



Araştırma Makalesi / Research Article
AERODYNAMICS OF A SPHERICAL BASED SPOUTED BED

Duygu EVİN*, Vedat TANYILDIZI

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ

Geliş/Received: 10.05.2006 Kabul/Accepted: 06.03.2007

ABSTRACT

The experimental findings belong to the conventional cone based spouted beds show that, the individual particles in the annular part of the bed move vertically downward and radially inward, describing approximately parabolic trajectories. In this study, the shape of the jacket is arranged by conforming to parabolic trajectories of the particles as much as possible for eliminating or decreasing the dead zone. To ensure this, "a cylindrical spouted bed with spherical base" is used as closest shaped one and hydrodynamics of this spouted bed is investigated experimentally. This study includes experimental results of spherical based spouted bed of different materials for various operating parameters (H, U). Effects of bed height (H) and properties of the solid particles on minimum spouting velocity, peak pressure drop and steady spouting pressure drop (onset of spouting) are determined.

Keywords: Spouted bed, spherical base, pressure drop.

KÜRESEL TABANLI FIŞKIRAN BİR YATAĞIN AERODİNAMİĞİ

ÖZET

Konvansiyonel fişkiran yataklara ait literatürdeki deneysel bulgular, halka kesitli bölgeye düşen her bir parçacığın, aşağı ve içe doğru hareket ederken yaklaşık olarak parabolik bir yol izlediğini göstermektedir. Alışlagelmiş "düz veya konik" tabanlı fişkiran yataklarda, sirkülasyona katılmayan ölü bölgeyi minimuma indirmek amacıyla bu çalışmada, fişkiran yatak gövdesinin tabanı, akışın parabolik seyrine en yakın bir şekilde küresel olarak imâl edilmiştir. Geliştirilen "Küresel Tabanlı Fişkiran Yatak (KTFY)" karakteristikleri hidrodinamik açıdan deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma, farklı fiziksel özelliklere sahip malzemelerin küresel tabanlı fişkiran yatakta farklı işletme parametreleri (H, U) ile elde edilen deneysel sonuçlarını içermektedir. H yatak yüksekliğinin ve katı parçacık özelliklerinin minimum fişkırma hızı ile pik noktası ve sürekli rejim basınç düşüleri üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Fişkiran yatak, küresel taban, basınç düşmesi.

1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında fişkiran yatakların kurutma, granülleştirme, kaplama, heterojen reaksiyonlar, parçacıkların ısıtılması veya soğutulması gibi çok çeşitli genel uygulamaları mevcuttur. Bunun yanında, laboratuvar ölçekli olarak, tablet kurutma ve kaplama, yüksek sıcaklıktaki termokimyasal reaksiyonlarla pirolitik karbon veya silikon karbid ile nükleer yakıt mikro kürelerin kaplanması, kömürün parçacık özelliğinin minimum fişkırma hızı ile pik noktası ve sürekli rejim basınç düşüleri üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

* Sorumlu Yazar/Corresponding Autor: e-mail/e-ileti: devin@firat.edu.tr, tel: (424) 237 00 00 / 5334

tahılların kurutulması gibi özel uygulamalarda fişkiran yataklar kullanılmaktadır. Fişkiran yatak ilk kez Kanada'da 1954 yılında Gishler ve Mathur tarafından kurutucu olarak kullanılmış [1] ve günümüze kadar fişkiran yatak üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Mujumdar , fişkiran yatakları sınıflandırarak farklı tiplerin birbirlerine olan üstünlüklerini ve fişkiran yatak tekniğindeki sınırlamaları incelemiştir [2]. Çalışmasında, Fişkiran yatak teknolojisinin bazı alanlarında - özellikle tahılların kurutulması üzerinde- yapılacak ileri araştırmalar için araştırmacılara bazı tavsiyelerde bulunmuş ve modifiye edilmiş fişkiran yatakların avantajlarını tartışarak daha ileri çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir. Konvansiyonel yataklardaki bazı olumsuzlukların giderilmesi amacıyla yeni fişkiran yataklar geliştirilmektedir. Devahastin ve Mujumdar , titreşimli fişkiran yatak adını verdikleri bir fişkiran yatak geliştirmişlerdir. Bu yatağın bazı hidrodinamik karakteristiklerini tespit etmek üzere polietilen, polistren, buğday ve soya fasulyesi ile deneyler yapmış ve fişkırabilen maksimum yatak yüksekliği, katı sirkülasyon hızı, ve karışım davranışı açısından konvansiyonel yataklara nazaran daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir [3]. Jumah vd. , yeni bir dönen jetli fişkiran yatak (RJSB) geliştirmiş ve test etmişlerdir [4]. Bu yeni fişkiran yatakta konvansiyonel fişkiran yataklara nazaran partikül karışımı ve sirkülasyonunun arttığı tespit edilmiştir. Devahastin vd. , partiküllerin düşen kuruma hızı periyodunda kurutulması için yeni bir dönel jetli fişkiran yatak kurutucu geliştirmişlerdir [5]. Bu yatak, merkezine boru yerleştirilmiş bir silindirik kabın cidarı ile boru arasında kalan halka kesitli bölgede çevresel olarak dönen tek bir fişkırma jeti ihtiva etmektedir. Geldart sınıflandırmasına göre hepsi D grubu partiküller olan buğday, mısır ve polistren kullanılarak bu yatağın hidrodinamik karakteristikleri incelenmiştir.

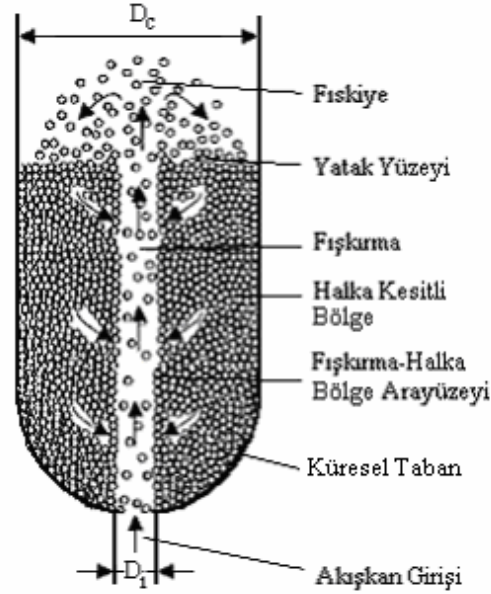
Olazar vd. , konvansiyonel fişkiran yataklarda işletme şartlarının partikül hızı üzerindeki etkisi üzerine yaptıkları çalışmalarında, bir optik fiber prob kullanarak taban açısı, gaz giriş çapı, durgun yatak yüksekliği, partikül çapı ve gaz hızının koni tabanlı konvansiyonel bir fişkiran yatağın üç bölgesindeki (fişkırma, halka kesit, fiskiye) katı partikül hızına etkisini incelemiştir [6]. Freitas ve Freire , koni tabanlı çekiş borulu alttan beslemeli bir fişkiran yatağın dinamik karakteristiklerini incelemiştir [7]. Partikül hızı ve sirkülasyon debilerinin tespitini aynı boyutlardaki bir yarım kolon fişkiran yatak imal ederek tespit etmiş, partikül besleme debisi, hava debisi ve yatak yüksekliğinin fişkiran yatak dinamiğine etkilerini incelemiştir. Swaminathan ve Mujumdar çalışmalarında, düz tabanlı bir fişkiran yatağın aerodinamik karakteristiklerine ait deneysel sonuçları sunmuş, deneylerinde mısır, ulaf ve arpa kullanarak gerek tam gerekse yarım kolon fişkiran yatak için basınç düşüşü eğrilerini tespit etmişlerdir [8]. Partikül hareketinin aerodinamiği ısı transferi ve kuruma miktarlarını belirlediğinden, farklılıkları ortaya koymak üzere çeşitli tahıllar ve suni nemlendirilmiş partiküllerin kullanıldığı deneysel çalışmalara ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır.

Olazar vd. konik fişkiran yataklara ait dizayn faktörlerini araştırdıkları çalışmalarında gaz girişi nozul çapı, koni alt ve üst çapları gibi farklı dizayn faktörlerinin etkisini incelemiştir [9]. Yine konik fişkiran yatakları ele aldıkları bir başka çalışmalarında ise, konik fişkiran yatağın hidrodinamik davranışının konvansiyonel koni tabanlı fişkiran yatağına kıyasla önemli farklılıklar gösterdiği tespit edilmiş, konik fişkiran yatakların özellikle yapışkan özellikte, düzensiz yapı veya boyut dağılımına sahip malzemeler için kullanımlarının uygun olduğu belirtilmiştir [10]. Jing vd. ise koni açısı ve yatak yüksekliğinin yatak aerodinamiğini etkileyen önemli parametreler olduğunu deneysel olarak tespit etmişlerdir [11]. Ishikura vd., gözenekli çekiş borusunun koni tabanlı bir fişkiran yatağa hidrodinamik etkisini incelemek üzere çeşitli işletme şartları ve dizayn faktörleri için deneysel bir çalışma yapmışlardır [12].

Bu çalışmada, literatürde mevcut olmayan küresel tabanlı bir fişkiran yatak imal edilerek hidrodinamik karakteristiklerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen fişkiran yatağa ait H yatak yüksekliğinin ve katı partikül özelliklerinin minimum fişkırma hızı U_{min} ile pik noktası ve sürekli rejim basınç düşüşleri üzerine etkileri belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Konvansiyonel fişkırın yataklara ait literatürdeki deneysel bulgular, halka kesitli bölgeye düşen her bir parçacığın, aşağı ve içe doğru hareket ederken yaklaşık olarak parabolik bir yol izlediğini göstermektedir [1]. Bu çalışmada, fişkırın yatak gövdesinin tabanı, akışın parabolik seyrine yakın olarak değiştirilmiş ve yarım küre şeklinde imâl edilmiştir. Şekil 1'de şematik olarak görülen küresel tabanlı fişkırın yatakta akışkan, katı partiküllerin bulunduğu silindirik gövdeli haznenin küresel tabanının ortasındaki delikten yukarı doğru üflenmekte ve katı partikülleri yatağın düşey eksenini boyunca sürükleyerek fıskiye şeklinde fişkırmasına sebep olmaktadır. Fıskırıtılan partiküller, daha sonra kolon çevresindeki halka bölgeye düşmektedirler. Dolayısıyla fişkırın yatak, akışla aynı yönlü bir seyreltik çekirdek bölge ve zıt yönlü bir yoğun halka bölge olmak üzere iki bölgeden oluşmakta, belli uygulamalar için konvansiyonel akışkan-katı konfigürasyonlarından daha uygun, sistematik ve çevrimsel bir katı hareketi sağlamaktadır.



Şekil 1. KTFY'nin şematik resmi

Geleneksel bir fişkırın yatakta kararlı bir fişkırma için aşağıdaki parametreler önem arz etmektedir:

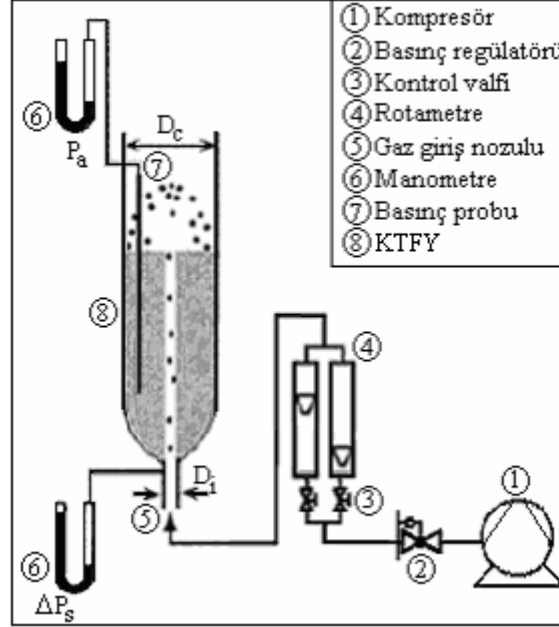
$$D_i/d_p < 25\sim 30 \quad (1)$$

$$D_c/D_i > 3\sim 12 \quad (2)$$

$$H < H_m \quad (3)$$

İlk kriter, Chandrani ve Epstein tarafından, küçük çaplı bir kolonla yapılan deneysel sonuçlara dayanılarak önerilmiş ve Lim ve Grace tarafından kolon çapı 0.91 m'ye çıkarılarak kriterin sınırları genişletilmiştir. İkinci kriter, Mathur ve Epstein tarafından küçük çaplı kolonlarla yapılan deneyler sonucu önerilmiştir. Üçüncü kriter ise küçük çaplı kolonlarda sağlanabilirken, bu kriteri büyük çaplı kolonlarda sağlamak güçtür [13].

Yukarıdaki kriterler de dikkate alınarak yüksekliği 0.425 m ve çapı 0.106 m olan gövdesine aynı çaplı küresel taban birleştirilerek imal edilen kolonun, söz konusu küre tabanının ortasındaki 0.0134 m çaplı bir nozuldan hava üflenmektedir. Geliştirilen KTFY'nin hidrodinamik karakteristiklerini deneysel olarak incelemek amacıyla Şekil 2'de görülen deney düzeneği kullanılmıştır. Yatağa hava bir kompresörden gönderilmiş, hava debisi bir basınç regülatörüyle ayarlanarak biri 0-20 m³/h diğeri 10-100 m³/h olmak üzere iki rotametre yardımıyla belirlenmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik görünüşü

Yatak basınç düşmesi (ΔP_s) hava girişine yerleştirilen bir statik basınç prizinin bağlı olduğu bir U-manometresi ile ölçülmüştür. Akış karakteristikleri, her bir malzeme ve her bir yatak yüksekliği için, hava debisi -bir fıskırma oluşumu gözlemleninceye kadar- yavaş yavaş artırılmak suretiyle kaydedilmiştir. Kararlı fıskırma sağlandıktan sonra -fıskırma çökünceye kadar- hava debisi yavaş yavaş azaltılmış ve bu noktadaki hız minimum fıskırma hızı olarak kaydedilmiştir. Yatak yüksekliği boyunca düşey basınç dağılımı (P_a) ise bir basınç probunun 0.025m aralıklarla halka bölgeyi düşeyde taramasıyla elde edilmiştir. Basınç probu, yatak ekseninden 0.0325 ve 0.0475 m mesafelerdeki halka kesitli bölge içerisine ve fıskırma bölgesine yerleştirilerek radyal basınç gradyenti elde edilmiştir. Partikül özelliklerinin ve yatak yüksekliğinin, KTFY'da minimum fıskırma hızı U_{min} ile pik noktası ve sürekli rejim basınç düşüşleri üzerine etkilerini incelemek üzere farklı fiziksel özelliklere sahip malzemeler ile, farklı durgun yatak yükseklikleri için, yatak basınç düşmesi ve halka kesitteki basınç dağılımları ölçülmüştür. Deneylerde, buğday, ayçekirdeği ve boncuk olmak üzere üç farklı parçacık kullanılmıştır. Kullanılan bu parçacıkların hepsi Geldart sınıflandırmasına göre D grubuna ait, fıskırılabilen, büyük ve yoğun parçacıklardır. Her bir test malzemesinin boyutlarını tespit etmek için mikrometre ile yirmi adet partiküle ait en (W), boy (L) ve kalınlık (T) ölçümleri yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. Bu test malzemelerinin fiziksel özellikleri Çizelge 1' de verilmiştir.

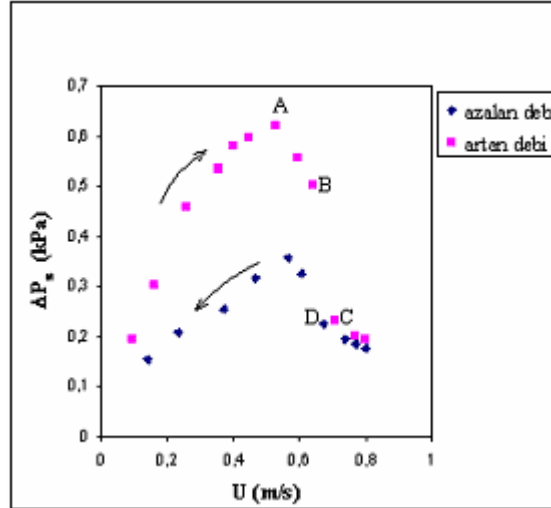
Çizelge 1. Test malzemelerinin fiziksel özellikleri

Malzeme	d_p (m)	ϕ (-)	ρ_s (kg/m ³)
Buğday	2.56×10^{-3}	0.53	1134.6
Ayçekirdeği	3.69×10^{-3}	0.41	458.5
Boncuk	5.94×10^{-3}	1	1007.5

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kararlı bir fişkırmaya için yatak basınç düşmesi ΔP_s önem taşımaktadır. Şekil-3 'den Şekil-7 ye kadar KTFY'ya ait tipik basınç düşmesi eğrileri görülmektedir.

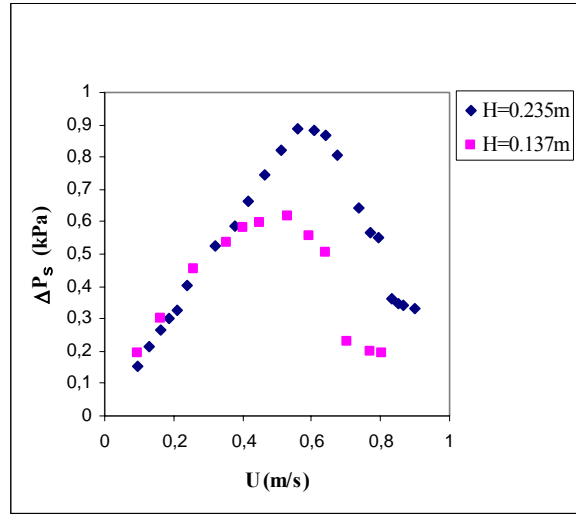
Şekil 3'de $H=0.137$ m yatak yüksekliğindeki buğdayın artan ve azalan hava debisi için yatak basınç düşmesi ile gaz hızı arasındaki ilişki ΔP_s -U grafiği ile verilmiştir. Bu grafikte KTFY'nin fişkırmaya özelliklerinin konvansiyonel yatağına benzer karakterde olduğu görülmektedir. Hava debisi fişkırmaya oluncaya kadar yavaş yavaş artırılarak akış karakteristikleri kaydedilmiştir. Şekilde maksimum basınç düşmesi A, yatağın üst yüzeyinin yırtıldığı hava debisine tekabül eden nokta B, basınç düşüşünde ani bir azalmanın olduğu ve kararlı fişkırmaya başladığı nokta C ile ifade edilmiştir. Fişkırmaya yataktan sabit yatağa geçiş hızı, minimum fişkırmaya hızı olarak tanımlanmaktadır [12]. Minimum fişkırmaya hızı katı ve akışkanın fiziksel özelliklerinin yanı sıra yatağın geometrisine de bağlıdır [1]. Minimum fişkırmaya hızını belirlemek amacıyla kararlı fişkırmaya sağlandıktan sonra hava debisi, çökme oluncaya kadar yavaş yavaş azaltılmış ve bu noktadaki (D noktası) hız minimum fişkırmaya hızı olarak belirlenmiştir.



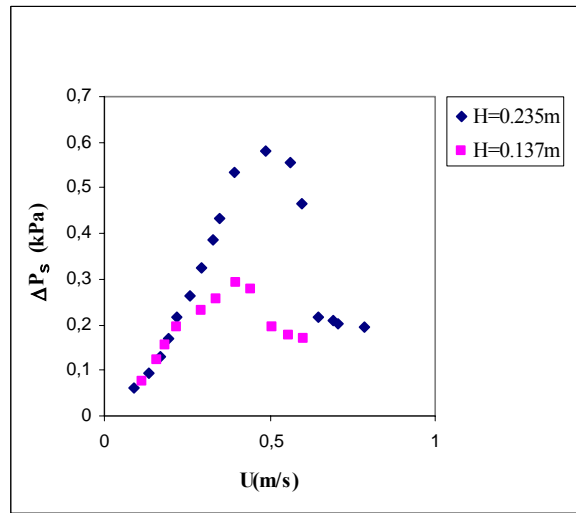
Şekil 3. $H=0.137$ m yatak yüksekliğindeki buğday için ΔP_s -U ilişkisi

Şekil 4 ve 5'de sırasıyla buğday ve ayçekirdeğinin, 0.137 ve 0.235 m'lik yatak yükseklikleri için, ΔP_s -U eğrileri verilmiştir. Artan yatak yüksekliği ile birlikte maksimum yatak düşmesi ve minimum fişkırmaya hızının arttığı görülmektedir. Şekil 6'da KTFY'da partikül özelliklerinin fişkırmaya etkisi görülmektedir. Pik basınç düşmesi ve minimum fişkırmaya hızının en yüksek değerleri partikül çapı en büyük olan boncuk için, en düşük değerleri ise yoğunluğu en düşük olan ayçekirdeği için elde edilmiştir. Partikül yoğunluğu arttıkça fişkırmaya kararlılığı azalmaktadır. Katı partikül şekli ve yüzey karakteristiklerinin fişkırmaya kararlılığı üzerinde

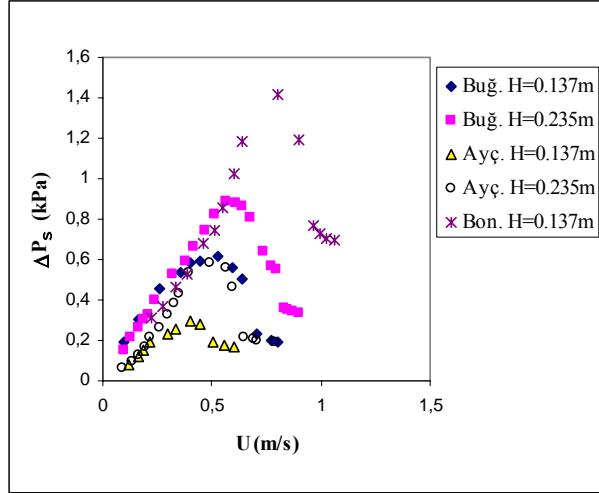
ispatlanması zor, ancak çok önemli etkisi olduğu bilinmektedir. Malek ve Lu amprik denklemlerinde, küresel olmayan partiküllerle, -küresel olanlarınkinden- daha fazla yatak yüksekliklerinde fişkırmannın sağlanabildiği belirtilmektedir [1].



Şekil 4. Buğdayın farklı yatak yükseklikleri için basınç düşmesi eğrileri



Şekil 5. Ayçekirdeğinin farklı yatak yükseklikleri için basınç düşmesi eğrileri

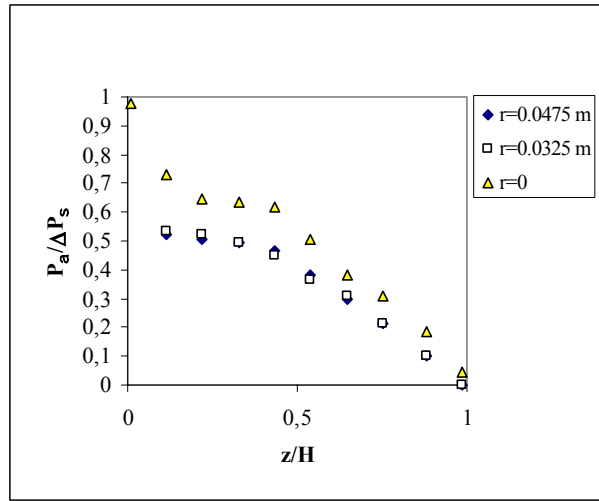


Şekil 6. Partikül özellikleri ve yatak yüksekliğinin KTFY’da fişkırmaya etkisi

Şekil 7’de buğday için KTFY’ın fişkıma bölgesindeki ve halka kesitli yoğun bölgedeki düşey basınç dağılımları görülmektedir.

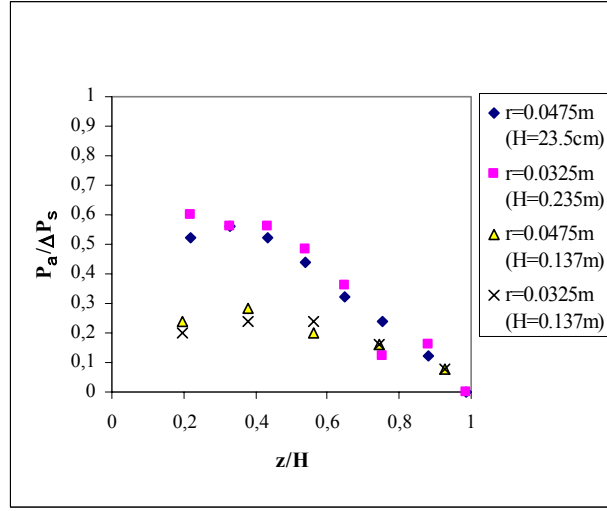
Fişkıma bölgesinde ($r=0$), basıncın halka kesitli bölgedekinden daha büyük olduğu görülmektedir. Küresel tabanda bu fark daha belirgin iken, yatağın yüzeyine doğru yükseldikçe azalmaktadır. Bu basınç dağılımı özellikle yatağın alt kısımlarında fişkıma bölgesinden yığın bölgeye daha fazla hava sızdığını göstermektedir.

Halka kesitli bölgedeki radyal basınç gradyenti ise özellikle yatağın üst kısmında ihmal edilebilecek kadar azdır.



Şekil 7. KTFY’da fişkıma bölgesi ve halka kesitli bölgedeki düşey basınç dağılımları (Buğday, $H=0.235m$, $U=0.802 m/s$)

Şekil 8’de ayçekirdeğinin farklı yatak yüksekliklerinde halka kesitli yoğun bölgedeki düşey basınç dağılımları görülmektedir. Halka kesitli bölgedeki radyal basınç gradyenti ihmal edilebilecek kadar azdır.



Şekil 8. Ayçekirdeğine ait KTFY’da halka kesitli bölgedeki düşey basınç dağılımları

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Küresel Tabanlı Fışkıran Yatak; buğday, ayçekirdeği ve boncuk olmak üzere farklı fiziksel özelliklere sahip katı parçacıklar için denenmiş ve kararlı bir fışkıрма sağlanmıştır. Söz konusu fışkıran yatak ile literatürde daha önceki çalışmalara paralel sonuçlar elde edilmiş, yatak yüksekliği arttıkça pik basınç düşmesi ve minimum fışkıрма hızının arttığı görülmüştür. Pik basınç düşmesi ve minimum fışkıрма hızının en yüksek değerleri partikül çapı en büyük olan boncuk için, en düşük değerleri ise partikül yoğunluğu en düşük olan ayçekirdeği için elde edilmiştir. Partikül yoğunluğu ve büyüklüğü arttıkça fışkıрма kararlılığı azalmaktadır.

KTFY’nin performansı açısından, yatağın küresel taban geometrisinin sirkülasyona ciddi katkısı olduğu düşünülmektedir. Ancak, sirküle eden ve atıl kalan parçacık miktarlarını belirlemek için katı parçacık hızını ölçecek ileri bir ölçme düzeneğine ihtiyaç vardır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 104M346 nolu proje olarak desteklenmekte olup, katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

SEMBOLLER

D_i	: Gaz giriş nozulunun çapı, m
D_c	: Kolon çapı, m
d_p	: Efektif parçacık çapı, ($=d_{pe}\phi$), m
d_{pe}	: Eşdeğer hacimli küre çapı, m
H	: Sabit yatak yüksekliği, m
H_m	: Maksimum yatak yüksekliği, m

Aerodynamics of a Spherical Based Spouted ...

U_{\min}	: Minimum fişkırma hızı, m/s
ΔP_s	: Yatak basınç düşmesi, kPa
P_a	: Halka kesitli bölgede herhangi bir noktadaki basınç düşmesi, kPa
r	: Radyal ordinat, m
U	: Kolonun kesit alanını esas alan yüzeysel gaz hızı, m/s
z	: Düşey ordinat, m
ϕ	: Küresellik
ρ_s	: Partikül yoğunluğu (kg/m^3)

KAYNAKLAR

- [1] Mathur, K.B. and Epstein, N., *Spouted Beds*, Academic Press, New York, 1974.
- [2] Mujumdar, A.S., Spouted bed technology- a brief review, In: A.S. Mujumdar (ed.), *Drying '84*, Hemisphere, New York, 193-196, 1984.
- [3] Devahastin, S. and Mujumdar, A.S., Some hydrodynamic and mixing characteristics of a pulsed spouted bed dryer, *Powder technology*, 117, 189-197, 2001.
- [4] Jumah, R.Y., Mujumdar, A. S. and Raghavan, G.S.V., Aerodynamics of a novel rotating jet spouted bed, *Chemical Engineering Journal*, 70, 209-219, 1998.
- [5] Devahastin, S., Mujumdar, A.S. and Raghavan, G.S.V., Hydrodynamic characteristics of a rotating jet annular spouted bed, *Powder Technology*, 103, 169-174, 1999.
- [6] Olazar, M., San Jose, M.J., Izquierdo, M.A., Salazar, A.O. and Bilbao, J., Effect of operating conditions on solid velocity in the spout, annulus and fountain of spouted beds, *Chemical Engineering Science*, 56, 3585-3594, 2001.
- [7] Freitas, L.A.P. and Freire, J.T, Experimental study on the dynamics of a spouted bed with particle feed through the base, *Braz. J. Chem. Eng.*, vol. 14, no. 3, 1997.
- [8] Swaminathan, R. and Mujumdar, A.S., Some aerodynamic aspects of spouted beds of grains, In: A.S. Mujumdar (ed.), *Drying '84*, Hemisphere, New York, 193-196, 1984.
- [9] Olazar, M. and Jose, M.J.S., Aguayo, A.T., Arendes, J.M., Bilbao, J., Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, 1784-1792, 1992.
- [10] Olazar, M., Alvarez, R., Aguado, R. and Jose, M.J.S. Spouted bed reactors, *Chem. Eng. Technol.*, 26, 8, 845-852, 2003.
- [11] Jing, S., Hu, Q., Wang, J. and Jin, Y., Fluidization of coarse particles in gas-solid conical beds, *Chemical Engineering and Processing*, 39, 379-387, 2000.
- [12] Ishikura, T., Nagashima, H. and Ide, M., Hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particles, *Powder technology*, 131, 56-65, 2003.
- [13] He, Y.-L., Lim, C.J. and Grace, J.R., Scale up studies of spouted beds, *Chem. Eng. Science*, 52, 2, 329-339, 1997.