36\text{Delik Çapı}+29,24\text{Plaka Kalınlığı}+34,22\text{Hız} \quad (3.14)$$

Bu denklem, basınç kaybını etkileyen her bir parametrenin (bağımsız değişkenin) etkisini numerik olarak ifade etmektedir. Regresyon katsayıları, bağımsız değişkenlerde bir birimlik artışın basınç kaybında ne kadar bir değişime neden olduğunu gösterir.

Örneğin, boşluk oranındaki bir birimlik artış, basınç kaybında 162,4 Pa'lık bir azalmaya yol açmaktadır. Negatif katsayı, boşluk oranının basınç kaybını ters orantılı olarak etkilediğini ifade eder. Delik çapında bir birimlik artış, basınç kaybını 4,36 Pa azaltmaktadır. Bu da delik çapının büyümesinin, akışkanın daha rahat geçmesine ve dolayısıyla basınç kaybının azalmasına neden olduğunu gösterir. Plaka kalınlığı bir birim arttığında, basınç kaybı 29,24 Pa artmaktadır. Daha kalın plakalarda akış direnci arttığı için basınç kaybı yükselmektedir. Hızdaki bir birimlik artış, basınç kaybında 34,22 Pa artışa sebep olmaktadır. Bu, yüksek hızların daha fazla basınç kaybına neden olduğunu ortaya koyar. Katsayılar Tablo 3.12'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 12 Regrasyon analizi katsayıları

Parametre	**Katsayı**	**SE Katsayısı**	**T-Değeri**	**P-Değeri**	**VIF**
Sabit Değer	20,5	11,1	1,85	0,067	-
Boşluk Oranı	-162,4	16,8	-9,69	0,000	1,08
Delik Çapı	-4,36	1,88	-2,32	0,022	1,07
Plaka Kalınlığı	+29,24	4,23	6,91	0,000	1,11
Hız	+34,22	3,36	10,19	0,000	1,00

Tablo 3.12'de verilen, SE katsayısı, katsayıların tahminindeki belirsizlik miktarını ifade eder. Küçük SE katsayı değerleri, katsayıların güvenilir olduğunu gösterir. T-değeri ise değişkenlerin modeldeki anlamlılığını test eder. Yüksek mutlak T-değerleri, değişkenin model için önemli olduğunu belirtir. Örneğin bizim analizlerimde basınç kaybına en çok etki eden değerlerimiz boşluk oranı (-9,69) ve hız (10,19) parametrelerimiz olmaktadır. Tabloda yazan P-değeri ise, 0,05'ten küçük olan değişkenler, model için anlamlıdır çıkarımını yapmayı sağlamaktadır. Son olarak tabloda yer alan VIF değeri ise, bağımsız değişkenler arasında çoklu bağlantı olup olmadığını kontrol eder. Buradaki düşük VIF değerleri (<5), bağımsız değişkenlerin birbirine bağlı olmadığını gösterir.

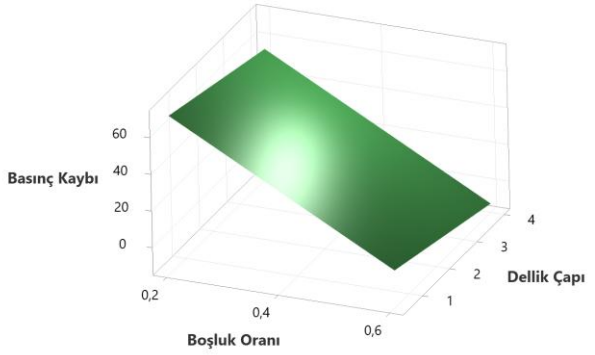
Yapılan regrasyon analizinin çıktılarını değerlendirip, nihai olarak karar vermek için model özetindeki dört parametre mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

- R-sq(R-Kare): Modelin bağımlı değişkendeki toplam değişimin ne kadarını açıkladığını gösterir. Burada %70,18'lik bir oran, modelin oldukça açıklayıcı olduğunu gösterir.Genel bir kural yoktur genelleme olarak şu şekilde düşünülebilir:
  R^2<0,5 (Zayıf açıklayıcı model)
  0,5≤ R^2≤0,7 (Orta açıklayıcı model)
  R^2≥0,7 (Güçlü açıklayıcı model)
- Adjusted R-sq (Düzeltilmiş R-Kare): Bağımsız değişken sayısına göre R-sq değerini düzeltir. %69,30, modelin genel performansının iyi olduğunu ifade eder.
- R-sq(pred) (Tahmin Edilmiş R-Kare): Modelin yeni verilere karşı tahmin başarısını gösterir. %64,76'lık oran, modelin yeni veriler üzerinde makul bir başarı sağladığını ortaya koyar.
- S: Tahmin edilen değerlerin, gerçek değerlerden ne kadar sapabileceğini gösterir. Daha küçük bir S değeri, modelin daha doğru olduğunu ifade eder.Bu modelde S değeri 28,08'dir.

Regrasyon analizi, bağımsız değişkenlerin ayrı ayrı basınç kaybına etkisini incelemenin yanı sıra iki farklı parametrenin aynı anda basınç kaybına olan etkisinide inceleme fırsatı sunmaktadır.

✓ **Basınç kaybı vs delik çapı ve boşluk oranı**

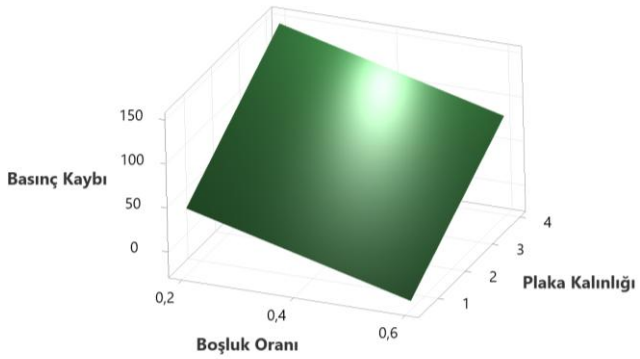
- Şekil 3.38 incelendiğinde delik çapı büyüdükçe ve boşluk oranı arttıkça, basınç kaybı genel olarak azalmaktadır.
- En düşük basınç kaybı, yüksek delik çapı (4 mm) ve yüksek boşluk oranında (0,6) elde edilmiştir. Bu, akışın daha rahat ilerlediğini ve direnç seviyesinin azaldığını gösterir.
- Yüksek basınç kaybı, düşük delik çapı ve düşük boşluk oranında ortaya çıkar.



Şekil 3. 38 Basınç kaybı vs delik çapı ve boşluk oranı

✓ **Basınç Kaybı vs plaka kalınlığı ve boşluk oranı**

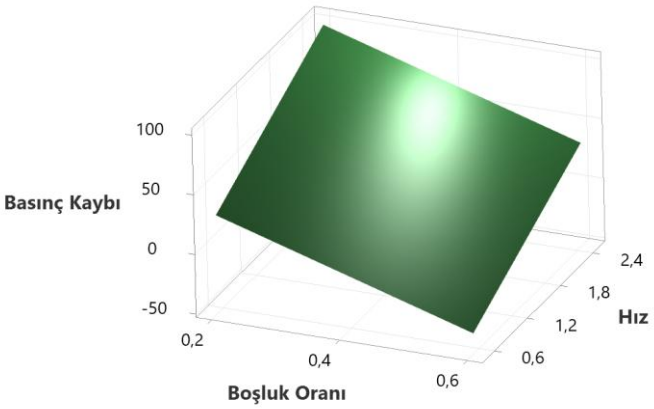
- Şekil 3.39 incelendiğinde, düşük boşluk oranlarında (0,2) ve yüksek plaka kalınlıklarında (4 mm) basınç kaybı oldukça yüksektir.
- Yüksek boşluk oranı (0,6) ve düşük plaka kalınlıkları basınç kaybını minimuma indirmektedir.
- Basınç kaybının, plaka kalınlığının artışıyla anlamlı şekilde yükseldiği ifade edilebilir. Yüksek boşluk oranı, düşük basınç kaybını desteklerken, kalın plaka kullanımı basınç kaybını artırır.



Şekil 3. 39 Basınç kaybı vs plaka kalınlığı ve boşluk oranı

✓ **Basınç Kaybı vs Hız ve Boşluk Oranı**

- Şekil 3.40 incelendiğinde, hız arttıkça, boşluk oranından bağımsız olarak, basınç kaybı artmaktadır.
- Düşük boşluk oranlarında, hızın etkisi daha çarpıcıdır ve basınç kaybında ciddi bir artış görülmektedir.
- Hızın, basınç kaybı üzerindeki etkisi oldukça baskındır ve düşük boşluk oranında bu etki daha belirgin bir şekilde artmaktadır. Akışın hızlandığı durumlarda, düşük direnç sağlamak için boşluk oranı artırılmalıdır.

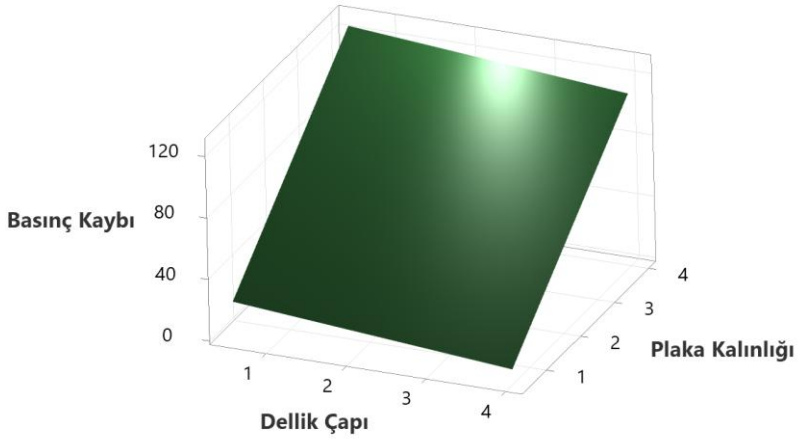


Şekil 3. 40 Basınç kaybı vs hız ve boşluk oranı

✓ **Basınç Kaybı vs plaka kalınlığı ve delik çapı**

- Şekil 3.41 incelendiğinde, kalın plakalar ve küçük delik çaplarında, basınç kaybı oldukça yüksektir.
- İnce plaka ve büyük delik çapı, basınç kaybını minimuma indirir.

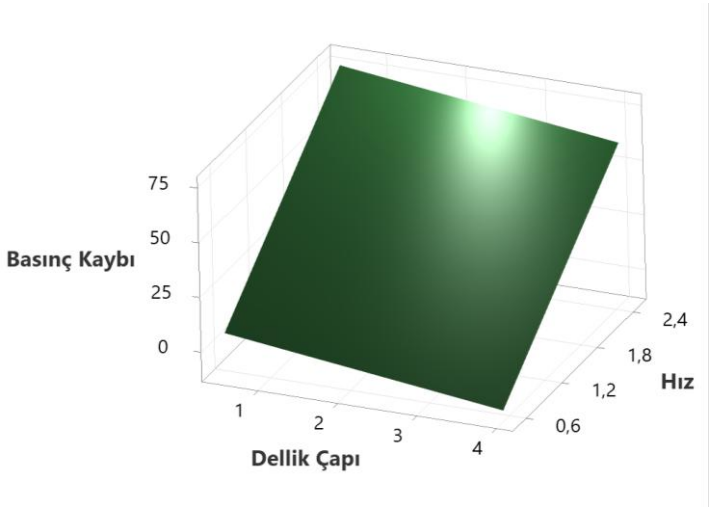
- Kalın plakalarda basınç kaybı artarken, delik çapının büyümesi bu artışı dengeleyebilir.



Şekil 3. 41 Basınç kaybı vs delik çapı ve plaka kalınlığı

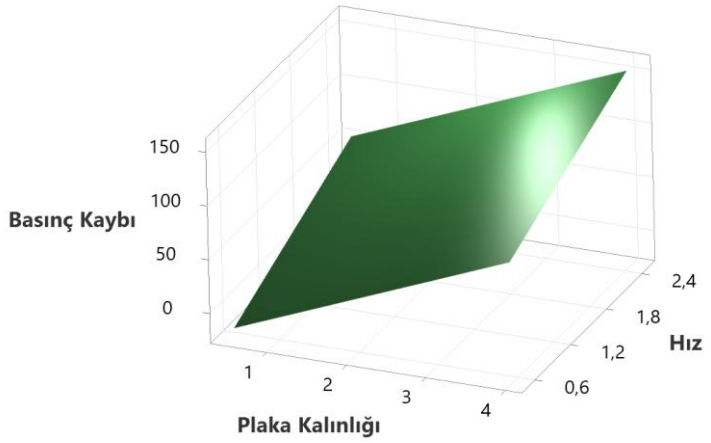
✓ **Basınç Kaybı vs hız ve delik çapı**

- Şekil 3.42 incelendiğinde, delik çapı büyüdükçe, basınç kaybı genellikle azalmaktadır. Özellikle küçük delik çaplarında basınç kaybı oldukça yüksektir.
- Hız arttıkça, basınç kaybı da artış göstermektedir. Özellikle küçük delik çaplarında, hızın artışı basınç kaybını daha fazla görülmektedir.
- Küçük delik çapı ve yüksek hız bir araya geldiğinde, basınç kaybının maksimum seviyelere ulaştığı görülmektedir.
- Büyük delik çapı ve düşük hız kombinasyonunda ise basınç kaybı minimum seviyelere inmektedir. Bu, düşük enerji kaybı isteyen tasarımlar için uygun bir kombinasyon olarak değerlendirilebilir.



Şekil 3. 42 Basınç kaybı vs delik çapı ve hız

- ✓ **Basınç Kaybı vs hız ve plaka kalınlığı**
  - Şekil 3.43 incelendiğinde, yüksek hızlarda, plaka kalınlığının artışı basınç kaybını ciddi şekilde artırmaktadır.
  - Düşük hızlarda, plaka kalınlığına bağlı değişim daha az etkili olduğu görülmekterdir.
  - Hızın artışı ile kalın plakalardaki basınç kaybının hızla yükseldiği söylenebilir.



Şekil 3. 43 Basınç kaybı vs plaka kalınlığı ve hız

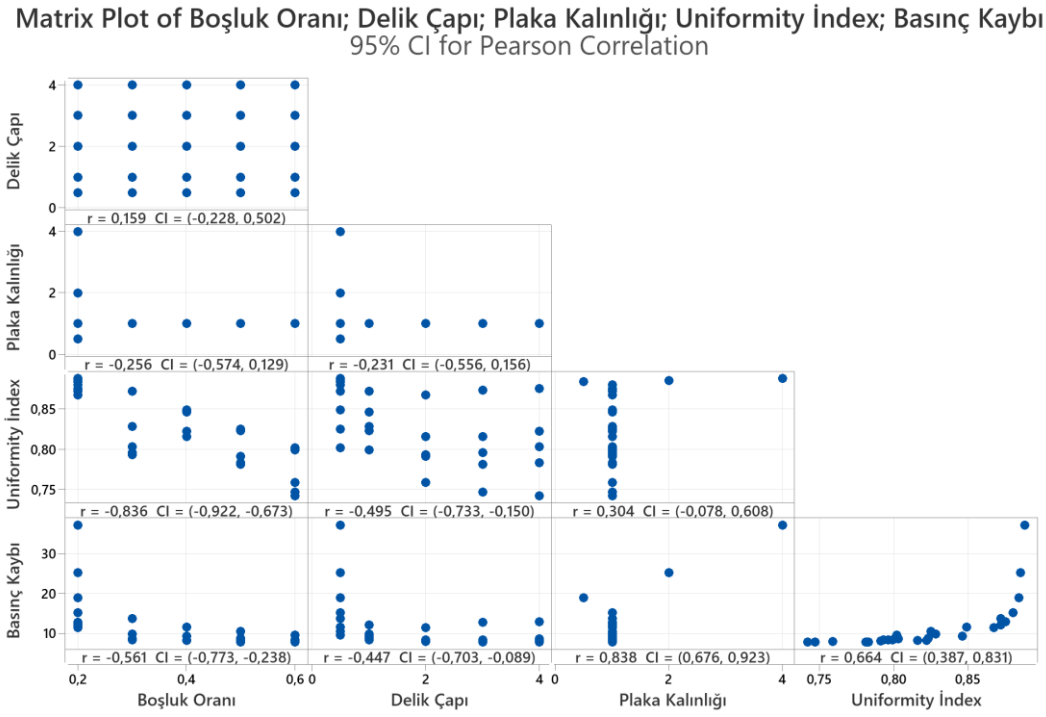
3.4.2 Gözenekli Fırın Modeli

Gözenekli fırın modeli, basınç kaybı ve akışın üniform dağılımını sağlama hedefleri doğrultusunda bir çok HAD analizi gerçekleştirilmişti. Bu çalışmada, boşluk oranı,

delik çapı ve plaka kalınlığı gibi tasarım parametrelerinin, basınç kaybı ve üniformite indeks üzerindeki etkileri korelasyon ve regrasyon analizleri kullanılarak incelenecektir.

3.4.2.1 Korelasyon Analizi

Gözenekli fırın modeline ait tasarım parametreleri (boşluk oranı, delik çapı ve plaka kalınlığı) ile performans çıktıları (basınç kaybı ve üniformite indeks) arasındaki doğrusal ilişkileri incelemek amacıyla Pearson Korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Korelasyon katsayısı, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin yönü ve gücünü ifade eder. Değer aralığı -1 ile +1 arasında değişir; +1 güçlü bir pozitif ilişkiyi, -1 ise güçlü bir negatif ilişkiyi ifade eder. 0 değeri, iki değişken arasında doğrusal bir ilişkinin olmadığını gösterir. Korelasyon analizi çıktısı Şekil 3.44'te verilmiştir. Çıktıda %95 güven aralığı verilmiştir. Bu aralık, korelasyon katsayısının belirtilen sınırlar arasında bir değer alma olasılığını gösterir.



Şekil 3. 44 Gözenekli fırın modeli korelasyon analizi çıktısı

Şekil 3.44 incelendiğinde, boşluk oranı ile üniformite indeks arasında güçlü bir negatif korelasyon bulunmuştur (r = -0,836, Cl = [-0,922, -0,673]). Bu, boşluk oranının artmasının üniformite indeksi düşürdüğünü göstermektedir. Daha düşük boşluk oranları, daha homojen bir akış profili sağlamaktadır.

Boşluk oranı ile basınç kaybı arasında orta seviyede bir negatif ilişki tespit edilmiştir (r = -0,561, Cl = [-0,773, -0,238]). Bu durum, boşluk oranının artmasının basınç kaybını azalttığını göstermektedir.

Delik çapı ile üniformite indeks arasında orta seviyede bir negatif korelasyon gözlemlenmiştir (r = -0,495, Cl = [-0,733, -0,150]). Delik çapının artması, akış homojenliğini bir miktar düşürmektedir.

Delik çapı ile basınç kaybı arasında da orta dereceli bir negatif ilişki tespit edilmiştir (r = -0,447, Cl = [-0,703, -0,089]). Delik çapının artması, basınç kaybının azalmasına yol açmaktadır.

Plaka kalınlığı ile basınç kaybı arasında güçlü bir pozitif korelasyon vardır (r = 0,838, Cl= [0,676, 0,923]). Bu sonuç, plaka kalınlığının artmasıyla basınç kaybının önemli ölçüde yükseldiğini göstermektedir.

Plaka kalınlığı ile üniformite indeks arasında zayıf bir pozitif korelasyon bulunmuştur (r = 0,304, Cl = [-0,078, 0,608]). Plaka kalınlığının artması, akış homojenliğini bir miktar iyileştirmektedir.Lakin Cl değerinin sınırları arasında sıfır olduğu için anlamlı bir çıkarım yapmak doğru değildir.

Basınç kaybı ile üniformite indeks arasında orta düzeyde bir pozitif ilişki bulunmaktadır (r = 0,664, CI = [0,387, 0,831]). Akış homojenliği sağlanırken, genelde basınç kaybında da bir artış gözlenmektedir.

3.4.2.2 Regrasyon Analizi

Gözenekli fırın modelinde regrasyon analizi iki bağımlı değişken (basınç kaybı ve üniformite indeksi) için ayrı ayrı gerçekleşitirilecektir.

İlk olarak basınç kaybını etkileyen tasarım parametrelerinin (boşluk oranı, delik çapı ve plaka kalınlığı) etkileri incelenmiştir. Analiz, bu parametrelerin basınç kaybı üzerindeki bağımsız etkilerini anlamak ve bu etkilerin anlamlılık düzeylerini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir.Analiz sonucunda elde edilen regrasyon denklemi ve çıktıları denklem 3.14'teki gibidir:

$$\text{Basınç Kaybı} = 11{,}01 - 14{,}77 \times \text{Boşluk Oranı} - 1{,}113 \times \text{Delik Çapı} + 7{,}373 \times \text{Plaka Kalınlığı} \quad (3.14)$$

Bu denklem, basınç kaybının (bağımlı değişken) her bir tasarım parametresindeki değişimden nasıl etkilendiğini açıklar. Örneğin, boşluk oranı negatif bir katsayıya (-14,77) sahiptir. Bu, boşluk oranı arttıkça basınç kaybının azaldığını göstermektedir. Aynı şekilde delik çapıda negatif bir katsayıya sahiptir (-1,113). Delik çapındaki artışın, basınç kaybını azalttığını ifade eder. Bu iki parametrenin tam aksine, plaka kalınlığı değişkeni pozitif bir katsayıya (7,373) sahiptir. Plaka kalınlığının artışı, basınç kaybını artırmaktadır.

Bu model için regrasyon analiziyle çıkan katsayılar tablosu Tablo 3.13'te verilmiştir.

Tablo 3. 13 Gözenekli fırın modeli basınç kaybı regrasyon analizi katsayılar tablosu

Parametre	Katsayı	SE Katsayısı	T-Değeri	P-Değeri	VIF
Sabit Değer	11,01	1,84	5,99	0,000	-
Boşluk Oranı	-14,77	3,12	-4,73	0,000	1,08
Delik Çapı	-1,113	0,349	-3,19	0,004	1,07
Plaka Kalınlığı	7,373	0,788	9,36	0,000	1,11

Tablo 3.13 incelendiğinde, her bir parametrenin etkisini ve anlamlılığı değerlendirilebilir. T-değeri ve P-değerlerine bakıldığında, her bir parametre için P-değeri 0,05'ten küçüktür, bu da tüm parametrelerin basınç kaybını anlamlı bir şekilde etkilediğini gösterir. Ayrıca tüm değişkenler için VIF değeri 5'in altındadır, bu da multikolineerlik probleminin olmadığını gösterir.

Basınç kaybı için yapılan regrasyon analizinin çıktılarını değerlendirip, nihai olarak karar vermek için model özetindeki dört parametre mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

- R-sq(R-Kare): Modelin açıklama gücünü belirtir. %88,10'luk bir değer, bağımlı değişken olan basınç kaybının %88,10'unun bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını gösterir.
- Adjusted R-sq (Düzeltilmiş R-Kare): Modeldeki açıklama gücünü daha hassas bir şekilde ifade eder (%86,61). Bu değer, modele gereksiz değişken eklenmesinin etkisini azaltır.
- R-sq(pred) (Tahmin Edilmiş R-Kare): Modelin yeni bir veri kümesindeki tahmin başarısını ifade eder (%82,66). Bu değer, modelin genel anlamda güçlü olduğunu ortaya koyar.
- S :Modeldeki hataların standart sapmasıdır (%2,33). Daha düşük bir değer, daha iyi bir model performansı anlamına gelir.

Modelin yüksek R^2 değeri (%88,10), basınç kaybını tahmin etmek için uygun bir model olduğunu göstermektedir.

Diğer bir bağımlı değişken olan üniformite indeksinin regrasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen regrasyon denklemi (3.15) ve çıktıları aşağıda verilmiştir.

$$\text{Üniformite İndeksi} = 0{,}9327 - 0{,}2259 \times \text{Boşluk Oranı} - 0{,}0121 \times \text{Delik Çapı} + 0{,}00159 \times \text{Plaka Kalınlığı} \quad (3.15)$$

Bu denklem, üniformite indeks değerinin (bağımlı değişken) her bir parametre değişiminden nasıl etkilendiğini açıklar. Örneğin boşluk oranı negatif bir katsayıya (-0,2259) sahiptir. Bu, boşluk oranı arttıkça üniformite indeks değerinin düştüğünü göstermektedir. Benzer şekilde delik çapıda negatif bir katsayıya sahiptir (-0,0121). Delik çapındaki artışın üniformite indeks değerini az da olsa düşürdüğünü ifade etmektedir. Plaka kalınlığı parametresine bakıldığında her ne kadar pozitif bir katsayıya sahip olsa bile (0,00159), bu değerin büyüklüğü ve P-value sonuçlarına bakıldığında, plaka kalınlığının üniformite indeks üzerindeki etkisinin anlamlı olmadığı görülmektedir (P-value > 0,05).

Üniformite indeksi için yapılan regrasyon analizinin katsayılar çıktısı Tablo 3. 14'te verilmiştir.

Tablo 3. 14 Gözenekli fırın modeli üniformite indeksi regrasyon analizi katsayılar tablosu

Parametre	Katsayı	SE Katsayısı	T-Değeri	P-Değeri	VIF
Sabit Değer	0,932700	0,0149038	62,58	0,000	
Boşluk Oranı	-0,225908	0,0253125	-8,92	0,000	1,08
Delik Çapı	-0,012113	0,0028324	-4,28	0,000	1,07
Plaka Kalınlığı	0,001592	0,0063886	0,25	0,805	1,11

Katsayılar tablosu, her bir bağımsız değişkenin etkisini ve anlamlılık düzeyini değerlendirebilmek için incelenbilir. P ve T değerleri incelendiğinde, bütün parameteler için sonuçların istatiksel olarak anlamlı ($P<0,05$) olduğunu ve boşluk oranının üniformite indeksine bağımsız değişkenler içinde en büyük etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Üniformite indeksi için yapılan regrasyon analizinin çıktılarını değerlendirip, nihai olarak karar vermek için model özetindeki dört parametre mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır.

- R-sq(R-Kare): Modelin açıklama gücü %83,41'dir. Bu, üniformite indeks değerinin %83,41'inin bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını gösterir.
- Adjusted R-sq (Düzeltilmiş R-Kare): %81,34 değeri, modele gereksiz değişkenler eklenmesi durumunda açıklama gücünü azaltmadan modelin gücünü ifade eder.
- R-sq(pred) (Tahmin Edilmiş R-Kare): %79,18 değeri, modelin yeni bir veri kümesindeki tahmin başarısını gösterir. Modelin güvenilir tahminler üretebildiği söylenebilir.
- S: Modeldeki hataların standart sapması 0,0189'dır. Küçük bir değer, modelin daha hassas olduğunu belirtir.

Modelin yüksek R^2 değeri (%83,41), üniformite indeks değerini tahmin etmek için uygun bir model olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, plaka kalınlığının modele katkısının istatistiksel olarak anlamlı olmadığı göz önünde bulundurularak, bu parametrenin değerlendirilmesi sırasında daha dikkatli olunmalıdır.

4
SONUÇ

Bu çalışmada, delikli plaka ve gözenekli fırın modelleri üzerinde kapsamlı bir analiz gerçekleştirilerek tasarım parametrelerinin akış düzenlemesi ve performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın ana odağı, boşluk oranı, delik çapı, plaka kalınlığı ve hız gibi tasarım parametrelerinin üniformite indeks ve basınç kaybı üzerindeki etkilerini hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle ortaya koymak ve bu sonuçları istatistiksel modellerle destekleyerek tasarım optimizasyonuna yönelik sonuçlar elde etmektir. Aşağıda, çalışmanın her bir aşaması detaylı bir şekilde ele alınarak genel değerlendirmeler sunulmuştur.

4.1 Tek Gruplu Delikli Plaka Modeli: Deneysel Doğrulama ve Regrasyon Analizleri

Tek gruplu delikli plaka modeli, basınç kaybının parametreler üzerindeki etkisini analiz etmek için tasarlanmıştır. Rüzgar tüneli deneyleri, sayısal analizler ve parametrik çalışmalar bu bölümde gerçekleştirilmiştir:

- Deneysel Doğrulama: 0,2 boşluk oranı, 4 mm delik çapı ve 1 mm plaka kalınlığına sahip plaka kullanılarak, farklı hızlarda (0,5 m/s – 2,5 m/s) basınç farkları ölçülmüş ve HAD simülasyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar uyum göstermiştir. Ortalama %6'ın altında bir değerle doğrulama gerçekleştirilmiştir.

Bu analizler, tek gruplu delikli plaka modeli için kullanılan sayısal modelin güvenilirliğini göstermiştir. Yapılan analizler sonucunda parametrelerin basınç kaybına olan etkileri şu şekilde açıklanabilir:

- Hız: Hızın artışı ile basınç kaybında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Örneğin, hız 0,5 m/s'den 2,5 m/s'ye çıkarıldığında, basınç kaybı 7,35 Pa'dan 152,98 Pa'ya yükselmiştir.

- Boşluk Oranı: Boşluk oranındaki artış basınç kaybını önemli ölçüde azaltmıştır. Örneğin, 0,2 boşluk oranında basınç kaybı yüksekken (188,98 Pa), 0,6 boşluk oranında bu değer (21,38 Pa) kayda değer ölçüde düşmektedir.
- Delik Çapı: Delik çapının artmasıyla basınç kaybında genel olarak bir azalma gözlemlenmiştir. Özellikle delik çapı 0,5 mm'den 2 mm'ye kadar artarken basınç kaybı düşmüş, 2 mm'den sonra bu değişim daha sabit hale gelmiştir.
- Plaka Kalınlığı: Plaka kalınlığının artışı, basınç kaybında belirgin bir artışa yol açmıştır. Örneğin, 0,5 mm kalınlıkta daha düşük basınç kaybı görülürken(152,11 Pa), 4 mm kalınlıkta bu değer (297,5 Pa) önemli ölçüde yükselmiştir.

Regrasyon analizleri gerçekleştirilerek parametrelerin basınç kaybıyla olan ilişkileri bulunmuştur.

Basınç Kaybı=20,5-162,4Boşluk Oranı-4,36Delik Çapı+29,24Plaka Kalınlığı+34,22Hız

Burada:

- Boşluk oranı (-162,4), basınç kaybını azaltıcı bir etki yapmaktadır.
- Delik çapı (-4,36), daha büyük deliklerde basınç kaybının azalmasına neden olmaktadır.
- Plaka kalınlığı (+29,24), kalınlığın artmasıyla birlikte basınç kaybını artırmaktadır.
- Hız (+34,22), hız artışının basınç kaybı üzerinde pozitif ve belirgin bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Regrasyon modelinin doğruluk oranları şu şekilde elde edilmiştir: R^2 = %70,18, ayarlanabilir R^2 = %69,30, tahmin edilebilirlik R^2 = %64,76. Bu değerler, modelin basınç kaybı üzerindeki parametrelerin etkisini kabul edilebilir bir şekilde açıklayabildiğini göstermektedir.

4.2 Gözenekli Fırın Modeli: Sayısal Simülasyonlar ve Regrasyon Analizleri

Gözenekli fırın modeli için yapılan analizlerde, boşluk oranı, delik çapı ve plaka kalınlığı gibi parametrelerin hem basınç kaybı hem de üniformite indeksi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu modelde, basınç kaybının azaltılması ve üniformite indeksinin artırılması hedeflenmiştir.

Yapılan sayısal analizler sonucunda parametrelerin basınç kaybına olan etkileri şu şekilde açıklanabilir:

- Boşluk oranındaki artış, basınç kaybını önemli ölçüde azaltmıştır. Örneğin, 0,2 boşluk oranında basınç kaybı yüksek değerlerde seyrederken (12,83 Pa), 0,6 boşluk oranında bu değer (7,72 Pa) belirgin şekilde azalmaktadır.
- Delik çapının artışı basınç kaybında azalma sağlamış, ancak bu etki delik çapı 2 mm'den büyük olduğunda daha az hissedilir hale gelmiştir.
- Plaka kalınlığının artması, basınç kaybını artırıcı bir etki yapmıştır.(15,12 Pa – 37,26 Pa)

Ayrıca üniformite indeksi üzerinde sonuçlar incelenirse:

- Boşluk oranı arttıkça üniformite indeksi düşüş göstermiştir. Örneğin, 0,2 boşluk oranında indeks değeri yüksekken (0,872), 0,6 boşluk oranında bu değer (0,742) düşmektedir.
- Delik çapının artışıyla, 2 mm'ye kadar indeks düşerken, 2 mm'den sonra tekrar artış gözlemlenmiştir.
- Plaka kalınlığının üniformite indeksi üzerindeki etkisi minimal düzeyde kalmıştır.

Gözenekli fırın modeli için basınç kaybı ve üniformite indeksi için ayrı ayrı regrasyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

- Basınç kaybı regrasyon analizi:
  Basınç Kaybı = 11,01 - 14,77 × Boşluk Oranı – 1,113 × Delik Çapı + 7,373 × Plaka Kalınlığı
  Bu modelin doğruluk oranları R^2 = %88,10, ayarlanabilir R^2 = %86,61, tahmin edilebilirlik R^2 = %82,66 olarak hesaplanmıştır. Bu da bu yaklaşımın çok iyi çalıştığını göstermektedir.

- Üniformite İndeksi Denklem ve Doğruluğu:
  Üniformite İndeks = 0,9327 – 0,2259 × Boşluk Oranı – 0,0121 × Delik Çapı + 0,00159 × Plaka Kalınlığı
  Bu modelin doğruluk oranları R^2 = %83,41, ayarlanabilir R^2 = %81,34, tahmin edilebilir R^2 = %79,18 olarak hesaplanmıştır. İstatiksel olarak modelin iyi bir uyumla kullanılabileceğini göstermektedir.

4.3 Genel Değerlendirme ve Öneriler

- Deneysel doğrulama sonuçları, gözenekli ortam için kullanılan katsayıların doğru olduğunu göstermiş ve HAD modellemenin güvenilirliğini artırmıştır.
- Regrasyon analizleri, tasarım parametrelerinin basınç kaybı ve üniformite indeks üzerindeki etkilerini sayısal olarak açıklamış ve bu parametreler arasındaki ilişkileri ortaya koymuştur.
- Gözenekli fırın modeli için 0,2 boşluk oranı, 4 mm delik çapı ve 1 mm plaka kalınlığı, maksimum üniformite indeks ve minimum basınç kaybı sağlayan optimum tasarım olarak belirlenmiştir.
- Tek gruplu delikli plaka modeli ve gözenekli fırın modelinin daha geniş parametre aralıklarıyla incelenmesi, elde edilen sonuçların genelleştirilebilirliğini artıracaktır.
- Gelecekteki çalışmalarda, farklı malzeme türleri ve plaka geometrilerinin etkileri de değerlendirilerek daha kapsamlı bir modelleme yapılabilir.
- Regrasyon modellerinin daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşması için, verilerin sayısını artırmak ve daha ileri istatistiksel yöntemler (örneğin, doğrusal olmayan regrasyon) kullanmak faydalı olacaktır.
- Basınç kaybı ve üniformite indeksine etki eden diğer parametrelerin de modele dahil edilmesi, sonuçların açıklayıcılığını artırabilir.
- Gözenekli fırın modelinden elde edilen sonuçlar, endüstriyel uygulamalar için önemli bir rehber sunmaktadır. Tasarım parametrelerinin optimize edilerek enerji verimliliği ve akış dengesi sağlanması için bu model kullanılabilir.
- Farklı endüstriyel koşullarda deneyler yapılarak, modelin geniş çaplı uygulamalardaki başarısı değerlendirilebilir.

- Sayısal simülasyonlar ve deneysel çalışmaların entegrasyonu, model doğruluğunu artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, her iki yöntemin birlikte kullanıldığı kapsamlı çalışmalar teşvik edilmelidir.

Bu çalışma, mühendislikte tasarım optimizasyonu ve akış yönetimi konularında önemli bir bilgi birikimi sağlamış ve tasarım parametrelerinin etkilerinin hem deneysel hem de sayısal olarak doğrulanmasını mümkün kılmıştır.

KAYNAKÇA

[1] S. Li, L. Davidson, and S. H. Peng, "A pressure-loss model for flow-through round-hole perforated plates of moderate porosity and thickness in laminar and turbulent flow regimes," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 226, p. 125490, 2024. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125490

[2] Y. Bae and Y. I. Kim, "Numerical modeling of anisotropic drag for a perforated plate with cylindrical holes," Chemical Engineering Science, vol. 149, pp. 78–87, 2016. DOI:10.1016/j.ces.2016.04.036

[3] F. Méry and D. Sebbane, "Aerodynamic characterisation of porous fairings: Pressure drop and laser Doppler velocimetry measurements," Scientific Data, vol. 10, p. 39, 2023. DOI:10.1038/s41597-023-01934-5

[4] S. Malavasi, G. Messa, U. Fratino, and A. Pagano, "On the pressure losses through perforated plates," Flow Measurement and Instrumentation, vol. 28, pp. 57–66, 2012. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2012.07.006

[5] L. J. Weber, M. P. Cherian, M. E. Allen, and M. Muste, "Headloss characteristics for perforated plates and flat bar screens," Technical Report No. 411, Iowa Institute of Hydraulic Engineering, College of Engineering, University of Iowa, Iowa City, IA, 2000.

[6] T. Zhao, J. Zhang, and L. Ma, "A general structural design methodology for multi-hole orifices and its experimental application," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 25, no. 9, pp. 2237–2246, 2011.

[7] K. Śmierciew, D. Butrymowicz, J. Karwacki, and J. Gagan, "Numerical prediction of homogeneity of gas flow through perforated plates," Processes, vol. 9, no. 10, p. 1770, 2021. DOI:10.3390/pr9101770

[8] V. T. Nguyen, S. R. Choi, Y. Jung, S. Im, and B. J. Kim, "Design of perforated plate for uniform flow distribution in heat-exchanger unit of SFR steam generator," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 35, no. 8, pp. 2921–2932, 2021. DOI:10.1007/s12206-021-0719-5

[9] M.-H. Kim, V. T. Nguyen, S. Im, Y. Jung, S.-R. Choi, and B.-J. Kim, "Experimental validation of flow üniformite improvement by a perforated plate in the heat exchanger of SFR steam generator," Energies, vol. 14, no. 18, p. 5846, 2021. DOI:10.3390/en14185846

[10] Y. Peng, H. Mao, Z. Liu, and C. Wei, "Simulation study on geometric parameters influencing the flow coefficient of perforated plate," Buildings, vol. 13, no. 3, p. 804, 2023. DOI:10.3390/buildings13030804

[11] M. H. Jeong, S. K. Kumaresh, M. Y. Kim, and C. Kim, "A numerical study on the flow performance inside the straight pipe with perforated plates," Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 32, no. 7, pp. 3183–3189, 2018. DOI: 10.1007/s12206-018-0621-y

[12] Y. Bayazit, E. M. Sparrow, and D. D. Joseph, "Perforated plates for fluid management: Plate geometry effects and flow regimes," International Journal of Thermal Sciences, vol. 85, pp. 104–111, 2014. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.002

[13] G. Gan and S. B. Riffat, "Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 14, no. 2, pp. 160–165, 1997. DOI:10.1016/S0894-1777(96)00041-6

[14] D. S. Miller, Internal flow systems, 2nd ed., Cranfield, UK: British Hydromechanics Research Association, 1990.

[15] T.-T. Ngo, C.-C. Wang, H.-H. Wu, and V.-T. Than, "Improving temperature üniformite of glass panels in TFT-LCD oven based on perforated plates," Thermal Science and Engineering Progress, vol. 20, p. 100592, 2020. DOI:10.1016/j.tsep.2020.100592

[16] S. Anis, K. T. Romadhoni, D. F. Fitriyana, A. Bahatmaka, H. N. Firmansyah, and N. F. Da Silva Guterres, "The effect of perforated plate geometry on thermofluid characteristics of briquette drying oven: A 3D computational fluid dynamics (CFD) study," CFD Letters, vol. 16, no. 11, pp. 111–132, 2024. DOI:10.37934/cfdl.16.11.111132

[17] S. Shaaban, "On the performance of perforated plate with optimized hole geometry," Flow Measurement and Instrumentation, 2015.DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2015.08.012

[18] P. Tanner, J. Gorman, and E. Sparrow, "Flow–pressure drop characteristics of perforated plates," International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol. 29, no. 11, pp. 4310–4333, 2019. DOI:10.1108/HFF-01-2019-0065

[19] N. Celik, Y. Bayazit, E. Turgut, and E. M. Sparrow, "Design analysis of fluid-flow through perforated plates," Thermal Science, vol. 22, no. 6B, pp. 3091–3098, 2018. DOI:10.2298/TSCI160106019C

[20] Z. J. Marković, M. D. Erić, R. D. Jovanović, and I. M. Lazović, "Numerical simulation of the gas flow through the rectangular channel with perforated plate," Thermal Science, vol. 27, no. 3B, pp. 2241–2253, 2023. DOI:10.2298/TSCI220426089M

[21] S. Khovanskyi, I. Pavlenko, J. Pitel, J. Mizakova, M. Ochowiak, and I. Grechka, "Solving the coupled aerodynamic and thermal problem for modeling the air distribution devices with perforated plates," Energies, vol. 12, no. 18, p. 3488, 2019. DOI: 10.3390/en12183488

[22] B. Y. Guo, Q. F. Hou, A. B. Yu, L. F. Li, and J. Guo, "Numerical modelling of the gas flow through perforated plates," Chemical Engineering Research and Design, vol. 90, no. 12, pp. 2157–2169, 2012. DOI:10.1016/j.cherd.2012.10.004

[23] J. D. Anderson, Computational fluid dynamics: The basics with applications, McGraw-Hill, 1995.

[24] G. K. Batchelor, An introduction to fluid dynamics, Cambridge University Press, 1967.

[25] H. Schlichting and K. Gersten, Boundary-layer theory, 9th ed., Springer, 2016.

[26] J. D. Anderson, Fundamentals of aerodynamics, 5th ed., McGraw-Hill, 2010.

[27] ANSYS Inc., ANSYS 2024 R1 Fluent theory guide, Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2024. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://www.ansys.com

[28] ANSYS Inc., ANSYS 2024 R1 Fluent user guide, Canonsburg, PA: ANSYS Inc., 2024. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://www.ansys.com

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M. F. Büyükyıldız and H. Demir, "Numerical and experimental investigation of pressure drop in perforated plates," in Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering Istanbul 2024 (ICAME 2024), Istanbul, Türkiye, Dec. 24-26, 2024, pp. 417-431. [Çevrimiçi]. Mevcut: https://icame2024conference.com