



Çelik Bilyelerden Oluşturulmuş Spiral Paket Yataklarda Akış Rejimleri

Mustafa Yasin Gökaslan^{1*}, Mustafa Özdemir², Lütfullah Kuddusi³

^{1*} Van Yüzcüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-3859-8485), my.gokaslan@yyu.edu.tr

² İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0002-2255-8705), ozdemirmu4@itu.edu.tr

³ İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0003-1318-1851), kuddusi@itu.edu.tr

(1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences ICAENS 2021, November 1-3, 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.986165)

ATIF/REFERENCE: Gökaslan, M.Y., Özdemir, M., & Kuddusi, L. (2021). Çelik Bilyelerden Oluşturulmuş Spiral Paket Yataklarda Akış Rejimleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 75-83.

Öz

Paket yataklarda ve eğrisel kanallarda basınç düşüşü ile ısı geçişi üzerine uzun yıllardır çalışmalar yapılmaktadır. Kanala kavış verildiğinde veya kanal içerisine gözenekli ortam yerleştirildiğinde basınç düşüşü arttığı bilinmektedir. Kanalin hem eğrisel hem de gözenekli olma durumunda basınç düşüşünün nasıl etkilendiği yeni araştırma konularından biridir. Bu çalışmada, Arşimet spiral eğrilerinden oluşan spiral paket yataklarda basınç düşüşü deneysel olarak incelenmiştir. 2.00, 2.38 ve 3.17 mm çapında bilyelerden oluşturulan paket yatakların gözeneklilik değerleri sırasıyla %41.4, %41.4 ve %42.0 olup özgül yüzey alanları düşük bilye çapından yükseğe olacak şekilde 1759, 1475 ve 1095 m⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Akışkan olarak hava kullanılmış ve deneyler sürekli rejimde yapılmıştır. Her bir bilye çapına göre akış rejimleri belirlenmiş ve literatüre en yakın değerlerle kıyaslanarak spirallığın etkisi yorumlanmıştır. Her bir akış rejiminde geçirgenlik, Forchheimer katsayısı ve Ergün sabitlerine karşılık gelen katsayılar belirlenmiştir. Ayrıca bütün deney verileri için de bu değerler hesaplanmıştır. Geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ile sürtünme faktörü arasındaki ilişki verilmiştir. Literatürle karşılaştırıldığında, bu çalışmanın sonuçlarının, düz paket yataklardaki basınç düşüşü hakkındaki mevcut verilerin farklılığına katkıda bulunduğu görülmektedir. Ayrıca, akış rejimlerini belirlemek, ısı geçişi ve basınç düşüşünün daha iyi yorumlanmasına ve anlaşılmasına yardımcı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Hava akışı, Geçirgenlik, Akış rejimleri, Spiral paket yatak, Sürtünme faktörü.

Flow Regimes in Spiral Channel Packed with Steel Balls

Abstract

Studies have been carried out for many years on pressure drop and heat transfer in packed beds and curved channels. It is known that the pressure drop increases when the channel is curved or porous media is placed inside the channel. How the pressure drop is affected when the channel is both curved and porous is one of the new research topics. In this study, pressure drop in spiral packed beds is investigated experimentally. The porosity values of the packed beds formed from balls with 2.00, 2.38 and 3.17 mm diameters are 41.4%, 41.4% and 42.0%, respectively, and their specific surface areas are calculated as 1759, 1475 and 1095 m⁻¹ with a higher than low ball diameter. Experiments are carried out air flow at steady-state. Flow regimes are determined according to each ball diameter and the effect of spirality is interpreted by comparing with the literature. In each flow regime and all experimental data, permeability, Forchheimer coefficient and the coefficients corresponding to Ergün constants are determined. Compared to the literature, the results of this study appear to contribute to the variation of the available data on pressure drop in packed beds. In addition, determining flow regimes can help in better interpreting and understanding of heat transfer and pressure drop.

Keywords: Airflow, Permeability, Flow regime, Spiral packed bed, Friction factor.

* Sorumlu Yazar: my.gokaslan@yyu.edu.tr

1. Giriş

Gözenekli ortamdaki akış, jeotermal sistemler, petrol çıkarma, ısı değiştiricileri, ısıtma, iklimlendirme, soğutma tesisatlarında, elektronik cihazlarda, atık ısının geri kazanımında, filtreler ve kimyasal reaktörler gibi mühendislik uygulamalarında meydana gelir. Gözenekli ortamlar, birim hacim başına yüksek yüzey alanı sayesinde ısı geçişini iyileştirmektedir. Ayrıca gözenekli ortam, yapısına bağlı olarak akışı dağıtır ve karıştırır, böylece yüzeyden ısı geçişini arttırmaktadır. Fakat gözenekli ortamlarda basınç düşüşüde önemli ölçüde yüksektir. Yakın zamanda gözenekli ortam olarak metal köpüklerde kullanılmaya başlanmıştır.

Kanal içerisine bilyeleri yerleştirerek gözenekli ortam oluşturmak mümkündür. Bu konuda en temel çalışmalardan biri yapan Ergün ve Orning, farklı büyüklükteki kürelerden oluşan gözenekli ortamda farklı akışkanlar kullanarak basınç düşüşünü deneysel olarak araştırmışlardır [1]. Daha sonra, Ergün [2] deneysel verilerini genişleterek paket yataklarda en sık kullanılan denklem ve katsayıları belirlemiştir. Bu denklem, gözeneklilik ve partikül çapına bağlı olarak paket yataklardaki basınç düşüşünü göstermektedir. Daha sonra farklı yazarlar tarafından paket yatak içerisindeki partikül çapı ve malzemesi değiştirilerek, silindirik, halkasal ve kabaca küresel malzemeler yerleştirilerek basınç düşüşü çalışmalarına devam edilmiştir. Akışkanın paket yatak içerisinde salınımlı ya da darbeli hareketinin de basınç düşüşü üzerine etkilerini incelemeye başlanmıştır. Gökaslan vd. yaptıkları çalışmada paket yatağın spiral olma durumunda basınç düşüşüne etkisini incelemişlerdir. Ergün sabitlerinin spiral paket yataklar için kullanımının uygun olmadığı ifade etmişler ve bu katsayıları spiral paket yatak için deneysel verilerden hesaplamışlardır. Ayrıca boyutsuz bir sayı tanımlayarak kavis oranının basınç düşüşüne etkisini de belirlemişlerdir [3]. Norouzi vd. [4], hava ve argonun ekstenel-yatay akışı üzerinde, farklı tane boyutlarına sahip 5 farklı paketlenmiş granüler aktif karbon (GAC) yatağı üzerinden deneysel bir araştırma yapmışlardır. Sürtünme faktörünü, Reynolds sayısına bağlı olarak sunmuşlardır.

Gözenekli ortamdaki akış rejimlerini basınç düşüşünü verilerinden belirlemek mümkündür. Akış rejiminin ısı geçişi ve basınç düşüşü üzerine etkisi mevcuttur. Bağcı vd. 1 ve 3 mm çaplı paketlenmiş çelik bilyelerden oluşturulan gözenekli ortamda basınç düşüşünü deneysel olarak incelemişlerdir. Akışkan olarak su kullandıkları deneylerde Darcy öncesi rejimi de dahil olmak üzere türbülanslı bölgeye kadar akış rejimlerinin aralıklarını belirlemişlerdir. Ergun denkleminin katsayılarında ve Kozeny-Carman sabitinde sapmaların mevcut olduğunu ifade etmişler ve her bir rejim için bu sabitleri hesaplamışlardır. Yine her bir rejim için farklı geçirgenlik ve Forchheimer katsayısının olduğunu saptamışlardır [5]. Bağcı vd. [6] yaptıkları diğer bir çalışmada ise sadece 3 mm çapında çelik bilyelerden oluşturdukları gözenekli ortamda basınç düşüşünü deneysel olarak incelemişlerdir. İndirgenmiş basınç düşüşü değerlerini hesaplamışlar ve bu değerlerden akış rejimlerini belirlemişlerdir. Deneylerini geniş bir Reynolds sayısı aralığında yaparak Darcy öncesi, Darcy, Forchheimer ve Türbülans akış rejimlerini belirlemişlerdir. Her bir akış rejimi için geçirgenlik ve Forchheimer katsayılarını belirlemişlerdir. Kececioğlu ve Jiang [7] rastgele paketlenmiş küresel boncuklardan oluşan bir yataktan su akışı sırasında akış rejimlerini belirlemek için deneysel çalışmışlar ve geçirgenliğe

göre hesaplanmış Reynolds sayısına bağlı olarak akış bölgelerini belirlemişlerdir. Seguin vd. kararsız rejimlerin başlangıcının doğru bir şekilde belirlenmesini sağlayan sinyal dalgalanmasının spektral analiziyle birlikte sınırlı akım yoğunluğunun yerel anlık ölçümlerini sunmuşlardır. Çalışmalarındaki gözenekli ortam, iki tür paketlenmiş küre yatağından, akış yönlerine farklı yönelimli plakalardan ve kafesli ortamdaki oluşuyordu. Paket yatakların yapısının hidrodinamik üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir [8].

Gökaslan vd. [9] içerisinde 3.17 mm çapında bilyelerden oluşturdukları spiral paket yatağa basınç düşüşünü deneysel olarak incelemişler. Çok dar bir hız aralığında yaptıkları deneylerde akış rejimini Forchheimer olarak belirlemişlerdir. Bu çalışma da deney verileri genişletilmiş mevcut bilyede hızı daha geniş aralıklarda ve farklı bilye çapları (2.00 ve 2.38 mm) da kullanılarak basınç düşüşü ve akış rejimleri incelenmiştir. İndirgenmiş basınç düşüşü ile geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı arasındaki ilişkisinden rejim aralıkları belirlenmiştir. Her bir rejim için geçirgenlik, Forchheimer katsayısı ve Ergün sabitlerine karşılık gelen katsayılar belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar sanayi de çok kullanılan spiral levhali ısı değiştiricilerinin içerisinde gözenekli ortam olma durumunda basınç düşüşünün nasıl etkileneceğini anlamak konusunda ışık tutacak ve en uygun spiral paket yataklı ısı değiştiricisi tasarımı sağlamada faydalı olacaktır. Ayrıca, akış rejimlerini ve sınırlarını anlamak, gözenekli ortam akışlarının modellenmesine doğrudan yardımcı olabilir ve ısı geçişi ile basınç düşüşünün yorumlanıp daha iyi anlaşılmasına sağlayabilir.

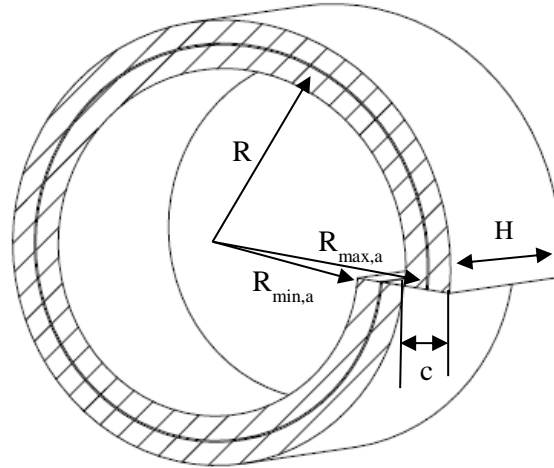
2. Deneysel Teslatı

Şekil 1'de spiral kanala (akışkan kanalına) ait şematik çizim gösterilmiştir. Akışkan olarak havanın geçtiği spiral kanal iç içe geçmiş başlangıç yarıçapları farklı 2 adet Arşimet spiral eğrisinden oluşmaktadır. Sabit hatve olduğu durumlarda, Arşimet spiral eğrisinin yarıçapı açıyla (φ) lineer değişmektedir. Akışkan kanalını içten ve dıştan saran spiral yalıtım kanalı mevcuttur. Spiral kanalın hatvesi akışkan kanalının genişliği (a), yalıtım kanalının genişliği (b) ve bakır rulo plakanın et kalınlıklarının (t) toplamına ($c = a + b + 2t$) eşittir. Ortalama spiral kanalın uzunluğunu veren ifade aşağıda gösterildiği gibi

$$L_{s,a}(\varphi) = \int_0^{2\pi} R(\varphi) d\varphi = 2\pi(R_{min,a} + \frac{c}{2}) \quad (1)$$

hesaplamak mümkündür. Burada, $R(\varphi)$ spiralin herhangi bir açıdaki yarıçapı, $R_{min,a}$ spiralin en düşük ortalama yarıçapını, c spiralin hatvesini ifade etmektedir. Akışkan kanalının giriş ve çıkışına kolektörler tasarlanarak akışkanın kanal içerisine dağıtılması ve toplanması sağlanmış ve deney odası oluşturulmuştur. Deney odasında tasarlanan akışkan kanalı 1 (2π) turdan, yalıtım kanalı ise 2 (4π) turdan oluşmaktadır.

Akışkan kanalın yarıçapı başlangıçtan itibaren açıya bağlı değişmektedir. Spiral kanalın ortalama eğrilik yarıçapı belirlenmek istenirse, spiral kanalın başlangıç ve bitişindeki ortalama yarıçaplarının aritmetik ortalamasına eşittir [3]. Akışkan kanal genişliği (a) 10 mm ve yüksekliği (H) 240 mm'dir. Spiral kanalın ortalama uzunluğu ($L_{s,a}$) 750 mm'dir. Deney odasına ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Spiral kanal geometrisi

Deney odasının yan yüzeyleri 0.2 mm kalınlığında çok ince bakır rulo levhadan üretilirken alt ve üst kapakları ise 1 mm kalınlığında bakır levhadan üretilmiştir.

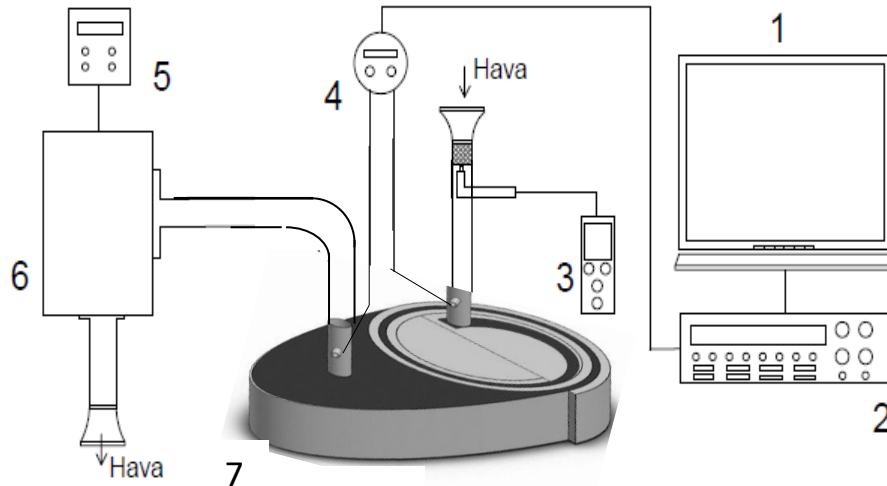
Tablo 1. Deney odasının geometrik bilgileri

Spiralin ortalama başlangıç yarıçapı ($R_{min,a}$) [mm]	105
Spiralin ortalama bitiş yarıçapı ($R_{max,a}$) [mm]	135
Ortalama eğrilik yarıçapı (R_a) [mm]	120
Akışkan kanal genişliği (a) [mm]	10
Yalıtım kanal genişliği (b) [mm]	18
Bakır plaka kalınlığı (s) [mm]	0.2
Spiral hatvesi (c) [mm]	28.4
Ortalama spiral kanalın uzunluğu ($L_{s,a}$) [mm]	750
Spiral kanalın yüksekliği (H) [mm]	240
Spiral kanal hidrolik çapı (d_h) [mm]	19.2

Bakır rulo levhaya spiral şekli verildikten sonra alt ve üst kapakları yerleştirilmiştir. Alt ve üst kapakları epoksi yapıştırıcılarla bakır rulo levhaya yapıştırılmış ve deney odası oluşturulmuştur. Daha sonra hem alt kapağa hem de üst kapağa hava sızdırmazlığını sağlamak üzere yüksek sıcaklığa dayanıklı

silikon uygulanmıştır. Giriş ve çıkış kolektörlerine pleksiglas borular bağlanarak deney düzeneği oluşturulmuştur. Giriş pleksiglas borusuna akış düzleştirme bölümü, çıkış pleksiglas borusuna da hava emiş ünitesi bağlanmıştır.

Şekil 2’de deney düzeneğinin şematik çizimi görülmektedir. Emiş fanı (blower) ile emilen hava deney odasına 40 mm çapında pleksiglas borudan geçerek giriş yapmaktadır. Pleksiglas borunun hemen girişinde 5 cm uzunluğunda altıgen akış düzleştirici bulunmaktadır. Akış düzleştiricisinden hemen sonra havanın ortalama hızı (u_m) Testo 425 sıcak-küre sayesinde ölçülmüştür. Hava hızları belirli bir süre kaydedilmiş ve bu kaydedilen verilerin ortalaması alınarak ortalama hava hızı hesaplanmıştır. Çok düşük hızlarda hızölçerin belirsizliğinden kaynaklı yüzdesel hata arttığı için ECA G-4 model doğalgaz sayacı kullanılmıştır. Doğalgaz sayacına IN-Z61 tipi sinyal verici bağlanarak, doğalgaz sayacından elde edilen verilerin Keithley (2700) tarafından bilgisayara (1) aktarılması sağlanmıştır. Bu sinyal verici, test odasından her 10 litre hava geçtiğinde bilgisayara bir sinyal gönderir. Hava debisi, iki sinyal arasında geçen süre belirlenerek hesaplanmıştır.



Şekil 2. Deney düzeneği: 1. Bilgisayar, 2. Veri toplama cihazı, 3. Hızölçer, 4. Fark basınçölçer, 5. Frekans kontrol cihazı, 6. Emiş fanı, 7. Deney odası.

Pleksiglas borudan geçen hava deney odasının giriş kolektörüne gelmektedir. Eğrisel kanallı giriş kolektöründen ilerleyen hava siyah boyalı yolu izleyerek spiral kanalda bir tur (2π) döndükten sonra çıkış kolektörüne gelmektedir. Buradan hava çıkış pleksiglas borusundan geçerek emiş fanı sayesinde ortama atılmaktadır. Spiral kanalın başladığı (giriş) ve son bulunduğu (çıkış) kesitlere paslanmaz çelik tel örgü konulmuştur. Bu sayede, kanal içerisine yerleştirilen çelik bilyelerin kanalda kalması sağlanmaktadır. Giriş ve çıkış pleksiglas borusunda basınç prizleri bulunmaktadır. Bu basınç prizleri sayesinde spiral kanalın giriş ve çıkışından fark basıncı (ΔP) DPT7000-R8 model fark basınçölçer ile ölçülmüştür. Fark basınçölçerlerden elde edilen veriler Keithley 2700 veri toplama cihazı (2) sayesinde bilgisayara (1) aktarılmaktadır. Hava emiş fanı motorunun frekansı, Siemens marka sürücü ile değiştirilerek farklı hava debileri sağlanmaktadır. Deneyler sürekli rejimde yapılmıştır.

Gözenekli ortam, spiral kanala $d=2.00$, $d=2.38$ ve $d=3.17$ mm çapında çelik bilyeler rastgele yerleştirilerek oluşturulmuştur. Bilyeler bölgesel geniş boşluklar kalmayacak şekilde spiral kanala doldurulmuştur. Gözeneklilik değeri bilye çapının küçükten büyüğe doğru %41.4, %41.4 ve %42.0 ölçülmüştür. 2.00, 2.38 ve 3.17 mm çapında bilyeler için özgül yüzey alanları sırasıyla 1759, 1475 ve 1095 m^{-1} hesaplanmıştır.

Belirsizlik Analizi

Deney verilerindeki belirsizlik, doğrudan ölçülen ve hesaplama ile elde edilen değerlerdeki hata tanımlanarak belirlenir. Bilye çapı, hız, basınç düşüşü birincil ölçümlerdeki ana hata kaynakları olarak değerlendirilir. Birincil hata kaynakları kullanarak hesaplanan parametrelerdeki belirsizlik analizi ise Figliola ve Beasley tarafından tarif edilen metoda göre Eşitlik (2)'de belirlenmiştir [10].

$$\frac{\delta_{\Delta P/Lu}}{\Delta P/Lu} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{\delta_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta_u}{u}\right)^2} \quad (2)$$

Burada Testo 425 hızölçer cihazının belirsizliği (0,03+%5xölçülen değer) ve kullanılan DPT7000-R8 model fark basınçölçerinin belirsizliği ise basınç değeri 125 Pa üzerinde

ölçülen değerlerin %1.5'i ve sabit ± 1 Pa olarak verilmiştir. Gözenekli ortamı oluşturmak için kullanılan bilyelerin çapı dijital mikrometre ile ölçülmüştür. 2.00, 2.38 ve 3.17 mm çapında bilyelerin çapının ölçülmesindeki belirsizlik sırasıyla 0.22, 0.14 ve 0.08% olarak hesaplanmıştır. Her üç çapta ölçülen basınç düşüşü değerlerinden hesaplanan belirsizlikler 1.51 ile 4.2% olarak hesaplanmıştır. Ölçülen hız değerlerindeki belirsizlik ise 6.3 ile 13.9% arasında değişmektedir. Hesaplanan parametrelerden indirgenmiş basınç düşüşündeki ($\Delta P/Lu$) belirsizlik ise 4.5 ile 6.8% arasında değişmektedir.

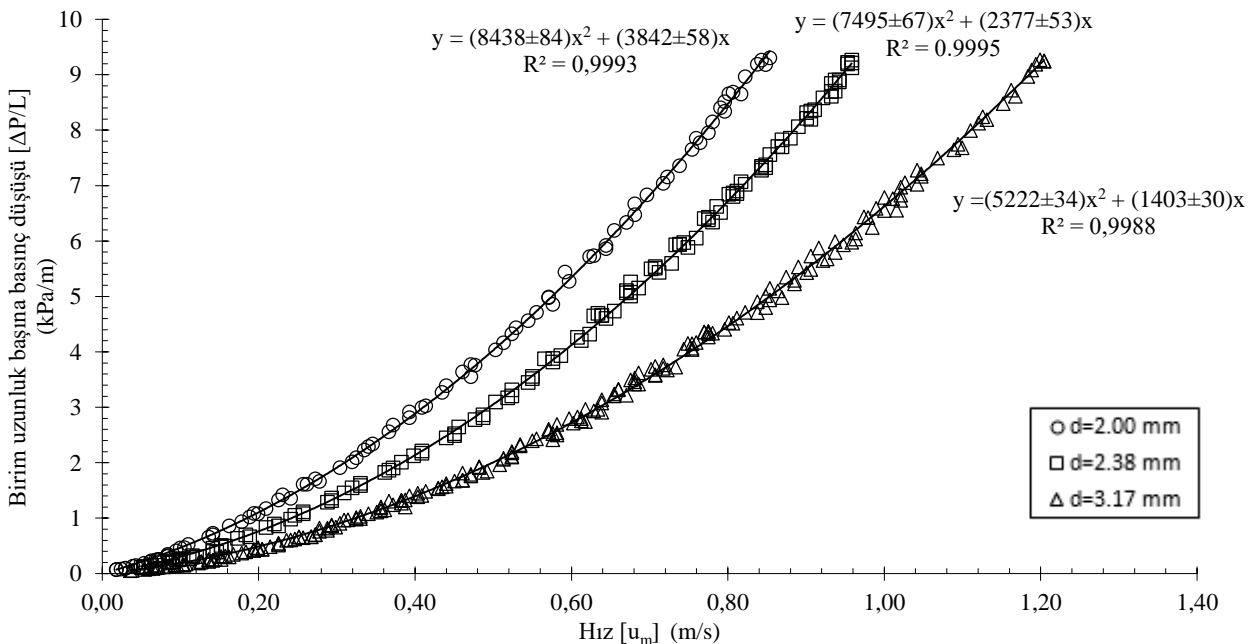
3. Deney Sonuçları

Ergün farklı çaplarda küreler, kum ve ufalanmış kok kömüründen (pulverized coke) oluşan paket yataklardan Reynolds sayısı 100'e kadar deneysel olarak farklı gaz akışını incelemiştir [1,2]. Deneylerinde gaz akışı olarak hava, karbondioksit, nitrojen, hidrojen ve su kullanmıştır. Burke-Plumber ve Morcom'un önceki deneysel çalışmalarını ekleyerek Reynolds sayısı 1800'e kadar geçerli bir basınç düşüşü korelasyonu Eşitlik (3) önermiştir [2].

$$\frac{\Delta P}{L} = A_E \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu u_m}{\varepsilon^3 d^2} + B_E \frac{(1 - \varepsilon) \rho u_m^2}{\varepsilon^3 d} \quad (3)$$

Burada, ε gözeneklilik, d bilye çapı, u_m ortalama hızı, ρ havanın yoğunluğunu, μ havanın viskozitesini ve $A_E - B_E$ ise Ergün sabitlerini ifade etmektedir. A_E ve B_E katsayıları deneysel verilerden elde edilmektedir. Ergün bu katsayıları $A_E=150$ ve $B_E=1.75$ olarak belirlemiştir. A_E ve B_E katsayılarının evrensel olduğu düşünülüyordu; ancak sonraki deneyler bunun doğru olmadığını kanıtladı. Avontuur ve Geldart [11], $A_E=141$ ve $B_E=1.52$ kullanmayı önerdiler. Özahi vd. bu katsayıları $A_E=160$ ve $B_E = 1.61$ olarak sunmuşlardır [12]. Hatta McDonald vd. Eşitlik (4)'te sunulan basınç düşüşü ilişkisinde ε^3 'ün yerine $\varepsilon^{3.6}$ kullanılmasının daha uygun olduğu ve $A_E=180$ ve $B_E=1.8$ kullanılmasını tavsiye etmiştir [13].

Düz paket yataklar için Ergün [2] ve spiral paket yataklar için ise Gökaslan vd. [3,9] birim uzunluk başına düşen basınç düşüşünün hızla ikinci dereceden polinomla ilişkili olduğunu göstermişlerdir



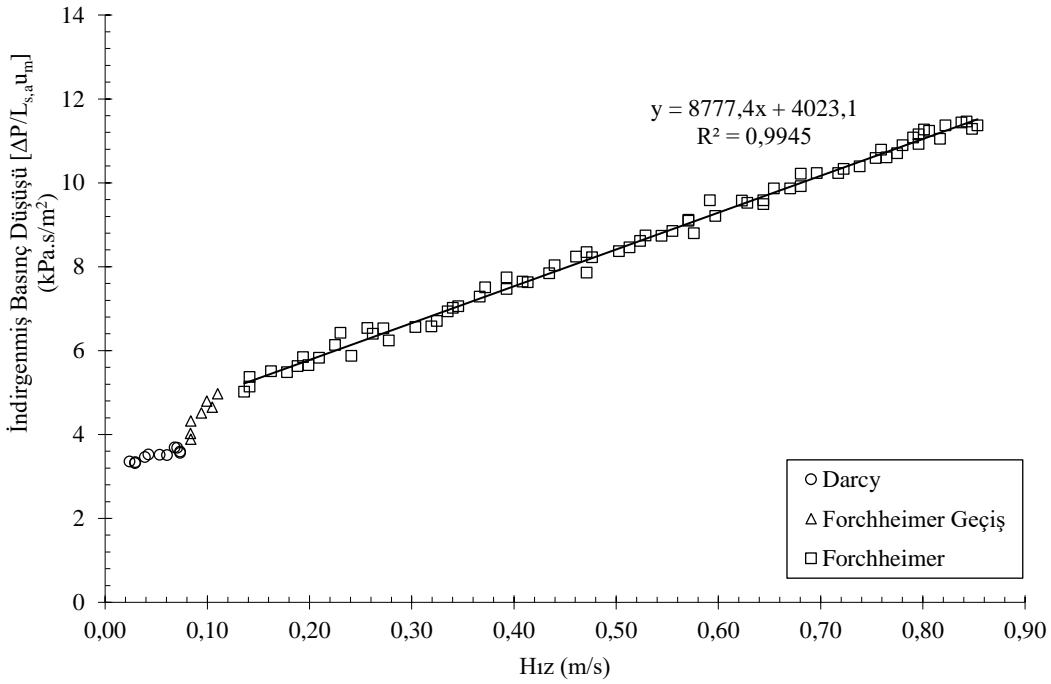
Şekil 3. Birim uzunluk başına basınç düşüşünün hızla ilişkisi

Şekil 3'te birim uzunluk başına düşen basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki verilmiştir. 2 mm çapında bilye için 93, 2.38 mm çapında bilye için 134, 3.17 mm çapında bilye için 226 adet toplamda 453 adet deney verisi mevcuttur. Spiral kanal içinde aynı hız değerinde bilye çapı azaldıkça basınç düşüşü değeri artmaktadır. Her üç bilye çapının gözeneklilik değeri hemen hemen aynıken spiral paket yatak içerisinde basınç düşüşleri farklıdır. Bunun sebebi paket yatakların özgül yüzey alanlarının eşit olmamasından kaynaklanmaktadır. Paket yatak içerisindeki özgül yüzey alanı arttıkça basınç düşüşü de artmaktadır. Deney verilerine uydurulan eğrinin R² değeri bire çok yakın olup bu durumun uydurulan eğrinin deney verileri ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Şekil 3'de verilen birim uzunluk başına basınç düşüşünün akış rejimlerinin sınırlarının belirlenmesine elverişli değildir. Daha uygun bir format, doğrusallık ve eğimdeki

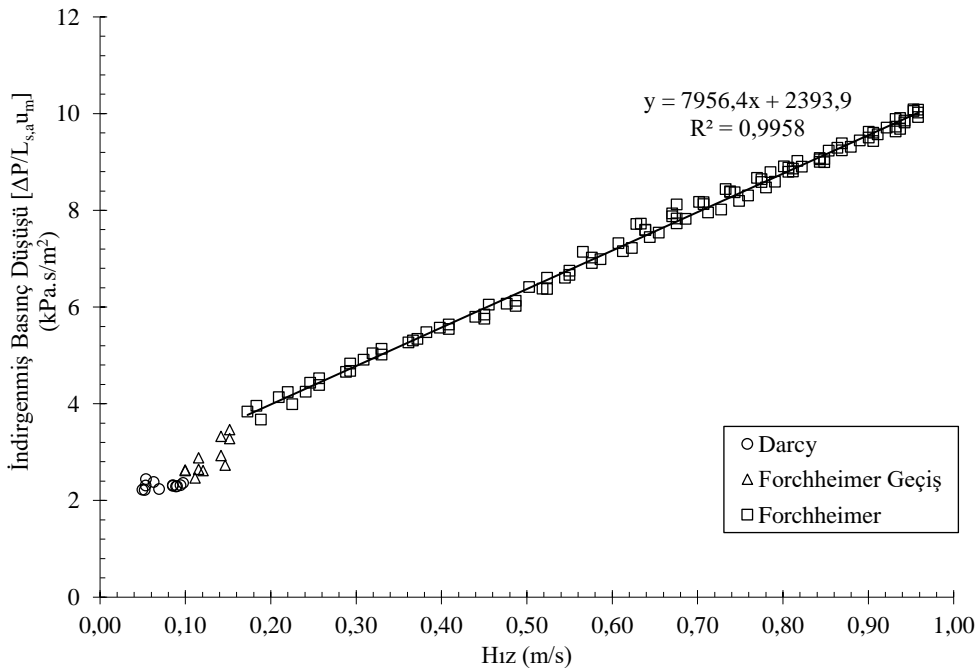
değişiklikleri sergileyen şekilde Eşitlik (4)'ün her iki tarafını hız (u_m) bölündüğünde aşağıda gösterildiği gibi

$$\frac{\Delta P}{L_{s,a} u_m} = A_E \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu}{\varepsilon^3 d^2} + B_E \frac{(1 - \varepsilon) \rho u_m}{\varepsilon^3 d} = \frac{\mu}{K} + \frac{\rho F u_m}{\sqrt{K}} \quad (4)$$

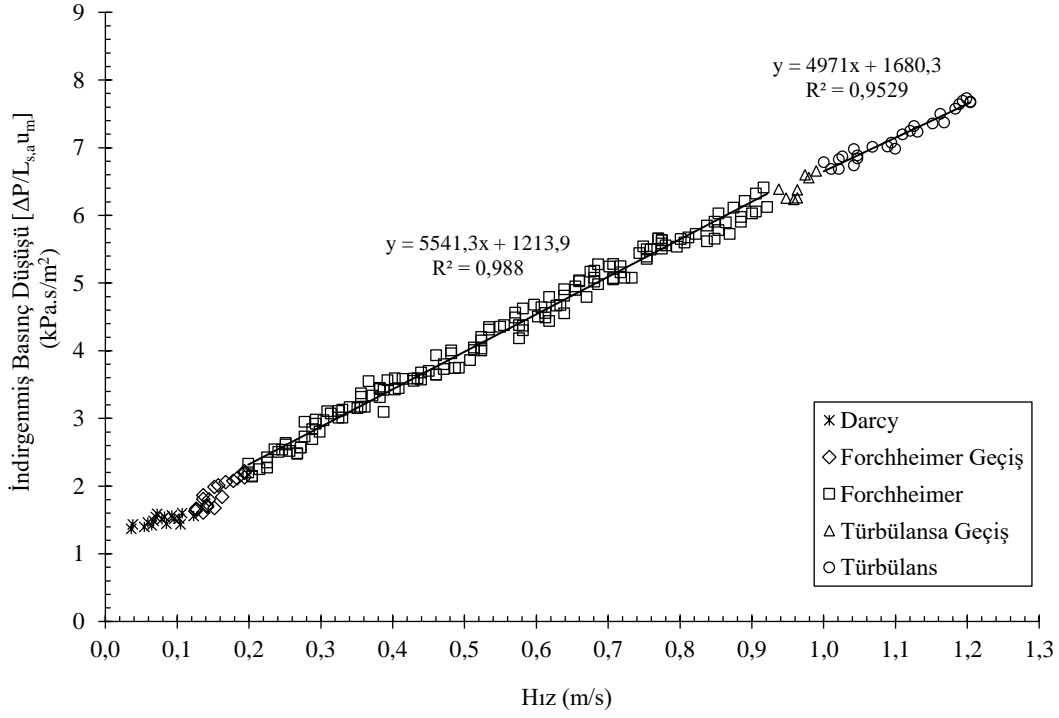
indirgenmiş basınç düşüşü denklemi elde edilir. Eşitlik (4)'te geçirgenlik ve Forchheimer (form ve atalet sürüklenme katsayısı) katsayısına göre de indirgenmiş basınç düşüşü ifadesi sunulmuştur. Burada, K geçirgenlik, F şekil sürüklenme katsayısını ifade etmektedir. Eşitlik (4)'te K, geçirgenliği F ise Forchheimer katsayısını ifade etmektedir. 2.00, 2.38 ve 3.17 mm bilye çapları için indirgenmiş basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişki Şekil 4'te verilmiştir.



a)



b)



Şekil 4. a) 2.00 ve b) 2.38 c) 3.17 mm çapında bilye için indirgenmiş basınç düşüşü ile ortalama hız arasındaki ilişki

Çok düşük hızlarda indirgenmiş basınç düşüşü sabit değerlerde ve hızdan bağımsızken, hız arttıkça indirgenmiş basınç düşüşü hızla lineer artmaktadır. Düşük hızlarda (creeping flow), basınç düşüşü yalnızca viskoz sürüklenmeden kaynaklanır. Atalet kuvvetlerinin etkisi görülmemektedir. Darcy yasasına göre bu sürüklenme tipik olarak, gözenekli ortamın iç morfolojisi ile güçlü bir şekilde ilişkili olan geçirgenlikle ilgilidir [6]. Darcy yasasını aşağıda gösterildiği gibi,

$$\frac{\Delta P}{L u_m} = \frac{\mu}{K} \quad (5)$$

ifade etmek mümkündür. Eşitlik (5)'te görüldüğü üzere indirgenmiş basınç düşüşü hızla değişmemektedir. Daha yüksek akış hızlarında, akış enerjisi kaybı viskoz ve form (atalet) sürüklenmelerinin toplamı haline gelmektedir. Sınır tabakaları, gözenekli ortam içinde katı sınırların yakınında gelişmeye başlar ve belirgin hale gelirler. Bununla birlikte, akış laminerdir. Forchheimer bölgesinde, atalet kuvvetleri de eklenerek Eşitlik (6) elde edilir.

$$\frac{\Delta P}{L u_m} = \frac{\mu}{K} + \frac{\rho F}{\sqrt{K}} u_m \quad (6)$$

Hem Darcy hem de Forchheimer rejimlerinin laminer bölgededir. Hız daha da arttıkça, laminer akış rejimi kademeli olarak, oldukça kaotik ve kararsız olan türbülanslı akış rejimine geçer [5]. Bilye çapının 2.00 mm olduğu paket yatakta, hızın yaklaşık 0.08 m/s olduğu duruma kadar indirgenmiş basınç düşüşü hızdan bağımsız ve sabittir. Bu bölge akış Darcy bölgesindedir. Hızın 0.08 m/s ile 0.12 m/s olduğu durumlarda indirgenmiş basınç düşüşü değeri

artmakta ve akış Forchheimer geçiş bölgesindedir. Hava hızının 0.14 m/s'den daha yüksek değerler akış Forchheimer bölgesinde olduğu görülmektedir. Bu bilye çapında türbülans akış rejimi görülmemiştir. Bilye çapının 2.38 mm olduğu durumda hızın 0.09 m/s'ye kadar akış rejimi Darcy bölgesindedir. 0.11 ile 0.15 m/s hava hızında akış Forchheimer geçiş bölgesindedir. 0.17 m/s'den daha yüksek hızlarda akış Forchheimer bölgesindedir. Bu bilye çapında da türbülans bölgesi görülmemiştir. Bilye çapının 3.17 mm olduğu paket yatakta ise hızın 0.10 m/s olduğu duruma kadar indirgenmiş basınç düşüşü sabittir ve akış Darcy rejimindedir. Hız arttığında 0.20 m/s olana kadar akış form sürüklenmeleri de ortaya çıkmakta ve Forchheimer bölgesine geçiş bölgesindedir. Hızın 0.92 m/s olduğu duruma kadar akış Forchheimer bölgesinde ve bu hız değerinden daha yüksek değerlerde akışta çalkantılar başlar ve türbülanslı bölge geçiş başlar. 0.94 ile 0.99 hava hızı aralığında akış türbülansa geçiş bölgesinde olup bu değerden sonra türbülans rejimine geçmektedir.

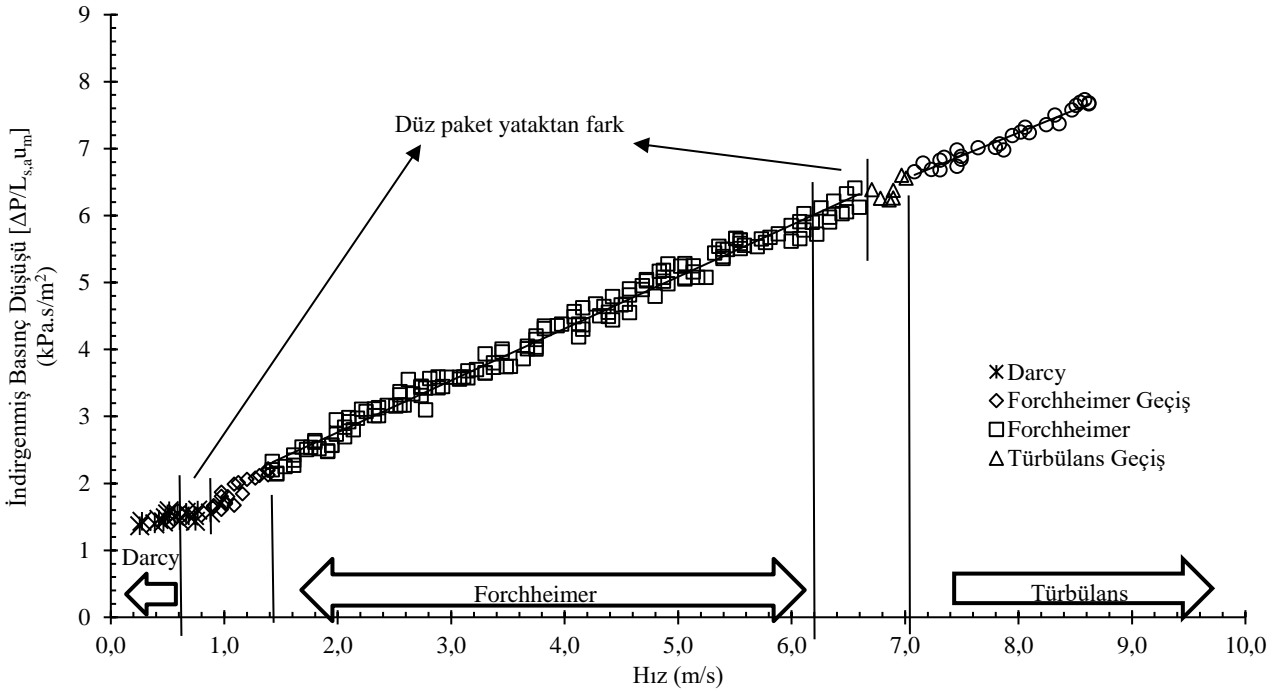
Şekil 4'te, her üç bilye çapı içinde görülen akış rejimleri için ayrı ayrı geçirgenlik ve Forchheimer katsayılarını hesaplamak mümkündür. Ayrıca bu akış rejimlerindeki hız aralıkları belirlendikten sonra Şekil 3'te basınç düşüşü ile hız arasındaki ilişkiden Ergün katsayılarına karşılık gelen katsayıları her bir rejim için hesaplamak mümkündür. Elde edilen bu değerler Tablo 2'de gösterilmektedir. Aynı gözenekli ortamın, farklı akış rejimlerinde ve tüm veriler dikkate alındığında Ergün sabitlerine karşılık gelen katsayılar önemli ölçüde değişkenlik göstermektedir. Forchheimer katsayıları; Forchheimer, türbülans ve bütün deney verilerinden elde edilen değerlerde hemen hemen aynı değerlerde iken geçirgenlik değerlerinin farklı olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Farklı rejimlerde Geçirgenlikler, Forchheimer katsayıları ve Ergün sabitlerine karşılık gelen katsayılar

Bilye çapı [mm]	Akış rejimleri	Geçirgenlik [m ²]	Forchheimer katsayısı	A _E	B _E
2.00	Darcy	5.21 x10 ⁻⁹	-	158.6	-
	Forchheimer	4.53x10 ⁻⁹	0.52	182.3	1.87
	Türbülans	-	-	-	-
	Bütün veriler	4.75x10 ⁻⁹	0.51	174.1	1.80
2.38	Darcy	7.93x10 ⁻⁹	-	147.6	-
	Forchheimer	7.62 x10 ⁻⁹	0.6	153.6	1.98
	Türbülans	-	-	-	-
	Bütün veriler	7.98x10 ⁻⁹	0.59	149.6	1.90
3.17	Darcy	1.23x10 ⁻⁸	-	181.8	-
	Forchheimer	1.50x10 ⁻⁸	0.59	154.8	1.95
	Türbülans	1.09x10 ⁻⁸	0.49	206.1	1.78
	Bütün veriler	1.30x10 ⁻⁸	0.52	172.0	1.86

Aynı deney odasında 2.00 ve 2.38 mm çapında bilyeler için Darcy ve Forchheimer akış rejimleri görülürken, 3.17 mm çapında bilye için Darcy, Forchheimer ve türbülans akış rejimleri görülmüştür. Şekil 5'te Özer vd. (2014) yılında yaptığı çalışma 3 mm çapında bilye için akış rejim aralıkları kıyaslanmıştır. Özer vd. [14] 3 mm çapında çelik bilyelerden oluşturdukları gözenekli ortamda su akışını inceleyerek akış rejimlerini belirlemişlerdir. Akış rejimlerin geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ($Re_K = \rho u_m \sqrt{K} / \mu$) aralığında vermişlerdir. Yazarların yaptıkları çalışmada kullandıkları bilye çapı bu çalışmada kullanılan bilye çapına yakın değerdedir. Özer vd. [14] çalışmalarıyla bu çalışma kıyaslandığında akış rejim aralıklarında az da olsa fark görülmüştür. Bu farkın spiral kanaldan da kaynaklı olduğu görülmektedir. Akış rejim aralıkları düz paket yatakla

kıyaslandığında, spiral paket yataklarda daha geniş aralıkta gerçekleşmektedir. Başka bir deyişle akış daha yüksek geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayılarında Darcy bölgesinden Forchheimer bölgesine ve Forchheimer bölgesinden türbülanslı bölgeye geçmektedir. Bilindiği üzere içerisi boş eğrisel bir kanaldaki akış düz borudan farklıdır. Eğrisel kanal içindeki akış dıştan iç yüzeye doğrudur ve merkezkaç kuvveti nedeniyle ikincil akış meydana gelir. İkincil akış, akış rejimi üzerinde büyük bir etkiye sahip olan eğrilik oranına bağlıdır [15]. Bu kanallarda laminerden türbülanslı akışa geçiş, eğrilik oranının da bir fonksiyonudur. Bu yüzden laminerden türbülanslı akışa geçiş, düz borudakinden daha yüksek Reynolds sayılarında meydana gelir [16]. Bu durumda içerisinde gözenekli ortam bulunan eğrisel kanallarda da daha yüksek Reynolds sayılarında laminer bölgeden, türbülanslı bölgeye geçiş gerçekleşir.



Şekil 5. Akış rejimlerinin karşılaştırılması

Şekil 5'te yatay eksenin hemen üzerinde Bağcı vd.[14] yılında yaptıkları çalışmadan belirledikleri rejim aralıkları verilmiştir. Bu

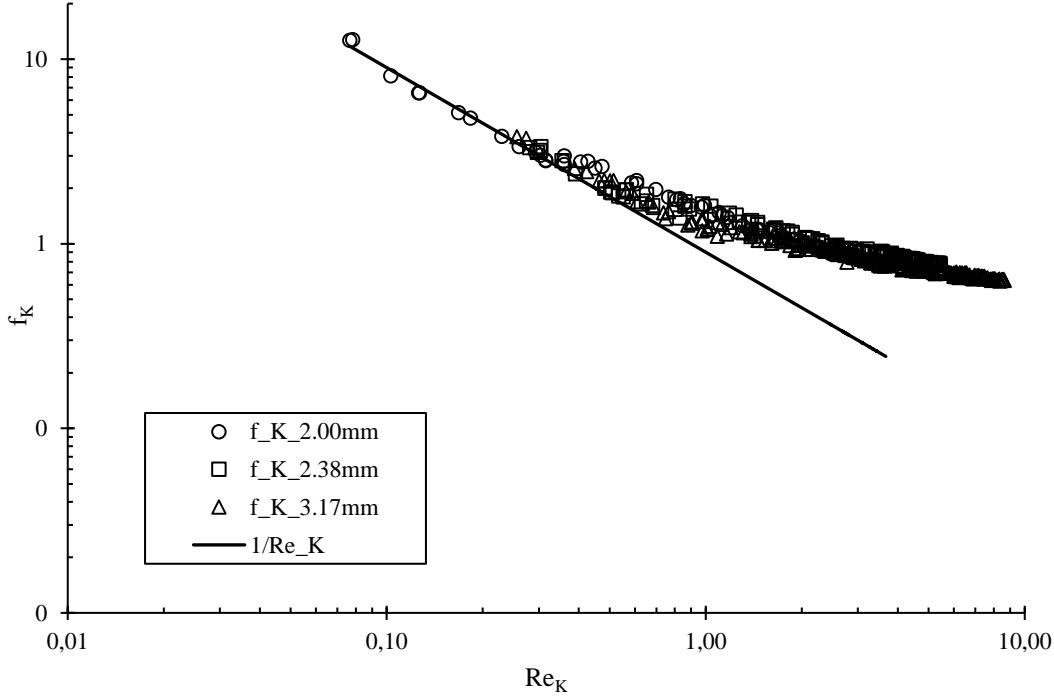
çalışmayla kıyaslandığında Darcy ve Forchheimer rejimlerinin daha geniş aralıklarda olduğu gösterilmiştir.

Eşitlik (7)'de, geçirgenliğe göre hesaplanmış sürtünme faktörünün yine geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı ile ilişkisi sunulmuştur.

$$f_K = \frac{1}{Re_K} + F \quad (7)$$

Burada $f_K = (\Delta P/L)\sqrt{K}/\rho u_m^2$ ifade etmektedir. Eşitlik (7)'de sunulan geçirgenliğe göre hesaplanmış hem sürtünme faktörü ile hem de Reynolds sayısının ilişkisi Şekil 6'da çizdirilmiştir. Geçirgenliğe göre hesaplanmış sürtünme faktörü genellikle

Reynolds sayısı ile ters orantılıdır. Üç farklı çapta bilyeden oluşturulan gözenekli ortam için verilerin, özellikle 0,1'den büyük Re_K için aynı eğri üzerinde olduğunu görmek oldukça cesaret vericidir. Darcy rejimi için, veriler $1/Re_K$ eğrisini takip etmelidir; ayrılma bu işlev Darcy rejiminin sonunu ifade eder [14]. $Re_K=1$ değerine kadar akış rejimi Darcy'dir. Forchheimer rejimi bilye çapına göre farklılık göstermektedir. Şekil 6'nın formatında, Forchheimer rejiminden ayrılma ve muhtemelen türbülansa geçiş, deneysel sürtünme faktörünün yatay çizgi $f_K=0.65$ ile kesişmesi ile tanımlanabilir. Bu yaklaşık $Re_K=7$ arasında gerçekleşir. Grafikte de görüldüğü üzere her üç bilye çapı için hemen hemen aynı eğilim söz konusudur.



Şekil 6. Geçirgenliğe göre hesaplanmış sürtünme faktörü ile Reynolds sayısı arasındaki ilişki

4. Sonuçlar ve Tartışma

Kanalın hem kavisli hem de içerisinde gözenekli ortam olduğu durumda hava akışının sonuçları sunulmuştur. Spiral paket yatak 2.00, 2.38 ve 3.17 mm çapında çelik bilyelerden oluşturulmuş ve gözeneklilik değerleri her üç bilye için hemen hemen aynı %41.4 ile %42 arasında ölçülmüştür. Her üç bilye için akış rejim aralıkları belirlenmiştir. 2.00 ve 2.38 mm çapında bilye için Darcy ve Forchheimer akış rejimi görülürken, 3.17 mm çapında bilye için Darcy, Forchheimer, Türbülans akış rejimleri görülmüştür. Her üç bilye çapından oluşturulan paket yataklarda, Darcy öncesi akış rejimi görülmemiştir. Her bir rejim ve bütün deneysel veriler için geçirgenlikler, Forchheimer katsayıları ve Ergün sabitlerine karşılık gelen katsayılar belirlenmiştir. Aynı gözenekli ortamın, farklı akış rejimlerinde geçirgenlik, Forchheimer katsayısı ve Ergün sabitlerinin farklı değerler sergilediği görülmüştür. Düz paket yataklarla karşılaştırıldığında, spiral paket yataklarda Ergün sabitlerinin daha yüksek çıktığı geçirgenlik değerlerinin ise azaldığı belirlenmiştir. Geçirgenlik değerinin azalması spiral paket yataklarda daha yüksek basınç düşüşleri ile karşılaşıldığı anlamına gelmektedir. Spiral paket yataklarda, düz paket yataklara kıyasla akış rejim aralıklarının daha geniş aralıkta olup, daha yüksek Reynolds sayılarında laminar bölgeden, türbülanslı bölgeye geçiş gerçekleşmektedir. Sürtünme faktörü ile geçirgenliğe göre hesaplanmış Reynolds sayısı arasındaki ilişki sunulmuştur. Bu çalışmanın sonuçları içerisinde gözenekli ortam

bulunan spiral levhalı ısı değiştiricilerinde basınç düşüşü yorumlanmasına ve daha iyi anlaşılmasına sağlayabilir. Ayrıca, akış rejimlerinin sınırlarını anlamak, gözenekli ortam akışlarının modellenmesine doğrudan yardımcı olabilir ve basınç düşüşünün yorumlanmasına, daha iyi anlaşılmasına sağlayabilir.

5. Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (İTÜ-BAP-41487) kapsamında desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] S. Ergun, A.A. Orning, Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds, Ind. Eng. Chem. 41 (1949) 1179–1184. <https://doi.org/10.1021/ie50474a011>.
- [2] S. Ergün, Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Process. 48 (1952) 89–94.
- [3] M.Y. Gökaslan, M. Özdemir, L. Kuddusi, Experimental study on laminar air flow through spiral channel packed with steel balls, Heat Mass Transf. Und Stoffuebertragung. (2021). <https://doi.org/10.1007/s00231-021-03023-y>.
- [4] A.M. Norouzi, M. Siavashi, A.R. Soheili, M. Khaliji Oskouei, Experimental investigation of effects of grain size, inlet pressure and flow rate of air and argon on pressure drop

- through a packed bed of granular activated carbon, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 96 (2018) 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.05.019>.
- [5] Ö. Bağcı, N. Dukhan, M. Özdemir, Flow Regimes in Packed Beds of Spheres from Pre-Darcy to Turbulent, *Transp. Porous Media.* 104 (2014) 501–520. <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0345-0>.
- [6] Ö. Bağcı, N. Dukhan, M. Özdemir, Various Flow Regimes and Permeabilities for Packed-Spheres Porous Media, *Defect Diffus. Forum.* 364 (2015) 1–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.364.1>.
- [7] I. Kececioğlu, Y. Jiang, Flow Through Porous Media of Packed Spheres Saturated With Water, *J. Fluids Eng.* 116 (1994) 164–170. <https://doi.org/10.1115/1.2910229>.
- [8] D. Seguin, A. Montillet, J. Comiti, F. Huet, Experimental characterization of flow regimes in various porous media—II: Transition to turbulent regime, *Chem. Eng. Sci.* 53 (1998) 3897–3909. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)80003-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)80003-1).
- [9] M.Y. Gökaslan, M. Özdemir, L. Kuddusi, Bilye Doldurulmuş Spiral Kanalda Basınç Düşüşünün Deneysel İncelenmesi, 22. Ulus. Isı Bilim. ve Tek. Kongresi, Kocaeli. (2019) 844–852.
- [10] R.S. Figliola, D.E. Beasley, *Theory and Design for Mechanical Measurements*, 6th ed., John Wiley & Sons, New York, 2015.
- [11] P.P.C. Avontuur, D. Geldart, A quality assessment of the Ergun equation, *Chem. Eng.* (1996) 994–996.
- [12] E. Ozahi, M.Y. Gundogdu, M.Ö. Carpinlioglu, A modification on Ergun’s correlation for use in cylindrical packed beds with non-spherical particles, *Adv. Powder Technol.* 19 (2008) 369–381. <https://doi.org/10.1163/156855208X314985>.
- [13] I.F. Macdonald, M.S. El-Sayed, K. Mow, F.A.L. Dullien, Flow through Porous Media—the Ergun Equation Revisited, *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 18 (1979) 199–208. <https://doi.org/10.1021/i160071a001>.
- [14] Ö. Bağcı, N. Dukhan, M. Özdemir, Flow Regimes in Packed Beds of Spheres from Pre-Darcy to Turbulent, *Transp. Porous Media.* 104 (2014) 501–520. <https://doi.org/10.1007/s11242-014-0345-0>.
- [15] A. Cioncolini, L. Santini, An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 30 (2006) 367–380. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2005.08.005>.
- [16] M. Ghobadi, Y.S. Muzychka, A Review of Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Laminar Flow in Curved Circular Ducts, *Heat Transf. Eng.* 37 (2016) 815–839. <https://doi.org/10.1080/01457632.2015.1089735>.