

Kuru Tip Trafo Kabinlerinde Farklı Havalandırma Menfez Tipleri için Porozite Katsayılarının Belirlenmesi

Determination of Porosity Values for Different Ventilation Grille Types in Dry Type Transformer Cabinets

Caner ADIŞEN¹ , Ramazan ALTAY² , Veli Gökhan DEMİR^{3*} 

Öz

Literatürdeki transformatör havalandırma sistemlerine yönelik Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analiz çalışmalarında, karmaşık geometriye sahip ortamlarda hesaplama kolaylığı sağlayan poroz ortam yaklaşımının sınırlı düzeyde ele alındığı görülmektedir. Bunun yerine, çözümler genellikle oldukça karmaşık ağ yapıları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Mevcut durum hem analiz hesaplamalarında çözüm sürelerinin çok uzun sürmesine hem de yüksek donanım gereksinimlerine yol açmaktadır. Çalışmamızda, farklı kuru tip transformatör menfezlerinin akış analizlerinin poroz ortam modeli ile gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan atalet direnç (C_2) ve viskoz direnç ($1/\alpha$) katsayısı değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, tasarlanan deney düzeneğinde IP21, IP31 ve IPX3 menfez yapılarının akış ölçümleri gerçekleştirilmiş, eşzamanlı olarak menfezlerin sayısal modelleri oluşturulmuş ve deney verileri ile bu modellerin doğrulaması yapılmıştır. Elde edilen deneysel ve sayısal analiz verileri poroz ortamlar için momentum denklemlerinde kullanılmış, bunun sonucunda porozite katsayıları IP21 menfezi için $C_2 = 1753,88$, $1/\alpha = 2,25 \times 10^6$; IP31 menfezi için $C_2 = 2958,94$, $1/\alpha = 1,03 \times 10^7$; IPX3 menfez için ise $C_2 = 12602,45$, $1/\alpha = 9,00 \times 10^5$ olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen porozite katsayılarının, genişletilmiş transformatör akış analizlerinde menfez bölgelerinin sadeleştirilmiş ancak güvenilir şekilde modellenmesine imkan sağlayacağı düşünülmektedir. Böylece, kabinli kuru tip transformatörlerin daha hızlı ve etkin şekilde akış analizlerinin yapılması mümkün hale gelecektir.

Anahtar Kelimeler: Havalandırma, IP koruma sınıfı, Porozite, Transformatör, HAD.

Abstract

Existing Computational Fluid Dynamics studies in the literature concerning transformer ventilation systems often exhibit a limited application of the porous media approach, which offers significant computational efficiency in environments with complex geometries. Instead, solutions are typically achieved using highly complex mesh structures, leading to excessively long computational solution times and demanding hardware requirements. In this study, it is aimed to determine the inertial resistance coefficient (C_2) and viscous resistance coefficient ($1/\alpha$), which are required for performing the flow analyses of different dry-type transformer ventilation grilles using the porous media model. Within this scope, flow measurements of IP21, IP31, and IPX3 ventilation grille structures were conducted using the designed experimental setup. Simultaneously, numerical models of the grilles were developed, and these models were validated using the experimental data. The obtained experimental and numerical analysis data were used in the momentum equations for porous media. As a result, the porous media coefficients were determined as $C_2 = 1753.88$ and $1/\alpha = 2.25 \times 10^6$ for the IP21 grille; $C_2 = 2958.94$ and $1/\alpha = 1.03 \times 10^7$ for the IP31 grille; and $C_2 = 12602.45$ and $1/\alpha = 9.00 \times 10^5$ for the IPX3 grille. The porous media coefficients obtained from this study are expected to enable the simplified yet reliable modeling of ventilation grille regions in extended transformer flow analyses. Thus, it will be possible to perform airflow analyses of enclosed dry-type transformers more rapidly and efficiently.

Keywords: Ventilation, IP protection class, Porosity, Dry-type transformer, CFD.

¹BEST Transformer, AR-GE Müdürlüğü, Balıkesir, Türkiye

²Ra Engineering, ArGe Proje Müdürlüğü, Balıkesir, Türkiye

³Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: veligokhandemir@balikesir.edu.tr

1. Giriş

Kuru tip transformatör uygulamaları, yanmazlık özellikleri, artan güvenlik düzeyleri ve çevre dostu teknolojileri sayesinde güç elektroniği pazarında giderek daha fazla tercih edilmektedir (Wu vd, 2016). Bu transformatörlerin güvenli ve verimli şekilde çalışması için ısı yönetim kritik bir öneme sahiptir. Literatürde kuru tip transformatörler için yapılan ısınma analizleri ve deneysel çalışmalar genellikle kabinsiz modeller üzerine odaklanmış olup, kabin yapısının soğutma performansına etkisi çoğunlukla göz ardı edilmiştir (Altay, 2018). Oysaki, kuru tip transformatörlerde kabin içi hava sıcaklığının ortam sıcaklığına eşit olduğu varsayımı, özellikle doğal soğutmalı sistemlerde gerçekçi olmayan sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, kabin geometrisinin transformatör çekirdeği ve sargılar üzerindeki termal etkisinin incelenmesi ve optimum soğutma performansını sağlayacak kabin tasarımının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Yaman vd., 2019).

Deneysel testlerin maliyetli veya uygulanamaz olduğu durumlarda, Sonlu Hacimler veya Sonlu Elemanlar yöntemlerine dayalı sayısal analiz teknikleri, özellikle de Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) uygulamaları elektrikli ekipmanların termal davranışlarının modellenmesinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Altay vd., 2020). HAD yöntemleri, ısı transferi ve hava akışı gibi karmaşık fiziksel süreçlerin modellenmesine olanak tanımakta, bu sayede geleneksel deneysel yöntemlere kıyasla daha esnek ve maliyet etkin çözümler sunmaktadır. Ancak, özellikle kabinli kuru tip transformatörlerdeki hava giriş-çıkış bölgeleri gibi dar ve karmaşık geometriler, yüksek çözünürlüklü ağ yapıları (mesh) gerektirdiğinden çözüm sürelerini önemli ölçüde uzatmakta ve yüksek hesaplama kaynaklarına duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Dolayısıyla, bu bölgelerin daha sadeleştirilmiş ancak fiziksel olarak anlamlı şekilde modellenmesi ihtiyacı doğmaktadır. Söz konusu ihtiyacı karşılamak üzere poroz ortam (porous media) yaklaşımı, son yıllarda mühendislik uygulamalarında dikkat çeken alternatif bir modelleme yöntemi olarak öne çıkmaktadır (Bejan vd., 2004; Dağdır vd., 2022). Poroz ortam modeli, hava geçişi sağlayan delikli veya perfore yüzeylerin makroskobik etkilerini dikkate alarak, geometrik detaylara girmeden basitleştirilmiş ancak fiziksel doğruluğu yüksek çözümler sunmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle çok sayıda simülasyon yapılması gereken senaryolarda, çözüm süresini ve kaynak ihtiyacını önemli ölçüde azaltmaktadır (Fdhila vd., 2011; Ahn ve Kang, 2026). HAD tabanlı poroz ortam modellemelerin termal sistem tasarımlarında ve optimizasyon çalışmalarında kullanıldığı araştırmalar giderek yaygınlaşmakta, elde edilen sonuçların güvenilirliği deneysel veriler ve literatür verileriyle desteklenmektedir (Çetin vd., 2017; Firouzi vd., 2025; Zhang vd., 2025; Ghose vd., 2026). Ancak, model oluşturulurken viskoz direnç ($1/\alpha$) ve atalet direnç (C_2) katsayıları gibi parametrelerinin doğru belirlenmesi, radyatör, menfez yapıları vb. poroz ortamlarda hava geçiş karakteristiklerinin gerçekçi biçimde temsil edilebilmesi için

büyük önem arz etmektedir (Tai vd. 2022; Adışen vd., 2024; de Castro ve Ribeiro, 2025). Yapılan literatür taramasında, poroz ortam yaklaşımı ile transformatör kabin havalandırması hakkında yapılan HAD çalışmalarının oldukça sınırlı olduğu görülmüştür.

Bu çalışmadaki temel amaç, farklı koruma sınıflarına (IP21, IP31 ve IPX3) sahip transformatör menfez yapılarının poroz ortam modellemesinde gerekli olan atalet ve viskoz direnç katsayısı değerlerini belirlemektir. Bunun için özel bir akış ölçüm test düzeneği tasarlanarak transformatör havalandırma sistemlerinin menfez bölgeleri fiziksel olarak simüle edilmiştir. Ardından bu akış bölgelerine ait sayısal modeller oluşturulmuş ve test verileri ile bu modeller doğrulandıktan sonra menfezlerin basınç kayıpları bulunmuştur. Elde edilen akış giriş hızları ve basınç kayıpları poroz ortamlar için momentum denklemlerinde kullanılarak menfezlere ait atalet ve viskoz direnç katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerin, gelecekteki transformatör simülasyon çalışmalarında hesaplama süresini minimize eden, güvenilir ve sadeleştirilmiş bir modelleme verisi olması beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

Transformatör menfezleri porozite katsayılarının belirlenmesi; Deneysel Ölçümler, HAD Analizleri ve Matematiksel Çıkarım şeklindeki üç aşama sonucunda gerçekleştirilmiştir.

2.1. Deneysel ölçümler

Deneysel ölçümler için transformatör kabin havalandırma menfezlerinin giriş ve çıkışındaki hava akış hızlarının ölçülebildiği bir deney seti tasarlanmıştır. Deney setinin ana bileşenleri: Salzer marka hız ayarlı eksenel emiş fanı, deney seti kontrolünün yapıldığı kontrol panosu, 100 cm uzunluğunda ve 11,5 cm çapındaki akış tüpü, poroz ortamı temsil eden gözenekli ya da bükümlü yapıda imal edilen farklı tipteki kabin havalandırma menfezleri (IP21, IP31 ve IPX3) ve sıcaklık, akış hızı ve hacimsel debi ölçümü yapabilen Testo 425 marka termal anemometreden oluşmaktadır. Termal anemometreye ait teknik özellikler Tablo 1’de sunulmuştur. Menfeze giriş ve menfezden çıkış hız değerleri, akış ekseninde merkezinde okunan üç tekrar ölçümün ortalama değerleri hesaplanarak elde edilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan fan, 12 V DC gerilim ve 0,37 A akım değerlerine sahip, hız ayarlı eksenel emiş tipindedir. Fan aracılığıyla dış ortamdan alınan hava, fanın dönme eksenine paralel olacak şekilde tüp içerisine yönlendirilmektedir. Fan hızı, sinyal genişlik modülasyonu (PWM) çıkışı üzerinden üretilen kare dalga sinyallerinin frekansına bağlı olarak kontrol edilmektedir. Bu kapsamda hız kontrolü, birim zamanda 40–255 darbe aralığında gerçekleştirilmiş olup, 40 darbe değerinde (%16 yük) kararlı akış koşulu sağlanabilmiştir. Fandaki 100, 150, 200 ve 255 darbe

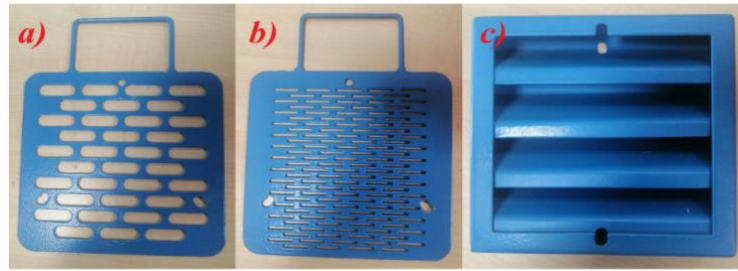
değerleri sırasıyla yaklaşık %40, %60, %80 ve %100 fan yüküne karşılık gelmektedir. Beş farklı fan yükü için menfezlerin öncesi ve sonrasında ortalama akış giriş ve çıkış hızları ölçülmüştür. Ölçümler oda sıcaklığında, dışarıdan sisteme bir hava akışının etki etmediği bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelenen menfezlerin IP koruma sınıflarına ait teknik bilgiler Tablo 2’de, bu menfezlere ait görseller ise Şekil 1’de verilmiştir. Tasarlanan deney seti IP23 koruma sınıflı menfez yapısı için konfigüre edilmiş ve kullanılan bileşenler ile birlikte Şekil 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Sıcaklık, akış hızı ve hacimsel debinin ölçüldüğü Testo 425 termal anemometrenin teknik özellikleri.

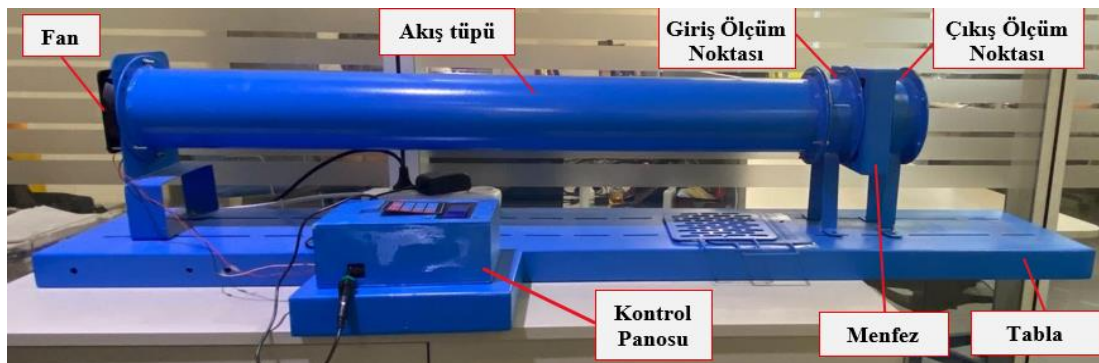
Sıcaklık	
Ölçüm Aralığı	-20...+70 °C
Doğruluk	±0,5 °C
Çözünürlük	0,1 °C
Hız	
Ölçüm Aralığı	0,01...30 m/s
Doğruluk	±(0,03m/s +4,0 % ölç.değ) (0,01...+20 m/s)
Çözünürlük	±(0,5m/s +5,0 % ölç.değ) (20,01...+30 m/s)
Çözünürlük	0,01 m/s

Tablo 2. Çalışmada test edilen kabin menfezlerinin IP koruma sınıfları ve yapısal özellikleri.

IP Koruma Sınıfı	Gözenek (Delik) Çapı Ölçüsü	IP Koruma Sınıfı Açıklaması
IP21	30 mm x 10 mm	12,5mm’den büyük çapa sahip cisimler giremez
IP31	20 mm x 2,5 mm	2,5mm’den büyük çapa sahip cisimler giremez
Koruma Sacı Eğim Açısı		
IPX3	124°	60° açığa kadar püskürtülen su zarar vermez



Şekil 1. a) IP21, b) IP31, c) IPX3 koruma sınıflarına ait havalandırma menfezleri.

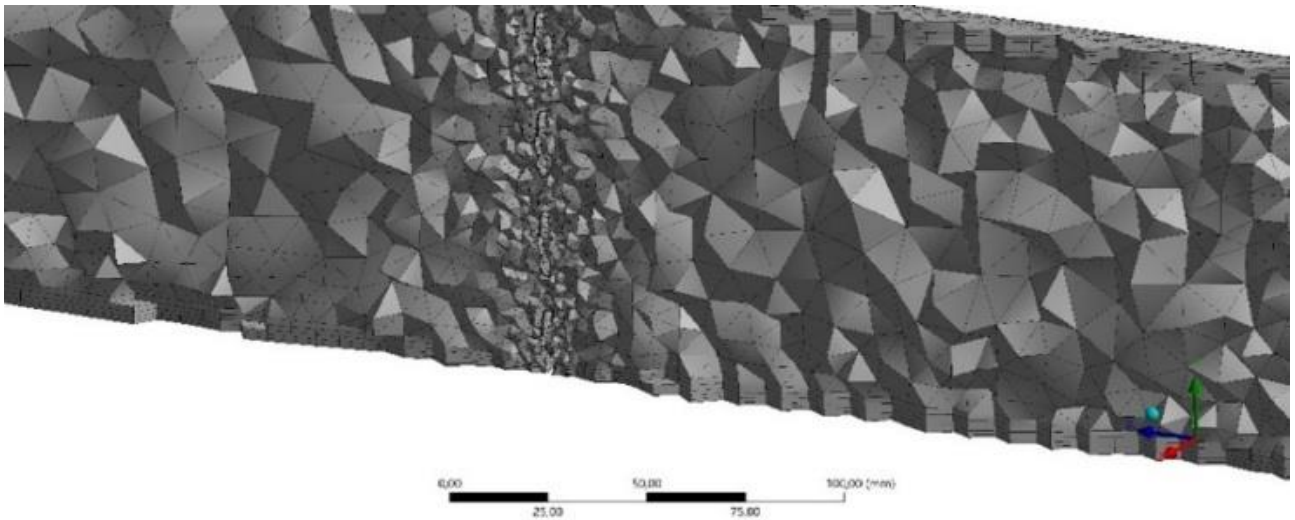


Şekil 2. IP23 menfez yapısı için konfigüre edilmiş deney seti.

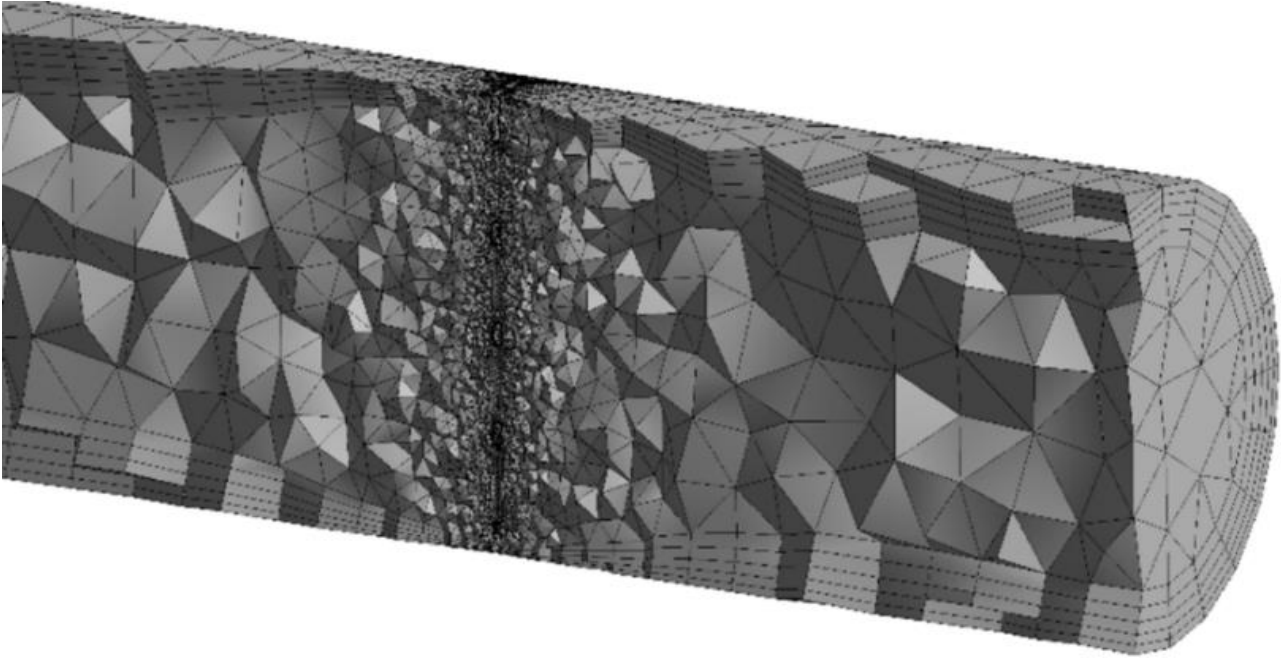
2.2. HAD Analizleri

Çalışmanın bu kısmında, farklı IP sınıflarındaki menfezlerin basınç kayıp değerlerinin hesaplanması ve bu kayıpların hava giriş hızına bağlı değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Sayısal analizler Ansys Fluent (2024 R2) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD modeli oluşturulurken, deneysel ölçüm noktalarıyla tam uyum sağlamak amacıyla ilgili geometrik bölgelere düzlemler tanımlanmış ve hız değerleri bu düzlemlerin orta noktalarından elde edilmiştir. Bu yaklaşım, deneysel ve sayısal verilerin doğrudan aynı referans noktası üzerinden karşılaştırılmasına olanak tanımıştır.

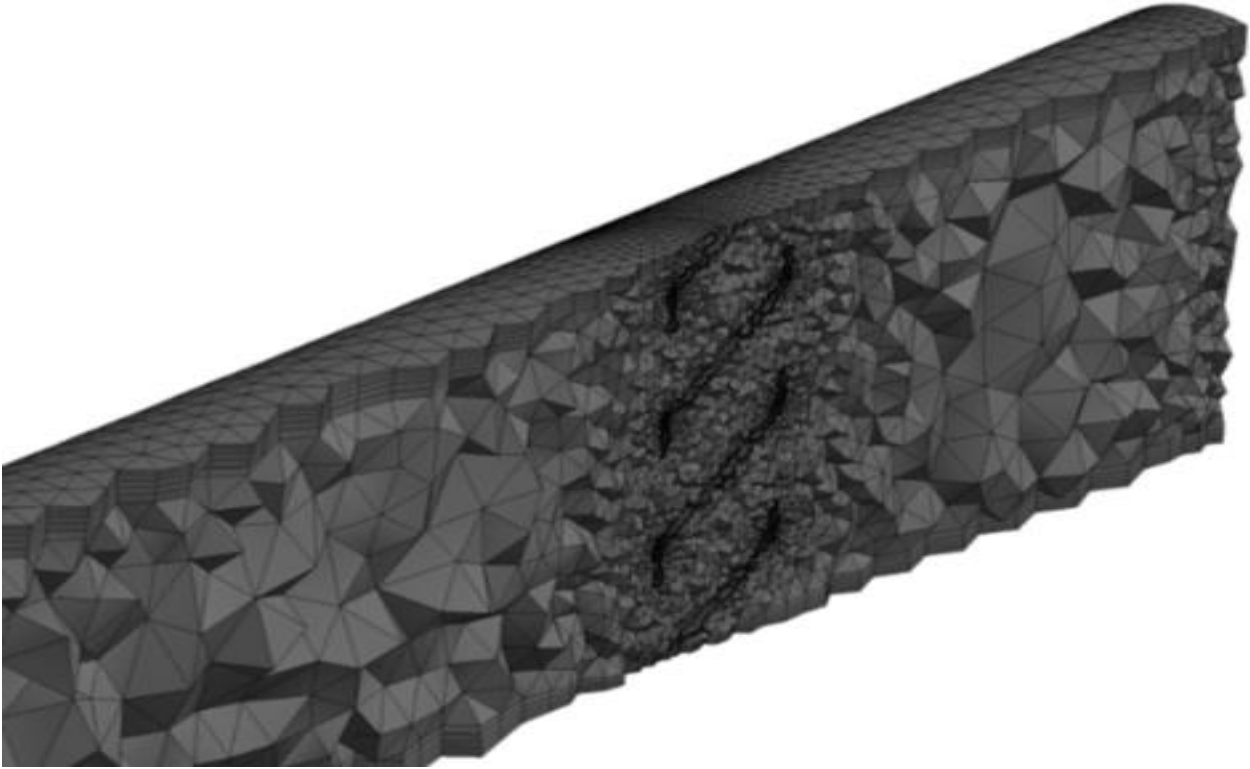
HAD çalışmalarında çözüm ağının oluşturulması, çözümün doğruluğu ve hesaplama maliyeti açısından kritiktir. Literatürde yapılandırılmış, yapılandırılmamış ve hibrit olmak üzere üç temel ağ yapısı kullanılmaktadır. Bu çalışmada, incelenen menfez geometrilerinin çok küçük gözenekli ve karmaşık yapısı nedeniyle, fiziksel alandan hesaplama alanına karmaşık dönüşümler gerektirmeyen (Doğan vd., 2022) yapılandırılmamış ağ yaklaşımı tercih edilmiştir. Oluşturulan modelde, menfez giriş-çıkış yüzeyleri ve akış tüpü cidar bölgesi gibi akışın kesintiye uğradığı ya da yönlendirildiği kısımlarda ağ eleman yoğunluğu diğer bölgelere göre yüksek tutulmuştur. Tüp cidarına yakın bölgelerde uygulanan kaymama sınır koşulunun doğru şekilde modellenebilmesi amacıyla bu alanlarda şişirilmiş katmanlar kullanılarak ağ eleman yapısı küçültülmüştür. Ağ yapıları ağırlıklı olarak dört yüzeyle tetrahedral elemanlardan oluşturulmuştur. Bu elemanlar, dört adet düzgün üçgen yüzeyle sınırlandırılmaktadır. Farklı koruma sınıfları için oluşturulan ağ yapılarına ait görsel detaylar Şekil 3, 4 ve 5'te; modelde kullanılan eleman sayısı, düğüm noktası sayısı ve ortalama çarpıklık değerleri ise Tablo 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. IP21 menfez kesit ağ detayı.



Şekil 4. IP31 menfez kesit ağ detayı.



Şekil 5. IPX3 menfez kesit ağ detayı.

Tablo 3. Sayısal analizlerde kullanılan farklı koruma sınıfındaki menfezlerin ağ yapısı özellikleri.

Menfez Yapıları	IP21	IP31	IPX3
Ağ Eleman Sayısı	484114	1300899	991864
Düğüm Noktası Sayısı	128705	239210	320793
Ortalama Çarpıklık Değeri	0,21171	0,22922	0,24639

Gerçekleştirilen analizlerde, türbülanslı olduğu belirlenen akış için SST k- ω türbülans modeli tercih edilmiştir. Bu model, k- ω ve k- ε modellerinin avantajlarını birleştiren esnek yapısı nedeniyle seçilmiştir (Aksu, 2023). Sayısal modelde akış hızı, akış tüpü hidrolik çapı ve türbülans yoğunluğu değerleri giriş havası sınır koşullar olarak; gösterge basınç değeri, boru iç çapı ve türbülans yoğunluğu değerleri ise çıkış sınır şartları olarak belirlenmiştir. Modelin çıkış bölgesinde etkin basınç değeri 0 Pa olarak atanmıştır. HAD çözücüsü, giriş ve çıkış kesitleri arasındaki basınç farkını iteratif yöntemlerle çözümleyerek yakınsama sağlamaktadır. Çıkış basıncı referans (sıfır) kabul edildiğinden, giriş kesitinde hesaplanan alan ağırlıklı ortalama basınç değeri, doğrudan sistemde oluşan toplam basınç kaybı (ΔP) olarak değerlendirilmiştir.

Seçilen ağ yapısının sonuçlar üzerindeki hassasiyetini değerlendirmek ve en uygun dengeyi sağlamak amacıyla tüm menfez yapıları için ağ bağımsızlık çalışmaları yürütülmüştür. Bu kapsamda, çözümler %100 fan yükünde ($V_{\text{giriş}}=2,1$ m/s), dört farklı eleman sayısı ile tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda, ağ eleman sayısına bağlı anlamlı bir değişimin meydana gelmediği görülmüştür. Örneğin, IP21 menfez modelinde 484 114 eleman içeren yapı ile 738 290 eleman içeren yapı arasındaki basınç değişimi farkı yalnızca %0,02 olarak bulunmuştur. Bu nedenle, çözümün yakınsama hızı ve hesaplama maliyetinin optimize edilmesi amacıyla IP21 menfez modelinde 484 114 elemanlı ağ yapısı tercih edilmiştir. IP21 menfezi için ağ bağımsızlık kontrolü analiz sonuçlarına ait değerler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. IP21 menfezi için ağ bağımsızlık kontrolü verileri.

Eleman Sayısı	$V_{\text{çıkış}}$ (m/s)	V_{max} (m/s)	Basınç Düşümü (Pa)
361000	2,066	5,065	9,736
484114*	1,950	5,080	9,650
604231	2,034	4,956	9,322
738290	1,979	5,081	9,624

Belirlenen nihai ağ yapısı ve model parametreleri kullanılarak, tüm menfez yapıları için %16, %40, %60, %80 ve %100 fan yükü koşullarında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda, farklı giriş hızlarına karşılık gelen basınç düşüşü değerleri elde edilmiştir.

2.3. Matematiksel Çıkarım

HAD analizlerinde poroz ortam yaklaşımıyla sayısal model oluşturmak için viskoz ($1/\alpha$) ve atalet direnç (C_2) katsayılarının bilinmesi gerekmektedir. Bu değerlerin hesaplanmasında kullanılan ve homojen poroz ortamlar için Darcy–Forchheimer modeli olarak da ifade edilen denklem Eşitlik 1'de verilmiştir (ANSYS, 2009).

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v|v_i\right) \quad (1)$$

Burada;

S_i , momentum denklemleri için kaynak terimini; v_i , hız değerlerini; ρ ise yoğunluğunu ifade etmektedir. Yüksek akış hızlarında C_2 , poroz ortamdaki atalet kayıpları için bir düzeltme sağlamaktadır. Delikli bir plaka içinde basınç düşümünü veren denklem Eşitlik 2’de verilmiştir. Burada Δn , porozlu ortamın veya delikli sacın kalınlığıdır.

$$\Delta P = -S_i \Delta n \quad (2)$$

Porozite katsayılarının hesaplanabilmesi için hız ve basınç düşümü değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerler, fan yüklerine karşılık gelen ve deneysel olarak ölçülen giriş hızları ve bu hızlara bağlı olarak Ansys Fluent ile hesaplanan basınç düşüş değerleridir. Hız ve basınç düşüşü değerleri elde edildikten sonra, iki değer arasındaki ilintiyi gösteren grafik çizdirilir. Grafiğin trend eğrisi 2. dereceden bir polinomdur. Bu polinom ve S_i ’ den türetilen Eşitlik 1’in özdeş terimleri eşleştirilerek istenen porozite katsayıları hesaplanır (ANSYS, 2009).

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deneysel Ölçüm ve HAD Analiz Değerleri

Deney düzeneğinde, ilgili menfez yapılarına ait hava giriş ve çıkış hızları, farklı fan yükleri altında ölçülmüştür. Ölçülen giriş hızları HAD programına girdi verisi olarak tanımlanmış ve gerçekleştirilen analizler ile menfez sonrası çıkış hızları hesaplanmıştır. Analiz çalışmalarında oluşturulan HAD modellerinin doğrulaması, en fazla hata payının meydana geldiği %100 fan yükünde, menfez çıkışındaki deneysel akış hız verileri ile aynı düzlemdeki analiz ortalama hız değerlerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Her menfez tipi için elde edilen hız değişimi, basınç dağılımı ve düşüşü değerleri alt başlıklar altında ayrı ayrı paylaşılmıştır.

IP21 Menfezi

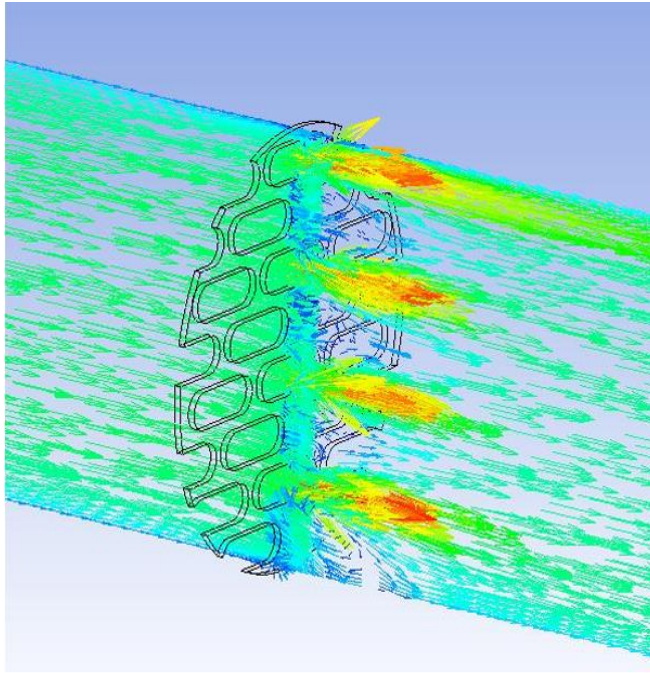
IP21 koruma sınıfına ait menfezin giriş-çıkışındaki deneysel hız ölçümleri ve HAD analizi ile elde edilen fan yüküne bağlı menfez çıkışı hız ve basınç düşüşü değerleri Tablo 5’te verilmiştir. Tam fan yükünde menfez çıkışındaki deneysel ölçüm hızı 1,823 m/s, analiz ortalama çıkış hızı 1,95 m/s ve bu değerlere bağlı hesaplanan hata payı %6,9 olarak bulunmuştur. Literatürde, HAD analizleri için kabul edilebilir hata payının genellikle %10 sınır değeri içerisinde olması gerektiği belirtilmektedir

(Şimşek, 2020; Şibil, 2024). Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, değişken fan yükleri altında hesaplanan en yüksek hata değerinin dahi bu sınır değerin altında kaldığı görülmektedir.

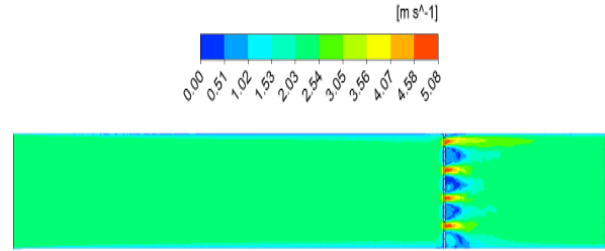
Tablo 5. IP21 menfezi çıkışı hava hızının deneysel ölçüm/HAD analiz değerleri ve basınç düşüşü.

Fan Yüklü (%)	Deneysel Ölçüm Giriş-Çıkış Hızları (m/s)	HAD Çıkış Hızı (m/s)	Basınç Düşüşü, ΔP (Pa)
16	0,137 – 0,107	0,127	0,056
20	0,230 – 0,167	0,215	0,137
40	1,057 – 0,850	0,984	2,505
80	1,390 – 1,124	1,306	4,238
100	2,100 – 1,823	1,950	9,650

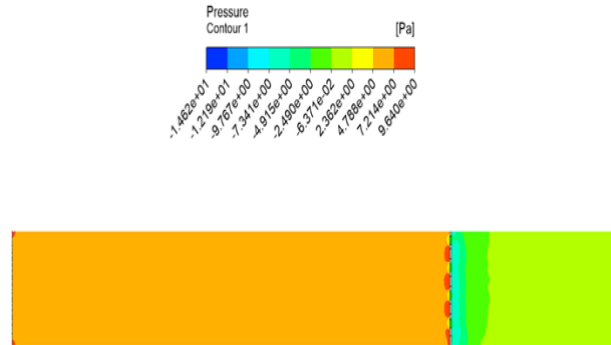
Şekil 6 ve 7’de sunulan hız vektörleri ile Şekil 8’deki basınç dağılımı incelendiğinde, beklenildiği üzere zorlanmış hava akışının menfez çıkışındaki daralan kanal etkisiyle hız kazandığı anlaşılmaktadır. Akış yönüne dik konumlanan menfez çeperlerinde ise akışın kesintiye uğramasıyla basınç en yüksek değerine ulaşmaktadır.



Şekil 6. IP21 menfezi hız vektörleri görünümü.



Şekil 7. IP21 menfezi hız dağılımı görüntüsü.



Şekil 8. IP21 basınç dağılımı görüntüsü.

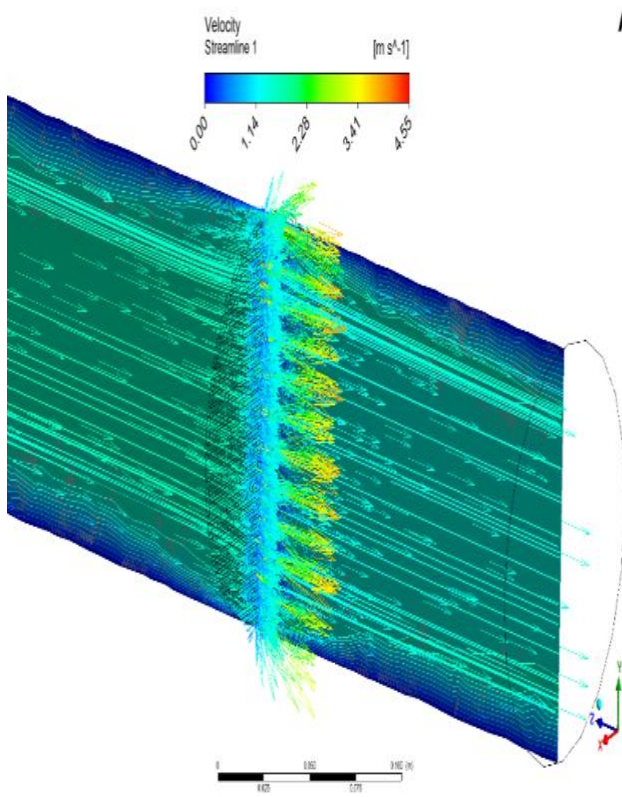
IP31 Menfezi

IP31 menfezinin fan yüküne bağlı menfez giriş-çıkışı akış hızları ve menfez sonrası basınç düşüş değerleri Tablo 6’da verilmiştir. Buna göre, tam yükte ölçülen deneysel çıkış hız değeri 1,253 m/s, HAD analizi ortalama çıkış hız değeri 1,368 m/s ve hesaplanan hata payı, kabul edilebilir bir değer olan %9,2’dir. IP31 menfezinin çıkışındaki hız vektörleri Şekil 9’da, hız dağılımı görüntüsü Şekil 10’da, tüp içerisindeki basınç dağılımı görüntüsü ise Şekil 11’de gösterilmiştir. IP31 menfezinde fan yüküne bağlı olarak gözlenen hız ve basınç karakteristikleri, IP21 modeliyle olan geometrik

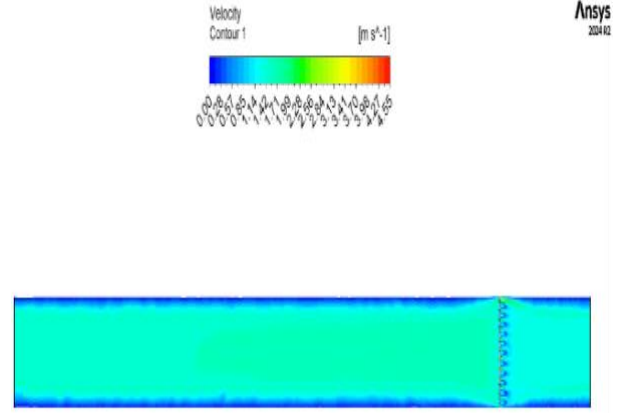
benzerliği nedeniyle paralel bir eğilim sergilemiştir. Bunun yanında, IP31'in IP21'e kıyasla daha küçük gözeneklere sahip yapısı, hava akışının IP21'e göre daha çok dirence maruz kalmasına neden olmuş, böylelikle çıkış hızları genel olarak IP21'e göre düşük çıkmıştır.

Tablo 6. IP31 menfezi çıkışı hava hızının deneysel ölçüm/HAD analiz değerleri ve basınç düşüşü.

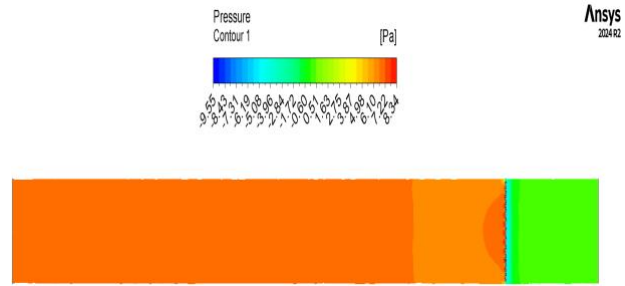
Fan Yüğü (%)	Deneysel Ölçüm Giriş-Çıkış Hızları (m/s)	HAD Çıkış Hızı (m/s)	Basınç Düşüşü, ΔP (Pa)
16	0,123 – 0,117	0,118	0,10
20	0,347 – 0,280	0,320	0,56
40	0,967 – 0,847	0,892	3,75
80	1,100 – 0,947	1,015	4,79
100	1,467 – 1,253	1,368	8,34



Şekil 9. IP31 çıkışı hız vektörlerinin görünümü.



Şekil 10. IP31 hız dağılımı görüntüsü.



Şekil 11. IP31 basınç dağılımı görüntüsü

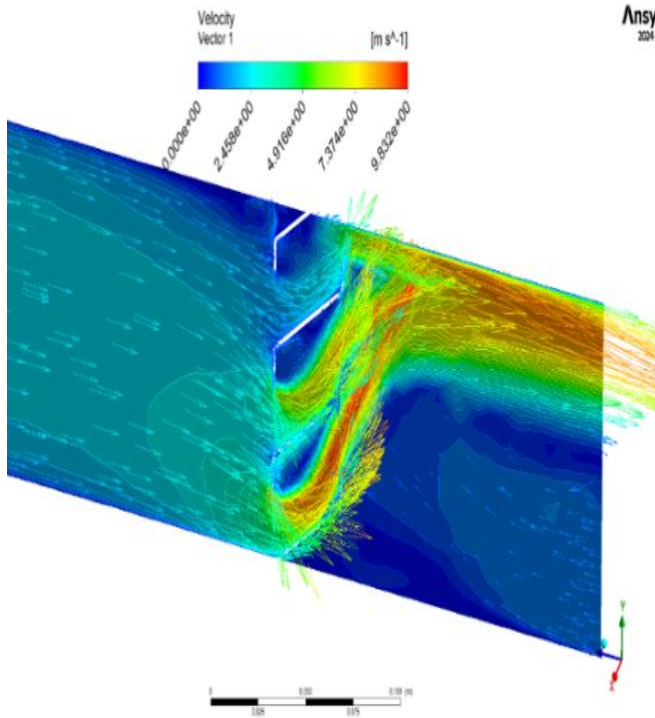
IPX3 Menfezi

Fan yükü değişimine bağlı olarak IPX3 menfezinde meydana gelen hız ve basınç düşüşü verileri Tablo 7'de özetlenmiştir. Modelin doğrulanması aşamasında, %100 yükteki deneysel hız (1,42 m/s) ve HAD sonucu (1,458 m/s) arasındaki sapmanın %2,7 gibi oldukça düşük bir seviyede kalması, IPX3 modelinin en yüksek tahmin doğruluğuna sahip olduğunu göstermiştir. İlgili akış detayı Şekil 12'de hız vektörleri, Şekil 13'te hız dağılımı ve Şekil 14'te basınç dağılımı görüntüleri ile verilmiştir. Elde edilen verilerden IPX3 menfezinin karakteristik açıdan gözenekli bir ortam davranışı sergilemediği anlaşılmaktadır. Diğer menfez yapılarında veya filtreleme birimlerinde çıkış direnci

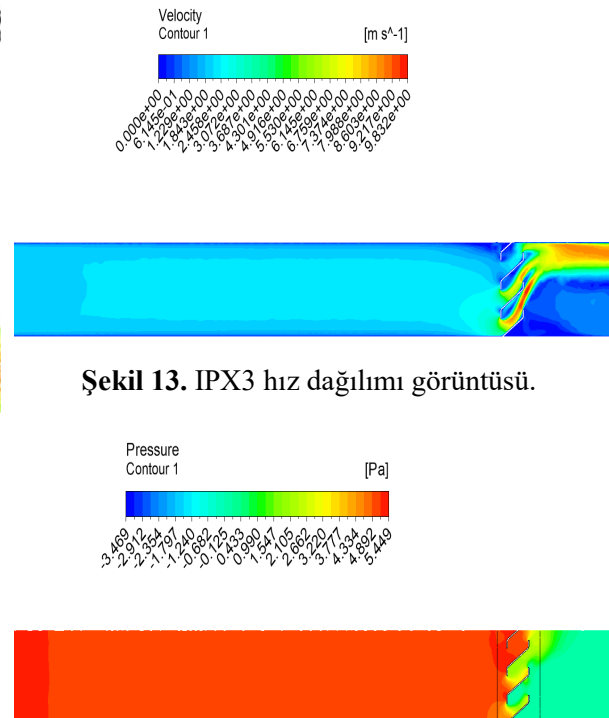
kaynaklı belirgin bir hız düşümü gözlemlenirken, IPX3 modelinde kanat yapısı havayı akış tüpünün üst bölgesine doğru kanallandırmış ve akış hızında artışa neden olmuştur. Literatürle uyumlu olarak, kanatçık geometrisi nedeniyle oluşan kesit daralmasının ve akışın yönlendirilmesinin, yerel hız artışlarını tetiklediği söylenebilir (Dinler, 2021).

Tablo 7. IPX3 menfezi çıkışı hava hızının deneysel ölçüm/HAD analiz değerleri ve basınç düşüşü.

Fan Yüklü (%)	Deneysel Ölçüm Giriş-Çıkış Hızları (m/s)	HAD Çıkış Hızı (m/s)	Basınç Düşüşü, ΔP (Pa)
16	0,070 – 0,210	0,230	0,08
20	0,273 – 0,440	0,470	1,16
40	0,423 – 0,823	0,905	2,775
80	0,477 – 1,020	1,080	3,527
100	0,593 – 1,420	1,458	5,449



Şekil 12. IPX3 çıkışı hız vektörlerinin görünümü.

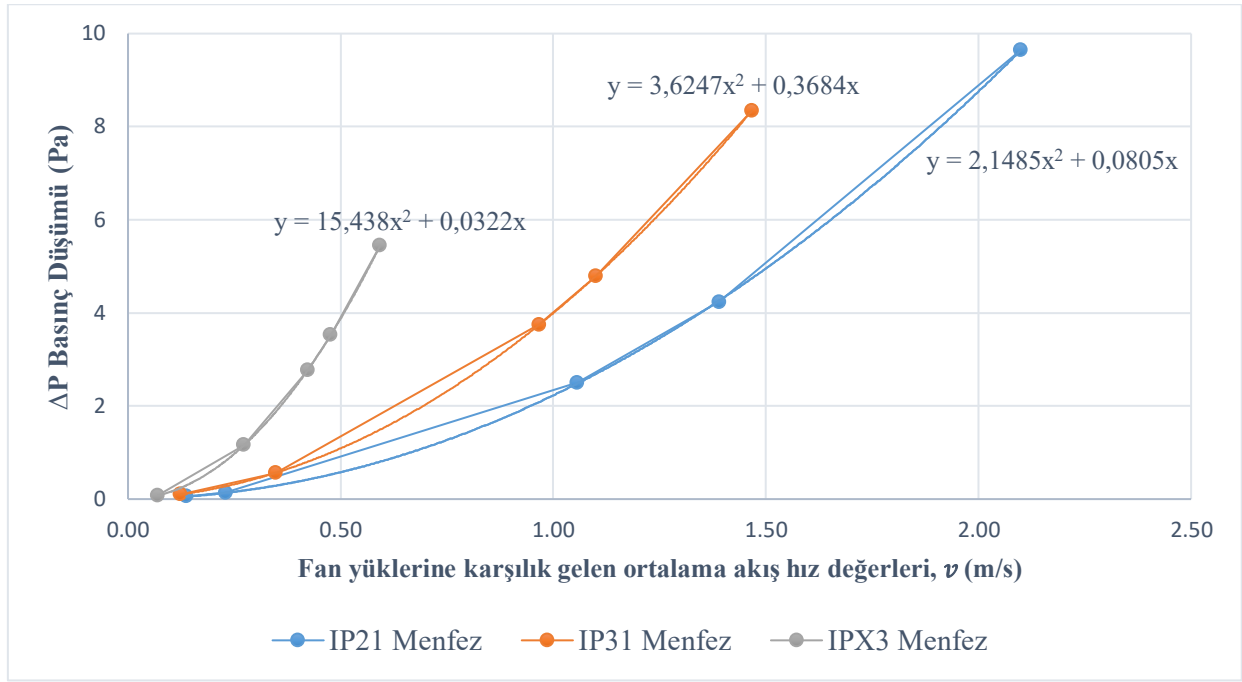


Şekil 13. IPX3 hız dağılımı görüntüsü.

Şekil 14. IPX3 basınç dağılımı görüntüsü.

3.2. Porozite Katsayılarının Hesaplanması

Tablo 5, 6 ve 7’de yer alan veriler doğrultusunda, tüm menfez tipleri için ortalama giriş hızı ile basınç düşüşü arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler Şekil 15’teki gibi oluşturulmuştur. Bu grafik eğrilerinden de basınç kaybı ile akış hızı arasındaki matematiksel korelasyonu tanımlayan karakteristik denklemler türetilmiştir (Çetin vd., 2017).



Şekil 15. Menfezlerin ortalama girişi hızı-basınç düşüşü eğrileri.

Darcy–Forchheimer modeli özdeşliği ile, menfezlerin hız-basınç eğrilerinden elde edilen polinom denklemlerindeki ikinci dereceden terimin (hızın karesi) ve birinci dereceden terimin (hız) katsayıları kullanılarak sırasıyla menfezlerin atalet ve viskoz direnç katsayıları belirlenmiştir (Bkz. Tablo 8). Hesaplamalarda $\Delta n=2\text{mm}$, $\rho=1,225\text{ kg/m}^3$, $\mu=1,7894\times 10^{-5}$ değerleri kabul edilmiştir. Yapılan tüm bu işlemler sonucunda bulunan farklı koruyucu sınıftaki menfez yapılarına ait atalet ve viskoz direnç değerleri (porozite katsayıları) Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 8. Farklı koruyucu sınıfındaki menfez yapıları için türetilen matematiksel eşitlikler.

Menfez Yapısı	Basınç Düşüşü ve Hız Arasındaki İlişkiyi Veren 2. Derece Polinom	2. Dereceli Terimin Katsayısına Özdeş Eşitlikler	1. Dereceli Terimin Katsayısına Özdeş Eşitlikler
IP21	$\Delta P=2,1485 v^2 + 0,0805 v$	$2,1485=C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n$	$0,0805=\frac{\mu}{\alpha} \Delta n$
IP31	$\Delta P=3,6247 v^2 + 0,3684 v$	$3,6247=C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n$	$0,3684=\frac{\mu}{\alpha} \Delta n$
IPX3	$\Delta P=15,438 v^2 + 0,0322 v$	$15,438=C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n$	$0,0322=\frac{\mu}{\alpha} \Delta n$

Tablo 9. Menfez yapılarına ait hesaplanan porozite katsayısı değerleri.

Menfez Yapısı	Atalet Direnç Katsayısı, C_2	Viskoz Direnç Katsayısı, $1/\alpha$
IP21	1753,88	$2,25\times 10^6$
IP31	2958,94	$1,03\times 10^7$
IPX3	12602,45	$9,00\times 10^5$

Viskoz direnci akışa karşı sürtünme ve hız etkisinde gösterilen bir iç direnç olarak tanımlanabilir. Menfez yapıları içerisinde en az temas alanına (en büyük açıklık alanı) sahip menfez yapısı IP21 olduğu için en düşük viskoz direnç katsayısı da bu menfeze ait bulunmuştur. Benzer şekilde IP31'in IP21'e kıyasla daha küçük gözeneklere sahip yapısı, akışın katı yüzeylerle temasta bulunduğu alan miktarının artmasına neden olmuş, buna paralel olarak fazlalaşan sürtünme viskoz direnç değerini yükseltmiştir (Firouzi vd. 2025). Kanal açıklığı en yüksek olan IPX3'te ise bu değer en düşük çıkmıştır.

Atalet direnci, kanal içi akışlarda daralma-genişleme ya da kıvrım-kavis gibi yapısal değişimler (Nield ve Bejan, 2017) veya gözenekli yahut dar kanallarda akış nedeniyle (Merkin vd., 2024) artan bir değerdir. Dolayısıyla, menfez yapıları içerisinde daha az gözenekli yapıya ve kıvrımsız geometriye sahip IP21 menfezi beklenildiği üzere en küçük atalet direnç değerine sahiptir. Benzer şekilde gözenek yapısı küçülen IP31'de bu değer artmış, en kıvrımlı/kavisli yapıya sahip IPX3'te ise en yüksek değerine ulaşmıştır.

Viskoz direnç değerinin en büyük olduğu IP31 menfez yapısında, düşük ve orta kademeli hızlarda diğer menfezlere kıyasla daha yüksek basınç kaybı gözlemlenmektedir. Benzer şekilde en küçük viskoz direnç değerine sahip olan IPX3 için basınç kaybının genel olarak düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Bu verilere uyumlu olarak kanal içi akışlarda basınç düşüşünün özellikle düşük hızlarda viskoz dirençle orantılı olduğu belirtilmektedir (White ve Klein, 2011). Bunun yanında kanal içi akışlarda yüksek hızlara çıkıldıkça artan Reynolds sayısı ile viskoz kuvvetlerin etkisi azalmakta, atalet etkileri belirgin olmaya başlamaktadır (Lahiri ve Volokh, 2024). Dolayısıyla, tam yükte en yüksek çıkış hızın elde edildiği IP21 menfezinde türbülans kaynaklı karışma, girdap oluşumu ve hız profili bozulmaları gibi kaotik etkenlerin daha etkin olduğu böylece basınç kaybının daha da arttığı söylenebilir.

4. Sonuç

Çalışmamızda, transformatör havalandırma sistemlerine uygun menfez yapısının seçimine yönelik gerçekleştirilecek HAD analizlerinde çözüm süresini ve hesaplama maliyetini azaltmaya yönelik bir yaklaşım ele alınmıştır. Bu kapsamda, poroz ortam modellemelerinde kullanılabilecek IP21, IP31 ve IPX3 menfez yapılarına ait porozite katsayıları deneysel ve sayısal analizler aracılığıyla belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Viskoz direnç ($1/\alpha$) ve Atalet direnç (C_2) porozite katsayıları IP21 menfezi için $C_2 = 1753,88$, $1/\alpha = 2,25 \times 10^6$; IP31 menfezi için $C_2 = 2958,94$, $1/\alpha = 1,03 \times 10^7$; IPX3 menfezi için ise $C_2 = 12602,45$, $1/\alpha = 9,00 \times 10^5$ olarak hesaplanmıştır.

- En düşük koruma derecesine ve geniş açıklık oranına sahip olan IP21 menfezinin hem viskoz hem de atalet direnç katsayıları açısından en düşük değerleri sergilediği, buna karşın en dar gözenek yapısına sahip IP31 menfezinin ise en yüksek viskoz direnç katsayısına ulaştığı tespit edilmiştir.
- Kavisli yapısı nedeniyle atalet direncin en yüksek olduğu menfez IPX3 olarak bulunmuştur.
- Simülasyon doğrulama işlemlerinde sağlanan düşük hata payı ve porozite katsayılarının menfez geometrilerine göre uyumlu olmaları, hesaplanan bu değerlerin HAD modellerinde güvenilir girdi verileri olarak kullanılabileceğini göstermiştir.
- Elde edilen porozite katsayıları ile ileride gerçekleştirilecek genişletilmiş kuru tip transformatör akış analizlerinde menfez bölgelerindeki ağ eleman sayısının azaltılarak çözüm süresinin ve maliyetinin önemli ölçüde düşürüleceği öngörülmektedir.
- Bu çalışmanın genişletilerek, karmaşık akış geometrilerine sahip yağlı tip dağıtım transformatörlerinin sayısal modellemelerinde de kullanılması mümkün görülmektedir.

Teşekkür

Çalışmada maddi ve teknik desteği bulunan ve fiziki imkan sağlayan BEST Transformer ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

Bu çalışma, BAÜN FBE’de tamamlanan “Farklı IP Sınıflarına ait Kuru Tip Trafo Kabinlerinde Porozite Değerlerinin Hesaplanması ve Akış Analizleri” başlıklı yüksek lisans tezi kapsamında ve ICAME24 kongresinde sunulan özet bildirinin genişletilmiş hali olarak hazırlanmıştır.

Yazarların Katkısı

Caner ADIŞEN : Literatür Taraması, Fiziksel Deneyler, Sayısal Modelleme, Analiz ve Yorum.

Ramazan ALTAY : Literatür Taraması , Sayısal Modelleme ve Analiz.

Veli Gökhan DEMİR: Danışmanlık, Analiz ve Yorum.

Çıkar Çatışması Beyan

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Adışen, C., Hazar, İ., Gökhan Demir, V., Altay, R. (2024, June 26). Numerical analysis of porosity values for different IP classes and verification with experimental studies. *The 3rd International Conference on Applied Mathematics in Engineering (ICAME'24)*. https://icame.balikesir.edu.tr/documents/ICAME24_AbstractsBook.pdf#page=215
- Ahn, J., Kang, J. (2026). Enhancing urban CFD simulations with porous media parameters for representative street trees. *Ecological Modelling*, 512, 111388. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111388>
- Aksu, E. (2023). Farklı Ağ Elemanı Boyutlarının ve Türbülans Modellerinin Düz Levha Sürtünme Direnci Üzerindeki Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*, 0(223), 29–46. <https://doi.org/10.54926/gdt.1248594>
- Altay, R. (2018). *Kabinli kuru tip transformatörlerde soğuma sürecinin CFD analizi ve deneysel çalışmalar ile incelenmesi* [Yüksek Lisans]. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Altay, R., Santisteban, A., Olmo, C., Renedo, C. J., Fernandez, A. O., Ortiz, F., Delgado, F. (2020). Use of Alternative Fluids in Very High-Power Transformers: Experimental and Numerical Thermal Studies. *IEEE Access*, 8, 207054–207062. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037672>
- ANSYS. (2009, January 29). *Porous Media Conditions*. ANSYS, Inc. <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node233.htm>
- Bayındırlı, C., Çelik, M., Demiralp, M. (2018). Bir otobüs modeli etrafındaki akış yapısının CFD yöntemi ile incelenmesi ve sürüklenme kuvvetinin pasif akış kontrol yöntemi ile iyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(4), 785–790. <https://doi.org/10.2339/politeknik.403993>
- Bejan, A., Dincer, I., Lorente, S., Miguel, A. F., Reis, A. H. (2004). *Porous and Complex Flow Structures in Modern Technologies*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4221-3>
- Çetin, B., Güler, K. G., Aksel, M. H. (2017). Computational Modeling of Vehicle Radiators Using Porous Medium Approach. In *Heat Exchangers - Design, Experiment and Simulation*. InTech. <https://doi.org/10.5772/66281>
- Dağıdır, K., Sarper, B., Erdiñç, M. T. (2022). Sıralı Tip Boru Demetinde Gözenekli Malzeme Gözenek Yoğunluğu ve Kalınlığının Isı Transferi ve Basınç Düşümüne Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(71), 447–461. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247111>
- de Castro, T.P., Ribeiro, G.B. (2025). Numerical investigation of automotive porous-media radiators through the second-law analysis. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 47, 88. <https://doi.org/10.1007/s40430-025-05405-3>
- Dinler, N. (2021). Boru içerisine yerleştirilen gözenekli bir kanatçıgın akışkan akışı ve sıcaklığına etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 715–722. <https://doi.org/10.2339/politeknik.836660>
- Doğan, Y., Uysal, M. (2022). Bir dizel jeneratörde artan motor yükünün egzoz geri basıncı üzerindeki etkisinin sayısal ve deneysel incelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(72), 983–994. <https://doi.org/10.21205/deufmd.202247226>
- Fdhila, R. B., Kranenborg, J., Laneryd, T., Olsson, C. O., Samuelsson, B., Gustafsson, A., Lundin, L. (2011). Thermal modeling of power transformer radiators using a porous medium based CFD approach. *Second International Conference on Computational Methods for Thermal Problems*, Dalian, China.
- Firouzi, N., Djuansjah, J., Podulka, P. (2025). Flow and Heat Transfer in Porous Media Under Non-Standard Asymmetric Boundary Conditions. *Symmetry*, 17(12), 2183. <https://doi.org/10.3390/sym17122183>
- Ghose, P., Sahu, K. B., Mishra, V. K., Ranjan, R., Samal, C. (2026). A novel CFD approach to determine the size of an automotive radiator through data extrapolation method. *AIP Conf. Proc.*, Vol. 3385 (1). <https://doi.org/10.1063/5.0316257>
- Lahiri, S. K., Volokh, K. (2024). Transition from laminar to turbulent pipe flow as a process of growing material instabilities. *Results in Engineering*, 23, 102535. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102535>
- Marykovskiy, Y., Pomaranzi, G., Schito, P., Zasso, A. (2024). A method to evaluate Forchheimer resistance coefficients for permeable screens and air louvers modelled as a porous medium. *Fluids*, 9(7), 147. <https://doi.org/10.3390/fluids9070147>
- Merkin, J. H., Roşca, N. C., Roşca, A. V., Pop, I. (2024). MHD Mixed Convection Flow Over a Permeable Vertical Flat Plate Embedded in a Darcy–Forchheimer Porous Medium. *Transport in Porous Media*, 151(13), 2511–2528. <https://doi.org/10.1007/s11242-024-02124-6>

- Mufuta, J. M., Van den Bulck, E. (2001). Modelling of the mass flow distribution around an array of rectangular blocks in-line arranged and simulating the cross-section of a winding disc-type transformer. *Applied thermal engineering*, 21(7), 731-749. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00045-4)
- Nield, D. A., Bejan, A. (2017). *Convection in Porous Media*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49562-0>
- Şibil, R. (2024). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile açık kanal akımında bitki örtüsünün akım özelliklerine etkisinin analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 29(1), 155–172. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1309112>
- Swaminathan, M. R., Mahalakshmi, N. V. (2010). Numerical modelling of flow through perforated plates applied to electrostatic precipitator. *Journal of Applied Sciences*, 10(20), 2426-2432. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2426.2432>
- Şimşek, O. (2020). Üstten akışlı kapak akımının sayısal modellemesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 808–819. <https://doi.org/10.21923/jesd.752914>
- Tai, V. C., Kai-Seun, J. W., Mathew, P. R., Moey, L. K., Cheng, X., Baglee, D. (2022). Investigation of varying louver angles and positions on cross ventilation in a generic isolated building using CFD simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 229, 105172. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105172>
- White, F. M. ., Klein, S. A. . (2011). *Fluid mechanics* (7th ed.). McGraw Hill.
- Wu, W., Wang, Y., Wang, Z. (2016, August 16). CFD Simulation on Heat Exchanger Cooled Dry-type Transformers. *2nd International Conference on Electrical Engineering and Electronics (EEE'16)*. <https://doi.org/10.11159/eee16.143>
- Yaman, G., Altay, R., Yaman, R. (2019). Validation of computational fluid dynamic analysis of natural convection conditions for a resin dry-type transformer with a cabin. *Thermal Science*, 23(Suppl. 1), 23–32. <https://doi.org/10.2298/TSCI180919327Y>
- Zhang, J., Zhang, Z., Liu, Y., Sun, M., Liu, K., Yan, G. (2025). Numerical simulation study of porous media heat exchangers based on the porous media substitution model. *In Journal of Physics*, 3041(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3041/1/012020>