

# Küresel olmayan malzemelerin akışkanlaşma sırasındaki davranışlarının incelenmesi

Elif SOYER\*, Hasan Z. SARIKAYA, Ömer AKGİRAY

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

*Akışkan yatakların genişlemesi sırasındaki hız-gözeneklilik ilişkileri üzerine önerilen pek çok denklem mevcuttur. Bununla birlikte bu denklemlerin tamamına yakını sadece küresel malzemelere uygulanabilir nitelikte olup küresel olmayan tanecikler için önerilen az sayıda modelin büyük çoğunluğu da ampiriktir ve şekil faktörü etkisini açık bir şekilde ortaya koymamaktadırlar. Ayrıca küresel olmayan tanecikler için geçerli genişleme modellerinin doğrulukları sistematik bir şekilde değerlendirilmemiş ve karşılaştırılmamıştır. Bu çalışmada küresel olmayan malzemeler ile ilgili akışkanlaşma deneyleri yürütülmüştür. Bu amaçla 10 farklı kum, 7 farklı perlit ve 11 farklı kırılarak oluşturulmuş cam fraksiyonu hazırlanmış, malzemelerin şeklinin akışkanlaşma sırasındaki davranışları üzerine etkisini belirlemek amacıyla sabit yatak yük kayıpları ve Ergun denklemi kullanılarak elde edilen küresellik katsayıları tespit edilmiştir. Bu şekilde her malzeme için ayrı ayrı hesaplanan küresellik parametresi akışkanlaşma çalışmalarının modellenmesinde oldukça iyi neticeler vermiştir. Çalışılan malzemelerin küresellik katsayıları kum, perlit, tek seferde kırılarak oluşturulmuş kırık cam ve tekrarlı kırma suretiyle oluşturulmuş kırık cam fraksiyonları için sırasıyla yaklaşık 0.74, 0.66, 0.42 ve 0.55 olarak bulunmuştur. Literatürde sıklıkla atıf alan küresel olmayan malzemelerin akışkanlaşma sırasındaki hız-gözeneklilik ilişkisini veren Dharmarajah-Cleasby (1986) denklemi bu çalışmada elde edilen deneysel veriler kullanılarak irdelenmiş ve küresel ve küresel olmayan malzemelerin genişlemiş yatak yükseklikleri ve gözenekliliklerinin tahmininde kullanılacak alternatif yeni bir denklem ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen yeni modelin Dharmarajah-Cleasby (1986) denklemine göre çok daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** Filtre geri yıkama hidroliği, akışkanlaşma, fitre malzemesi, küresellik.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Elif SOYER. esoyer@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 67 85.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Küresel olmayan malzemelerin akışkanlaşma sırasındaki davranışlarının incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 01.08.2008 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 18.09.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Expansion of non-spherical media during fluidization

### Extended abstract

*Liquid-solid fluidization has a number of applications in engineering. The expansion of granular filter media during backwashing is of particular interest. Another area of application that is of growing importance is fluidized-bed reactors used in wastewater treatment. It is important to have an understanding of fluidization principles and an ability to predict bed expansion as a function of liquid velocity to design such systems properly. More often than not, the media involved are not spherical and it is necessary to have an expansion model that can be applied to beds of non-spherical particles.*

*Numerous equations have been proposed to predict the expansion of liquid fluidized beds of spherical particles. Very few general equations exist, however, for non-spherical media. Furthermore, the accuracies of the expansion models for non-spherical media have not been evaluated or compared in a conclusive manner to this date.*

*This study considers the expansion of beds of possibly non-spherical particles during particulate fluidization. New experimental data with both spherical and non-spherical media are presented.*

*Fluidization experiments have been carried out with glass balls of eight different sizes (1.11, 1.19, 2.03, 2.99, 3.18, 4.03, 4.98 and 6.01 mm), plastic balls of three different sizes (1.97, 2.48 and 2.87 mm), ten sieved fractions of silica sand, eleven sieved fractions of crushed glass, and seven sieved fractions of perlite. Perlite and crushed glass were included in this study because their properties (densities and sphericities) are different than those of silica sand, and as such they can provide additional fluidization data. It may also be noted that both materials have been considered as substitutes for silica sand in rapid filters. To obtain additional fractions of crushed glass material, particles retained in the topmost sieve tray were crushed again and sieved. In this manner sufficient quantities of additional fractions of crushed glass were obtained. Glass fractions obtained by repeated crushing and sieving were observed to have higher sphericity values. Using this procedure, crushed glass fractions with approximately the same size and density but different sphericities were produced.*

*This allowed the collection of additional fluidization data to investigate the effect of shape on expansion behavior.*

*The sand, perlite, and crushed glass fractions were obtained by a manual sieving procedure followed by an additional 1 minute of manual sieving such that the change in weight during the latter was less than 1% for each fraction. Densities were measured by a water-displacement technique. Equivalent diameters have been measured by counting and weighing 200 grains of each fraction. Porosities were calculated from bed weight, bed height, and density values. Sphericity of each material was determined using fixed-bed head loss data in conjunction with the Ergun equation. For all the materials studied in this work, sphericity values calculated using fixed-bed head loss measurements and the Ergun equation allowed successful prediction of the effect of particle shape on bed expansion during fluidization. Sphericity values of the materials studied was found to be 0.74, 0.66, 0.42 and 0.55 for sand, perlite, crushed glass and crushed glass produced by repeated crushing, respectively. For the eight different sizes of glass and plastic balls, the calculated sphericities by using the Ergun equation were always close to 1.0.*

*A new equation is developed by analyzing fluidization data from the literature and the data collected in this work. The proposed equation represents the mentioned data very accurately and can be used to predict the expansion of both spherical and non-spherical media.*

*The non-spherical particle data fall below the curve for spheres on the friction factor versus the modified Reynolds number diagram. For the materials studied, it has been observed that this shape effect depends on the Reynolds number and is considerably stronger than documented previously in the literature. The proposed equation can be used to predict the expansion of both spherical and non-spherical media. When applied to the non-spherical particle data obtained in this work (bed expansions from 20% to about 100%, sphericities between 0.410 and 0.757), the mean error in the predicted porosity values is 2.45%. The corresponding mean error that results from Dharmarajah-Cleasby (1986) equation is 4.4%.*

**Keywords:** Filter backwash hydraulics, fluidization, filter material, sphericity.

## **Giriş**

Katı-sıvı sistemlerde akışkanlaşma birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Taneli malzemeden oluşan filtre yataklarının geri yıkaması açısından da akışkanlaşma önem taşır (AWWA, 1999; Akkoyunlu, 2003). Günümüzde önem kazanmaya devam eden bir diğer kullanım alanı da atıksu arıtımında kullanılmakta olan akışkan yataklı reaktörlerdir. Bu sistemlerin etkili bir şekilde tasarımının yapılabilmesi, akışkanlaşma prensiplerinin anlaşılması ve akışkan hızının bir fonksiyonu olarak yatak genişlemesinin tahmininin yapılabilmesine bağlıdır. Bu işlemlerde kullanılan malzemeler genellikle küresel olmayan malzemelerdir ve bu tip malzemelerden oluşan yataklara uygulanabilecek bir akışkanlaşma modeline ihtiyaç vardır.

Literatürde tanecikli akışkanlaşma sırasında filtre malzemesinin genişlemesi üzerine birçok denklem verilmiştir (Garside ve Al-Dibouni, 1977; Couderc, 1985; Hartman vd., 1989; Di Felice, 1995; Epstein, 2003). Bununla birlikte, bu denklemlerin tamamına yakını sadece küresel malzemelere uygulanabilir nitelikte olup küresel olmayan tanecikler için önerilen az sayıda modelin büyük çoğunluğu da ampiriktir ve şekil faktörü etkisini açık bir şekilde ortaya koymamaktadırlar. Bu nedenle bu modeller söz konusu araştırmacılar tarafından çalışılan malzemelere özgü karaktere sahip, genel uygulanabilirlik taşımayan modellerdir. Tanecikli akışkanlaşma hidroliği üzerine yapılmış olan bu çalışma akışkan bir filtre yatağına ait hız-gözeneklilik ilişkisinin tahmini için geliştirilen bir metodu içermektedir. Küresel olmayan malzemelerin elenmiş fraksiyonlarını içeren filtre yatakları yanı sıra tek tip üniform (aynı boyut ve yoğunlukta) kürelerden oluşan yataklarla da çalışılmıştır. Üniform tanelerden oluşan bir filtre yatağı için geliştirilecek doğru bir genişleme modelinin var olması durumunda, üniform olmayan filtre yatakları için de yatak genişlemesi tahmininin mümkün olabileceği unutulmamalıdır. Ayrıca, tek tabakalı filtrelerin genişleme modelleri çok tabakalı filtrelere genelleştirilebilir (Fair vd., 1971; AWWA, 1999).

Bu çalışmada 10 farklı kum, 7 farklı perlit ve 11 farklı kırılarak oluşturulmuş cam fraksiyonu

üzerinde permeabilite ve akışkanlaşma deneyleri yürütülmüştür. Ayrıca 11 farklı küresel malzeme üzerinde de deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Küresel ve küresel olmayan malzemelerin genişlemiş yatak yükseklikleri ve gözenekliliklerinin tahmininde kullanılacak yeni denklem önerilmiş ve elde edilen sonuçlar, literatürde sunulan modeller kullanılarak değerlendirilmiştir. Önerilen yeni modelin literatürdeki denklemlerden çok daha tutarlı ve yüksek doğruluğa sahip neticeler vermesi, bu çalışmanın akışkan bir filtre yatağına ait hız-gözeneklilik ilişkisinin ortaya koyulmasında literatürdeki önemli boşluğu dolduracağını göstermektedir.

## **Materyal ve yöntem**

Akışkanlaşma deneylerinde küresel ve küresel olmayan malzemeler kullanılmıştır. Küresel malzemeler (8 farklı boyutta cam ve 3 farklı boyutta plastik küre) doğrudan temin edilirken küresel olmayan malzemeler ön işlemlerin ardından elenerek hazırlanmıştır. İSKİ Kağıthane içme suyu arıtma tesislerinden temin edilen kum, yıkama ve etüvde kurutma işlemlerinin ardından eleme sonrasında deneylerde kullanılmıştır. Perlit minerali İzmir Cumaovası Etiper Perlit İşletmeleri'nden kırılmış olarak temin edilmiştir. Eleme işleminin ardından akışkanlaşma kolonunda bu malzemenin üst kısmında perlit mineralinin gri renginden daha açık beyaz renkli safsızlıkların toplandığı gözlenmiştir. Bu nedenle hazırlanan perlit fraksiyonlarının hepsine ön akışkanlaşma adımı uygulanmış ve bu safsızlıklar ayrılmıştır. Bu şekilde yürütülen ayırma işlemlerinin literatürde yapılan çalışmalarda da kullanıldığı görülmüştür (Cleasby, 1973). Akışkanlaşma deneylerinde kullanılan bir diğer malzeme kırık camdır. Bu malzeme Şişecam, Anadolu Cam Sanayi A.Ş.'den temin edilmiştir. Geri kazanılmış camın kırılarak elenmesi ile elde edilen pulverize cam, hızlı filtrasyon için yeni bir malzeme seçeneğidir. Silika kumu yerine kullanıldığı durumlarda daha ekonomik olacağı düşünülmektedir. Bu konu ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Aqua Test, 1995; Elliot, 2001; Evans, 2002; Piccirillo, 1997; Rutledge ve Gagnon 2002, Akgiray vd., 2007). Tesisten temin edilen kırık cam yaklaşık 3-4 cm boyutlarındadır ve yeniden kullanılmak üzere biriktiri-

len açık sahadan temin edildiği için üzerinde önemli miktarlarda kirlilik ihtiva etmektedir. Bu nedenle İTÜ İnşaat Mühendisliği Malzeme Laboratuvarında yürütülen kırma işlemleri öncesinde yıkama işlemlerine tabi tutulmuştur. Yapılan ön denemeler, yıkama işlemine tabi tutulmadan kırıcıya beslenen cam malzemenin bu işlem sonrasında kirliliklerinden ayrılmasının güçleştiğini göstermiştir. Kırma işlemleri sırasında kırıcı incelik ayarına özen gösterilmiştir. Çok ince ayarda cam malzemenin önemli bir kısmı toz haline gelmekte, kaba ayarlarda ise istenen elek aralıkları dışında malzeme fazla miktarda oluşmaktadır. Kırma ayarı her ne kadar optimum olarak ayarlanmaya çalışılsa da eleme işlemleri ardından daha fazla malzemeye ihtiyaç duyulması, kaba fraksiyonların tekrar kırıcıya beslenmesini gerektirmiştir. Bir kez kırma ardından tekrarlı kırma metodu kullanılarak oluşturulan bu cam fraksiyonlarının tek seferde kırma ile oluşturulmuş olan fraksiyonlara göre daha yüksek küreselliğe sahip oldukları görülmüştür. Bu durum, parçacık şeklinin akışkanlaşmaya olan etkisinin araştırılması için ilave veri temini açısından avantajlı olmuştur.

Belirlenen elek aralıklarında ASTM (2005) standartlarına göre elenerek kontrolleri yapılan malzemelerin deneyler öncesinde yoğunluk ve eşdeğer çap ölçümleri yapılmıştır. Malzeme yoğunlukları su ile yer değiştirme prensibine uygun olarak piknometre yardımıyla belirlenmiştir. Eşdeğer çap, küresel olmayan bir parçacığın kendisi ile aynı hacimdeki ve yoğunluktaki küresel tanenin çapı olarak tanımlanır (Denklem 1):

$$d_{eş} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot m}{\pi \cdot \rho_s}} \quad (1)$$

$d_{eş}$ : eşdeğer çapı, cm

$m$ : bir tanenin ağırlığı, gr

$\rho_s$ : parçacığın yoğunluğu, gr/cm<sup>3</sup>

Her fraksiyondan 200'er adet sayılarak tartım sonuçlarına göre eşdeğer çap değerleri belirlenmiş ve bu ölçümler 3-5 tekrarla gerçekleştirilerek ortalamalar alınmıştır. Küresel malzemelerin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Küresel malzemelerin yoğunluk ve eşdeğer çap değerleri

Malzeme	Yoğunluk, gr/cm <sup>3</sup>	Eşdeğer çap, mm
CAM	2.519	1.11
	2.494	1.19
	2.529	2.03
	2.494	2.99
	2.532	3.18
	2.499	4.03
	2.529	4.98
	2.527	6.01
PLASTİK	1.171	1.97
	1.193	2.48
	1.180	2.87

Permeabilite deneyleri Armfield Ltd. tarafından üretilen "W3 Permeabilite/ Akışkanlaşma" düzeneğinde yürütülmüştür. Düzenek, orijinal olarak 38 mm iç çapta ve 500 mm uzunlukta bir pleksiglas kolonu içermektedir. Kolon tabanında taneli malzemenin kolondan aşağıya geçmesini önlemek amacıyla 500 µm elek boyutuna sahip bir elek bulunmaktadır. Eleğin 500 µm açıklığa sahip olması dolayısıyla bu çaptan küçük malzemeler kolonda çalışılmayacağından, ince malzemeler için yeni bir kolon yaptırılmıştır. Bu kolonun iç çapı orijinal kolondan farklı olarak 40 mm'dir. Kolon tabanına 100 µm'lik elek sabitlenmiş, bu sayede 0.5 mm'den daha küçük parçacıklarla da çalışılması mümkün olmuştur. Kolon üzerinde, vidalı bir kapak bulunmakta ve bu sayede kolon kolayca yerinden çıkartılıp takılabilmektedir. Bu kapak üzerinde bulunan küçük bir hava alma vidası kullanılarak filtre malzemesinin kolona yerleştirilmesi sırasında oluşabilecek hava kabarcıkları sistemden uzaklaştırılabilmektedir.

Küresellik katsayısı, eşit hacimdeki bir kürenin yüzey alanının parçacığın gerçek yüzey alanına oranı şeklinde tanımlanır. Bu çalışmada küresellik katsayısının tahmini için permeabilite deneyleri ile sabit yatak yük kayıpları belirlenmiş ve ardından bu yük kayıpları Ergun (1952) denklemi (Denklem 2) yerine koyularak küresellik katsayısının hesabına geçilmiştir:

$$\frac{h}{l} = 150 \frac{\mu}{\rho g} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \left[ \frac{S}{6} \right]^2 V + 1.75 \frac{(1-\varepsilon) S}{\varepsilon^3} \frac{V^2}{6 \cdot 2g} \quad (2)$$

Burada,

$h$ : yük kaybını, m

$l$ : filtre malzemesi derinliğini, m

$\mu$ : dinamik viskoziteyi, kg/m/sn

$\rho$ : su yoğunluğunu, kg/m<sup>3</sup>

$\varepsilon$ : gözenekliliği (boşluk hacmi/yatak hacmi)

$S$ : spesifik yüzeyi

$\psi$ : küresellik katsayısını

$V$ : filtrasyon hızını, m/sn

$g$ : yerçekimi ivmesini (9.81 m/sn<sup>2</sup>)

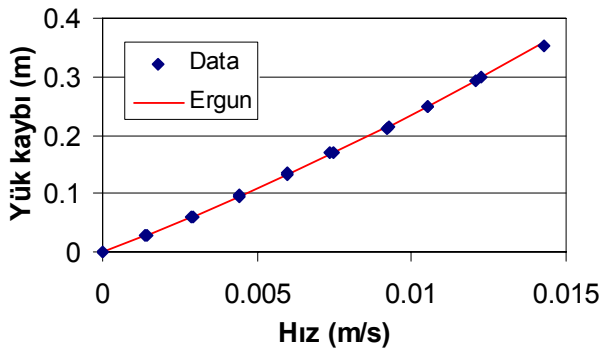
göstermektedir.

Spesifik yüzey,  $S$ , birim hacme düşen tane yüzey alanıdır ( $S=A_p/V_p$ ). Eşit hacimdeki bir kürenin yüzey alanının parçacığın gerçek yüzey alanına oranı alınarak hesaplanan küresellik katsayısı ( $\psi$ ) ile  $S$  arasında Denklem 3'te sunulan ilişki vardır:

$$\psi = \frac{\pi d_{es}^2 / (\pi d_{es}^3 / 6)}{S} = \frac{6}{S \cdot d_{es}} \quad (3)$$

$A_p$  ve  $V_p$  taneciğin sırasıyla yüzey alanı ve hacmini,  $d_{es}$  ise eşdeğer çapı göstermektedir.

Şekil 1'de 1.11 mm cam küreler için ölçülen sabit yatak yük kayıpları ve Ergun (1952) denklemi ile hesaplanan değerler görülmektedir (sürekli eğri  $\psi=1$  için çizilmiştir).



Şekil 1. 1.11 mm cam küreler için ölçülen sabit yatak yük kayıpları

Tablo 2'de elenerek hazırlanan küresel olmayan malzeme fraksiyonlarının yoğunluk ve eşdeğer çap değerleri sunulmuştur. Deneysel çalışmalar-

da iki farklı sistemde akışkanlaşma deneyleri yürütülmüştür. Bunlardan biri permeabilite deneylerinin de yürütüldüğü Armfield W3 Permeabilite / Akışkanlaşma deney düzeneği, diğeri de 50.5 mm iç çaplı, akışkanlaşma bölümü 152 cm yüksekliğindeki pleksiglas kolondur.

Tablo 2. Küresel olmayan malzemelerin eşdeğer çap ve yoğunluk değerleri

Malzeme	Elek aralığı, mm	Yoğunluk, gr/cm <sup>3</sup>	Eşdeğer çap, mm	Küresellik
KUM	1.68-1.41	2.629	1.65	0.723
	1.41-1.19	2.628	1.40	0.714
	1.19-1.00	2.641	1.11	0.706
	1.00-0.84	2.639	1.02	0.738
	0.84-0.701	2.640	0.84	0.757
	0.701-0.590	2.653	0.73	0.772
	0.600-0.590	2.651	0.67	0.788
	0.600-0.500	2.649	0.65	0.794
	0.590-0.500	2.647	0.60	0.777
	0.500-0.355	2.646	0.50	0.710
PERLİT	1.68-1.41	2.326	1.65	0.682
	1.41-1.18	2.328	1.41	0.651
	1.18-1.00	2.332	1.22	0.664
	1.00-0.84	2.331	1.07	0.645
	0.84-0.701	2.335	0.85	0.652
	0.701-0.590	2.342	0.67	0.678
	0.590-0.500	2.342	0.57	0.678
KIRIK CAM*	2.38-2.00	2.499	2.08	0.415
	1.68-1.41	2.496	1.48	0.430
	1.41-1.18	2.494	1.24	0.442
	1.00-0.84	2.486	0.92	0.413
KIRIK CAM**	2.38-2.00	2.499	2.21	0.624
	2.00-1.68	2.501	1.82	0.559
	1.68-1.41	2.503	1.62	0.564
	1.41-1.18	2.496	1.34	0.515
	1.18-1.00	2.497	1.13	0.548
	1.00-0.84	2.497	0.98	0.516
	0.84-0.701	2.490	0.77	0.530

\*Tek seferde kırma ile elde edilmiş kırık cam fraksiyonları

\*\* Birden çok kez tekrarlı kırma ile elde edilmiş kırık cam fraksiyonları

Bu akışkanlaşma kolonu standart 2 m pleksiglas borudan imal edilmiştir. Kolonun iç çap değeri, alt ve üst ucundan mekanik ve dijital kumpas yardımı ile ölçümler alınarak hassas bir şekilde tespit edilmiştir. Kolonun alt ve üst uçlarına, akışkanlaşma bölmesine bir flanş yardımıyla eklenen 20 cm yüksekliğinde giriş ve çıkış bölmeleri yapılmıştır. Alt kısımdaki bölmenin amacı kolona su girişi sırasında yaşanabilecek

kanallanma, suyun homojen gelmemesi gibi olumsuzlukları önlemek, dengeli bir şekilde akışkanlaşmayı sağlayabilmektir. Bu dengeleme bölmesi ortalama 1 cm çaplı çakıl ile doldurulmuştur. Bu bölme üzerine 100  $\mu\text{m}$ 'lik bir elek filtre malzemesinin aşağıya geçişini engellemek amacıyla yerleştirilmekte ve flanş yardımıyla kolonun akışkanlaşma bölgesine sabitlenmektedir. Dengeleme alt bölümünün üzerindeki 152 cm'lik akışkanlaşma bölgesini takiben, filtre malzemesinin kolondan kaçışını engellemek amacıyla yine 100  $\mu\text{m}$ 'lik bir elek ve üzerinde de 20 cm'lik çıkış bölmesi yapılmıştır. Alt ve üst bölmeler ve akışkanlaşma bölgesi ile birlikte kolonun toplam uzunluğu yaklaşık 2 m'dir.

Tüm deneylerde akışkan olarak su kullanılmıştır. Kolonlara su girişi bir pompa yardımıyla sağlanmıştır. Çalışılan malzemenin cinsine ve kolon iç çapına bağlı olarak yeterli genişlemeleri sağlayabilecek güçte pompa kullanılmıştır. Akışkanlaşma kolonuna verilen su 100 lt hacme sahip bir depodan temin edilmekte ve deney sırasında kolonu terk eden su yine bu depoya verilmektedir. Yatak yüksekliği, debi (akış hızı) ve sıcaklık deney boyunca kaydedilen parametrelerdir.

Akış hızının belirlenmesi için debi ölçümünde debimetre kullanımı suretiyle de deneyler yürütülmüştür. İki farklı aralıkta ölçüm yapabilen (6 mm ve 10 mm iç çaplı) elektromanyetik debimetreler kullanılmıştır (MUT 500, Euromag International).

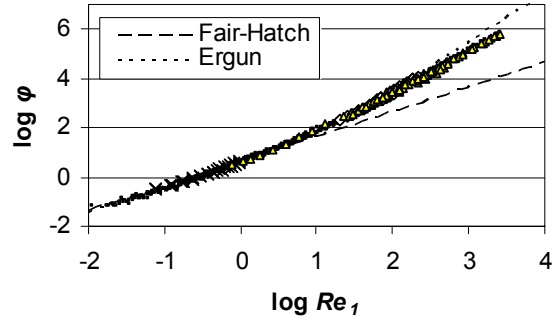
### Deneysel çalışma sonuçları

Literatürde Wilhelm ve Kwauk (1948), Loeffler (1953), Wen ve Yu (1966) ve Hartman ve diğerleri (1989) tarafından yayınlanan kürelere ait akışkanlaşma datası Şekil 2'de grafik olarak gösterilmiştir. Verilerin değişimi, Blake (1922) tarafından önerilen Reynolds sayısı tanımına [ $Re_1 = Re/6(1-\varepsilon)$ ] karşılık Richardson ve Meikle (1961) tarafından önerilen boyutsuz bir grup ( $\varphi = f \cdot Re_1^2$ ) esas alınarak ( $f$ : sürtünme faktörü) incelenmiştir. Bu parametreler aşağıda sunulmuştur:

$$Re_1 = \frac{\psi \cdot d_{es} \cdot \rho \cdot V}{6\mu(1-\varepsilon)} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \frac{\psi^3 d_{es}^3 \rho (\rho_p - \rho) g}{216\mu^2} \quad (5)$$

Şekil 2'de ayrıca Fair-Hatch denklemi ve Ergun denkleminin katsayılarının akışkanlaşma için değiştirilerek elde edilen formu görülmektedir ( $k_1=3.519$ ;  $k_2=0.266$ ; Akgiray vd., 2004).



Şekil 2. Analiz için kullanılan literatürden alınmış veriler ve modifiye edilmiş Ergun denklemi ile Fair-Hatch denklemi

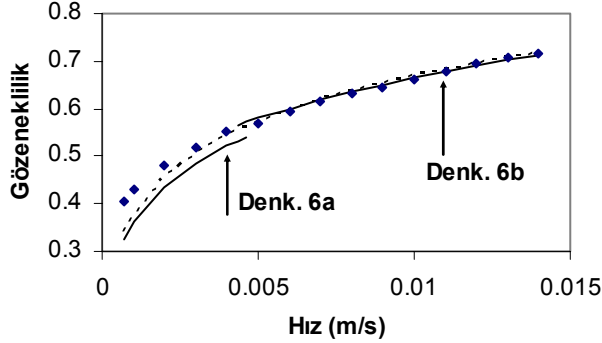
Dharmarajah-Cleasby (1982) denklemi, şekil düzeltme terimi ile küresel olmayan malzemeleri de kapsayan, regresyon analizi ile elde edilmiş, literatürde sıklıkla atıf alan bir denklemdir (Denklem 6).

$$Re_1 < 0.2 : \quad \varphi = 3.01 Re_1 \quad (6a)$$

$$Re_1 > 0.2 : \quad \log \varphi = 0.56543 + 1.09348 \log Re_1 + 0.17979 (\log Re_1)^2 - 0.00392 (\log Re_1)^4 - 1.5 (\log \psi)^2 \quad (6b)$$

Denklem 6b'deki  $1.5(\log \psi)^2$  terimi Cleasby ve Fan (1981) ve Dharmarajah (1982) tarafından küresel olmayan malzemeler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları kullanılarak bulunmuştur. Denklem 6, küresel malzemelere ait verilerin tümü dikkate alındığında iyi bir uyum veriyor olsa da şekilde temsil ediyor olsa da bazı dezavantajlara sahiptir. Bunlardan birincisi, gözeneklilik veya akışkanlaşma hızından birisinin hesabının, diğerinin veriliyor olması durumunda iteratif yöntemler gerektiriyor olmasıdır. İkincisi, denklem  $Re_1=0.2$ 'de süreksizlik taşımaktadır. Bununla birlikte süreksizlik nokta-

sında iki farklı gözeneklilik değeri birlikte mümkün olmaktadır (Şekil 3). Bu durum, korelasyonun kullanılmasında bir belirsizliğe yol açmaktadır.

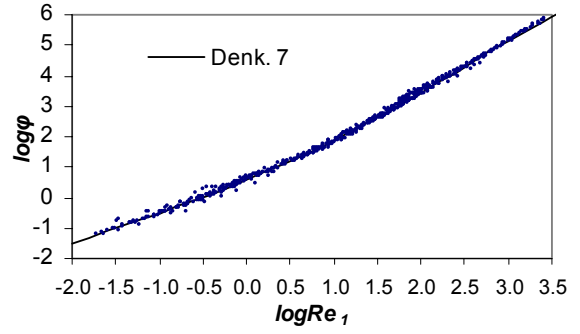


Şekil 3. Literatürden alınan verilere (Hartman vd., 1989) Denklem 6a-b (sürekli eğri) ve Denklem 7'nin (kesikli eğri) uygulanması (1.20 mm küreler,  $\rho_p=2703.7 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho=1189 \text{ kg/m}^3$ ;  $\mu=0.01323 \text{ kg/m/s}$ )

Denklem 7, literatürden alınan küresel malzemelere ait datanın (Wilhelm ve Kwauk, 1948; Loeffler, 1953; Wen ve Yu, 1966; Hartman vd., 1989) lineer olmayan regresyon analizi ile elde edilen korelasyonunu göstermektedir (Akgiray vd., 2004). Bu analizde sadece küreler için verilen akışkanlaşma datası kullanılmış, “yuvarlak kum”, “küresel kum” olarak tabir edilen malzemelere ait veriler, bu malzemelerin tam anlamıyla küresel olmalarının mümkün olamayacağı göz önüne alınarak analiz dışında tutulmuştur. Bahsi geçen küresel parçacıklara ait verilere ( $-1.72 < \log Re_1 < 3.42$  aralığında 540 ölçüm) uygulandığında, Denklem 7'nin verdiği tahmini gözeneklilik değerlerine ait ortalama hata % 3.17 olmaktadır (Şekil 4). Küresel malzemeler için iyi sonuçlar veren Dharmarajah-Cleasby korelasyonu ile bulunan ortalama hata değeri % 3.27'dir.

$$\log \phi = 0.565013 + 1.157034 \log Re_1 + 0.12866 (\log Re_1)^2 + 0.02195 (\log Re_1)^3 - 0.008 (\log Re_1)^4 \quad (7)$$

Kum, perlit ve kırık cam fraksiyonları üzerinde yürütülen akışkanlaşma deneyleri neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:



Şekil 4. Literatürden alınan küresel tanecik verileri ve Denklem 7

- (i) Verilen bir malzeme için artan küresellik değerleri, küreler için elde edilmiş eğriye daha yaklaşan sonuçlar vermektedir.
- (ii) Küreler için verilen eğilim çizgisinden küresel olmayan malzemelerin sonuçlarının gösterdiği sapma  $1.5(\log \psi)^2$  ifadesi ile hesaplanabilecek sabit bir değer değildir. Bu sapma değerleri Reynolds sayısının artan değerleri ile artmaktadır.
- (iii) Sapmanın derecesi,  $1.5(\log \psi)^2$  ifadesi ile hesaplanacak sapma değerlerinden daha büyük olmaktadır.

Küresel olmayan parçacıklara ait datanın lineer olmayan regresyon analizinin yapılması ve bir çok farklı ampirik ifadelerin denenmesinin ardından, küresel olmayan malzemelere ait datanın küreler için elde edilen eğilim çizgisinden sapmasının aşağıdaki ifade ile (Denklem 8) oldukça iyi bir şekilde temsil edilebileceği bulunmuştur (Soyer ve Akgiray, 2005):

$$-(0.8387 + 0.46538 \log Re_1)(-\log \psi)^{1.15} \quad (8)$$

Küresellik değeri 1'e eşit olduğunda bu terimin ( $\psi = 1$ ) ortadan kalkacağına dikkat edilmelidir.

Denklem 7 ve 8 birleştirildiğinde küresel ve küresel olmayan malzemelerin her ikisine birden uygulanabilecek yeni bir ifade elde edilmektedir:

$$\log \phi = 0.565013 + 1.157034 \log Re_1 + 0.12866 (\log Re_1)^2 + 0.02195 (\log Re_1)^3 - 0.008 (\log Re_1)^4 - (0.8387 + 0.46538 \log Re_1)(-\log \psi)^{1.15} \quad (9)$$

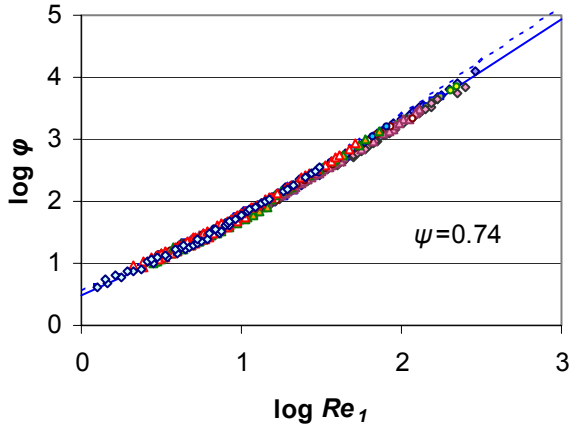
İncelenen küresel olmayan malzemeler için  $\log Re_1 - \log \phi$  grafikleri ve bu sonuçların denklemlerle uyumu Şekil 5a-d'de verilmiştir. Malzemelerin model tahminlerinde kullanılan ortalama küresellik katsayısı ( $\psi$ ) değerleri şekillerde görülmektedir.

Deneyel çalışmalar ile elde edilen verilere uygulandığında gözeneklilik değerlerindeki ortalama hatalar Dharmarajah-Cleasby ve Soyer-Akgiray korelasyonları için sırasıyla % 4.4 ve % 2.45 olarak bulunmaktadır. Her iki korelasyonun doğruluğu arasındaki farklılık tahmin edilen yatak genişlemelerine bakıldığında (gözeneklilikler yerine) daha iyi görülmektedir (Şekil 6-8). Örneğin, Şekil 7'nin en üst

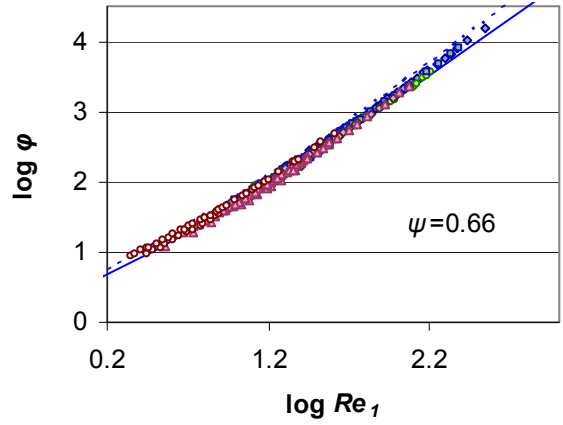
değeri incelendiğinde Dharmarajah-Cleasby korelasyonu ile tahmin edilen gözeneklilik değerinin 0.838 olduğu görülmektedir (gerçekte ise deneysel olarak hesaplanan gözeneklilik değeri 0.759'dur). Burada ölçülen gözeneklilik değerindeki hata sadece % 12 iken, tahmin edilen ve deneysel olarak bulunan yatak genişlemeleri ise sırasıyla % 200 ve % 91'dir.

## Sonuçlar

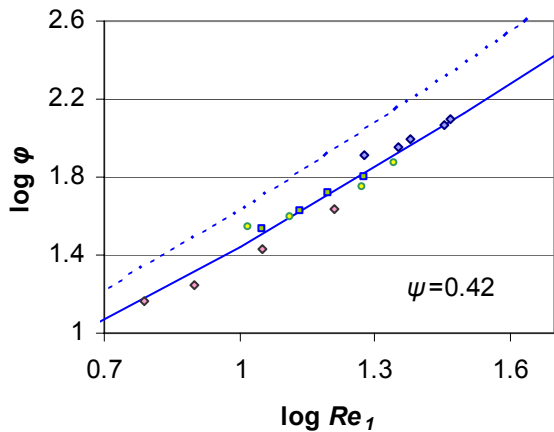
Tanecik şeklinin akışkanlaşmaya olan etkilerini incelemek amacıyla cam küreler, plastik küreler, elenerek hazırlanmış silika kumu, perlit ve kırık cam fraksiyonları ile akışkanlaşma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Küresellik katsayıları Ergun



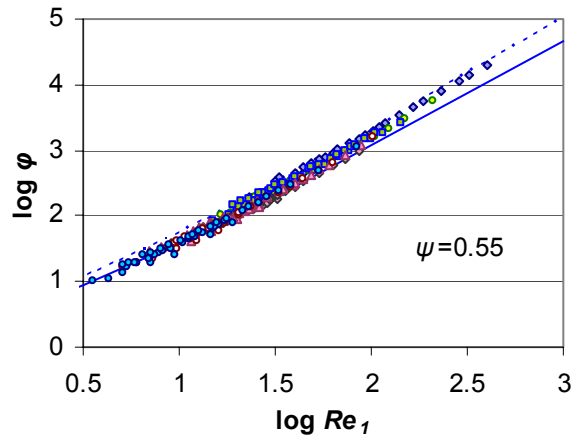
(a)



(b)



(c)



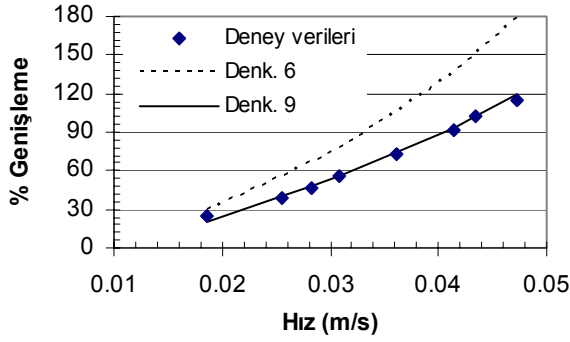
(d)

Şekil 5.  $\log Re_1 - \log \phi$  grafikleri ve modellerle uyumu

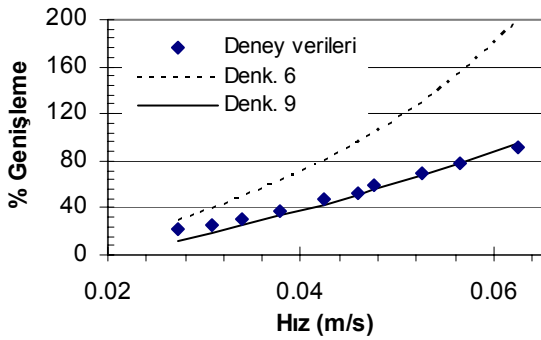
(a-Kum, b-Perlit, c-Tek seferde kırılarak elde edilmiş kırık cam fraksiyonları, d-Tekrarlı kırma ile elde edilmiş kırık cam fraksiyonları\*

(\*Grafiklerdeki kesikli eğri Dharmarajah-Cleasby denklemi, sürekli eğri ise Denklem 7 ile yapılan tahminleri göstermektedir)

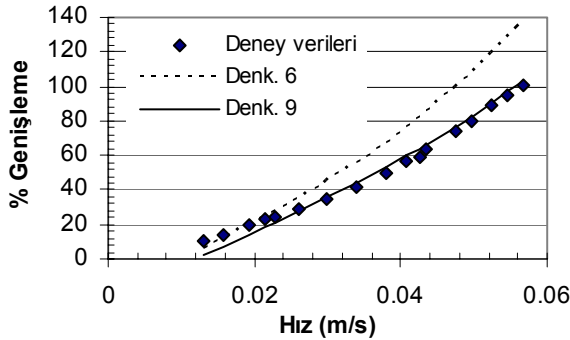




Şekil 6. 0.84-1.00 mm perlit fraksiyonunun hızla karşı çizilen yatak genişlemesi eğrisi ( $\psi=0.645$ )



Şekil 7. 1.18-1.41 mm tekrarlı kırılarak oluşturulmuş kırık cam fraksiyonunun hızla karşı çizilen yatak genişlemesi eğrisi ( $\psi=0.515$ )



Şekil 8. 1.19-1.41 mm kum fraksiyonunun hızla karşı çizilen yatak genişlemesi eğrisi ( $\psi=0.714$ )

denkleminin sabit yatak yük kayıpları verilerine uygulanması ile tespit edilmiştir. Çalışılan tüm malzemeler için bu şekilde hesaplanan küresellik değerleri, akışkanlaşma sırasındaki yatak genişlemesi tahminlerinin başarılı bir şekilde yapılmasına imkan vermiştir. Küresel olmayan malzemelere ait verilerin Reynolds sayısına karşılık çizilen sür-

tünme faktörü diyagramında, küreler için çizilen eğrinin altına düştüğü görülmüştür. Çalışılan malzemeler için bu şekil etkisinin Reynolds sayısına bağlı olduğu ve literatürde sunulandan daha kuvvetli bir bağıllık gösterdiği tespit edilmiştir. Küresel olmayan malzeme verilerinin de dahil edilmesi ile geliştirilen denklem küresel ve küresel olmayan malzemelerden oluşan yatakların akışkanlaşma sırasındaki genişlemelerinin başarılı tahminlerini sağlayacak nitelik taşımaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırmalar Projeleri Birimi tarafından, Lisansüstü Tezlerini Destekleme Programı çerçevesinde 32045 nolu proje ile desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- Akgiray, Ö., Saatçi, A., Eldem, N. ve Soyer, E., (2007). Hızlı filtrasyonda çift malzemeli filtre yatağı ve geri kazanılmış pulverize cam kullanımı ve silika kumu ile mukayesesi, TÜBİTAK MAG 104M435 Sonuç Raporu.
- Akgiray, Ö. ve Saatçi, A., (2001). A new look at filter backwash hydraulics, *Water Science and Technology: Water Supply*, **1**, 2, 65-72.
- Akgiray, Ö., Soyer, E. ve Yüksel, E., (2004). Prediction of filter expansion during backwashing, *Water Science and Technology: Water Supply*, **4**, 5-6, 131-138.
- Akkoyunlu, A., (2003). Expansion of granular water filters during backwash, *Environmental Engineering Science*, **20**, 6, 655-665.
- Aqua Test, Inc. and Stuth Co., Inc., (1995). Crushed recycled glass as a filter medium for the onsite treatment of wastewater, Clean Washington Center, Seattle, Rep. No. GI-95-5.
- ASTM, (2005). Standard test methods for sieve analysis, C92-95.
- AWWA, (1999). Water quality and treatment, a handbook of community water supplies, 5<sup>th</sup> Ed., McGraw-Hill, New York, Chapter 8.
- Blake, C.F., (1922). The resistance of packing to fluid flow, *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, **14**, 415-421.
- Carman, P.C., (1937). Fluid flow through granular beds, *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, **15**, 150-166
- Cleasby, J.L., (1973). Backwash of granular filters used in wastewater filtration, Annual Progress

- Report on EPA Project R802140, Engineering Research Institute, Iowa State University.
- Cleasby, J.L. ve Fan, K.S., (1981). Predicting fluidization and expansion of filter media, *Journal of the Environmental Engineering Division - ASCE*, **107**, 455-471.
- Couderc, J.P., (1985). *Incipient fluidization and particulate systems* in Davidson, J.H., Clift, R. ve Harrison, D., eds, *Fluidization*, 2<sup>nd</sup> Ed., Academic Press, New York.
- Dharmarajah, A.H. ve Cleasby, J.L., (1986). Predicting the expansion behavior of filter media, *Journal of the American Water Works Association*, **78**, 12, 66-76.
- Di Felice, R., (1995). Hydrodynamics of liquid fluidization, *Chemical Engineering Science*, **50**, 8, 1213-1245.
- Elliot, R.W., (2001). Evaluation of the use of crushed recycled glass as a filter medium: Part 1, *Water Engineering. and Management*, **148**, 7, 13-18.
- Epstein, N., (2003). *Liquid-solid fluidization* in Yang, W.C., eds, *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*, Marcel-Dekker, Inc. New York, Chapter 26.
- Ergun, S., (1952). Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, **48**, 2, 89-94.
- Evans, G., Dennis, P. Cousins, M. ve Campbell, R., (2002). Use of recycled crushed glass as a filtration medium in municipal potable water treatment plants, *Water Science and Technology: Water Supply*, **2**, 5-6, 9-16.
- Fair, G.M., Geyer, J.C. ve Okun, D.A. (1971) Elements of water supply and wastewater disposal, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Garside, J. ve AlDibouni, M.R., (1977). Velocity-voidage relationships for fluidization and sedimentation in solid-liquid systems, *Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development*, **16**, 2, 206-214.
- Hartman, M., Havlin, V., Svoboda, K. ve Kozan, A.P., (1989). Predicting voidage for particulate fluidization of spheres by liquids, *Chemical Engineering Science*, **44**, 11, 2770-2775.
- Loeffler, A.L.Jr., (1953). Mechanisms of hindered settling and fluidization Doctoral Dissertation, Iowa State University of Science and Technology, Ames, USA.
- Piccirillo, J.B. ve Letterman, R.D., (1997). Examination of pulverized waste recycled glass as filter media in slow sand filtration, New York State Energy Research & Development Authority, Albany, N.Y.
- Richardson, J.F. ve Meikle, R.A., (1961). Sedimentation and fluidization Part III, *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, **39**, 348-356.
- Rutledge, S.O. ve Gagnon, G.A., (2002). Assessment of crushed-recycled glass as filter media for small-scale water treatment applications, *Journal of Environmental Engineering and Science*, **1**, 5, 349-358.
- Soyer, E. ve Akgiray, Ö., (2005). Expansion of non-spherical media during fluidization, *Proceedings, IWA International Conference on Particle Separation*, 579-586, Seoul.
- Tallmadge, J.A., (1970). Packed bed pressure drop-An expansion to higher Reynolds numbers, *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, **16**, 6, 1092-1093.
- Wen, C.Y. ve Yu, Y.H., (1966). Mechanics of Fluidization, *Chemical Engineering Progress Symposium Series* 62, AIChE, NY.
- Wilhelm, R.H. ve Kwauk, M. (1948). Fluidization of solid particles, *Chemical Engineering Progress*, **44**, 3, 201-218.