

## Farklı filtre malzemeleri için temiz yatak yük kayıplarının belirlenmesi

Esra ERDİM\*, İbrahim DEMİR ve Ömer AKGİRAY

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

### Özet

Granüler filtrasyon su arıtımında yaygın olarak kullanılan bir arıtma yöntemi olup bu prosesin tasarım ve işletmesi açısından yük kayıpları büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada laboratuvar ölçekli bir filtrasyon kolonunda sık kullanılan farklı filtre malzemeleri için temiz yatak yük kayıpları belirlenmiştir. Karışık boyutta elde edilen malzemelerin eleme işlemi ile fraksiyonlarına ayrılması sonucu 6 kum, 5 perlit, 8 garnet ve 3 kırık cam fraksiyonu elde edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla küreler ile de deneysel çalışma yürütülmüştür. Deney düzeneği filtredeki hidrolik koşulların da etkisini incelemek amacıyla yüksek hızlarda da veri elde edilebilecek şekilde tasarlanmıştır. En yüksek yük kayıpları malzemenin çapına da bağlı olarak 0.1 m/sn filtre hızında 5-6 m olarak gözlenmiştir. Filtrasyon hızı ile yük kaybının lineer olmayan bir şekilde değiştiği tüm malzeme türleri ve her bir fraksiyon için teyit edilmiştir. Aynı zamanda gözeneklilik ve tanecik çapı parametrelerinin yük kaybı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yaklaşık olarak aynı tanecik çapındaki kum, perlit ve garnet yataklarında yük kaybı oluşumu karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve gözenekliliğin en düşük olduğu kum yatakta en yüksek yük kaybı elde edilmiştir. Küresellik ile ifade edilen malzeme şeklinin gözenekliliği etkileyen bir unsur olduğu ortaya konmuştur. Tane çapının yük kaybı üzerindeki etkisi kum ve garnetin farklı fraksiyonlarından oluşan kapsamlı bir aralıkta incelenmiş ve her iki malzeme türü için de tane çapı küçüldükçe yük kaybının arttığı gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Filtrasyon, granüler malzeme, temiz yatak, yük kaybı, gözeneklilik, küresellik.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Esra ERDİM. erdimes@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 sabit yatak hidroliği" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 27.01.2010 tarihinde dergiye ulaşmış, 02.03.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.10.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Clean bed head-loss of various filter media

### Extended abstract

Granular filtration is a process that is widely used for removing particulate matter from water. The granular media filtration process is affected by the properties of the filter media including grain size, bed porosity and specific surface area. Especially, determination of clean bed head loss is important in the design and operation of filters.

Clean bed head-loss of various common filter media obtained from several sources was determined in a laboratory scale filter column. The cylindrical column made of plexiglass was 4 cm in diameter and 2 m in height. It was connected to a water tank through a series of pipes and valves. The water tank was filled with tap water and served as a water reservoir for the filtration column. A constant speed centrifugal pump drew water from the tank and pumped it to the top of the column. In addition, the system allowed the water to flow upwards in the column to achieve various porosity ranges as well as to fluidize the media and bleed any residual air. In the filtration cycle the water travelled down the filter column through a bed of media and was then returned to the water tank. A cartridge filter was used to trap possible suspended solids thus ensuring the recirculated water remained clean. To measure the head-loss across the media bed as water passed through it, piezometer taps at the top and bottom of the media were connected to a water-air manometer, as well as a mercury manometer and a differential pressure transducer. Flow rate of the equipment being used determined the choice of the instrument. Flow rate was measured by an electromagnetic flow meter across the range of 0.17-17L/min. Because the density and dynamic viscosity of the fluid changes with temperature, a Pt-100 thermometer was installed on the column and temperature was monitored continuously.

Once the media had been loaded in the column, the filter was operated in the down flow mode and the flow rate was gradually increased and then decreased to a minimum value prior to head-loss measurements. As such the compaction of the media during the experiment was prevented.

The porosity of the filter bed was determined separately for each run using the weight of the filter media introduced to the column, the height of the filter

bed, the inside diameter of the filter column and the specific gravity of the media.

The media which were normally composed of different grain sizes were sieved and 6 fractions of sand, 5 fractions of perlite, 8 fractions of garnet and 3 fractions of crushed glass were obtained. Experiments were also conducted on using glass beads for comparison. Experimental set-up was designed so as to obtain data at high filtration rates in order to evaluate the hydraulic behavior in the column. The maximum head-loss was measured as 5-6 m for 0.1 m/s filter rate. Head-loss measurements were made for a minimum of three porosities for each medium. These porosities corresponded to the maximum compaction that could be obtained by directly tapping on the column, gradual shut off of backwash water and an intermediate value between these.

For each type of medium and fraction it was confirmed with literature that there exists a non-linear relationship between filter rate and head-loss. Besides, effect of porosity and grain size on head-loss was assessed. As the bed consists of uniform particles when a sieved fraction of medium is used instead of its mixed form, more robust evaluations were possible.

The sensitivity of head-loss to porosity was examined via extensive experiments. The head-loss occurrence in beds of sand, perlite and garnet of approximately same grain size were compared to each other. The highest head-loss was observed for the bed composed of sand due to the lowest porosity value. Also, experiments were conducted with approximately same size of sand and glass beads separately but at the same porosity. It was noticed that sand caused higher head-losses, which were more easily observed at higher filter rates. Different porosities were achieved by directly tapping to the column or gradual shutoff of the backwash water. Also, it was verified that grain shape defined by sphericity affected the porosity. The sphericity of crushed glass being an angular medium was found to be around 0.5. The porosity range obtained with this media showed to be higher than other filter media. To evaluate the effect of grain size on head-loss, several fractions of sand and garnet were compared and an inversely proportional relation was observed independent of the type of the medium.

**Keywords:** Filtration, granular material, clean bed, head-loss, porosity, sphericity.

## **Giriş**

Filtrasyon içme suyu arıtımında kullanılan en önemli proseslerden biri olmakla beraber filtrasyonun atıksu arıtımında kullanımı da gittikçe yaygınlaşmaktadır. Hedeflenen su kalitesinin elde edilebilmesi filtre için öngörülen yük kaybı değerlerinin aşılmaması ile mümkün olabilmektedir. Filtrelerde kullanılan malzemeye bağlı olarak değişen temiz yatak yük kayıpları filtrasyon işlemi sırasında müsaade edilebilecek maksimum yük kaybının belirlenmesi açısından önemli olduğundan tasarımda dikkate alınması gereken noktalardan biri olarak gündeme gelmektedir.

Temiz yatak yük kayıpları filtre malzemesinin büyüklüğüne, şekline, filtrasyon hızına, yatak yüksekliğine ve sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermektedir. İyi işletilen bir filtrasyon ünitesinde gözlenen toplam yük kaybı 2.4-3.0 m aralığında iken, temiz yatak yük kayıpları 0.3-0.6 m arasındadır (AWWA, 2005). Yüksek hızlarda arttığı bilinen yük kaybı değerlerinin önemli ölçüde temiz yatak yük kayıplarındaki artışın sonucu olduğu düşünülmektedir (Trussell, 2004). Son yıllarda hızlı filtrasyonda kullanımına sıkça rastlanan bir uygulama da derin yataklı filtrelerde daha büyük çaplı filtre malzemesinin kullanılması ve filtrelerin yüksek hızlarda işletilmesidir. Bu uygulamada temiz yatak yük kayıplarının önemi daha da artmaktadır.

Geçmiş yıllarda kullanılan filtrelerin nispeten sığ ve düşük filtrasyon hızlarında işletiliyor olması temiz yatak yük kayıplarının ihmal edilebilir mertebede olmasını sağlamaktaydı. Ancak günümüzde içme suyu kalitesi hedeflerinin gittikçe yükselmesi ve kullanılabilir nitelikteki su kaynaklarının azalması yüksek hızlarda işletilen derin filtrelerin kullanımını gündeme getirmiştir. Dolayısıyla temiz yatak yük kayıplarının önemi de aynı derecede artmıştır. Buna karşın literatürde konu ile ilgili kısıtlı sayıda ve çok az çeşitte malzeme ile çalışmalar yapıldığı görülmüştür.

Bu çalışmada filtrasyonda sık kullanılan malzemeler arasında yer alan kum, perlit, garnet ve kırık cam için temiz yatak yük kayıpları tespit edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla cam küreler

ile de deneysel çalışma yürütülmüştür. Aynı zamanda filtredeki hidrolik koşulların da etkisini incelemek amacıyla filtre hızları laminer akım şartlarının geçerli olduğu aralıklarla sınırlanmamış, yüksek hızlarda da veri elde edilmiştir.

## **Materyal ve yöntem**

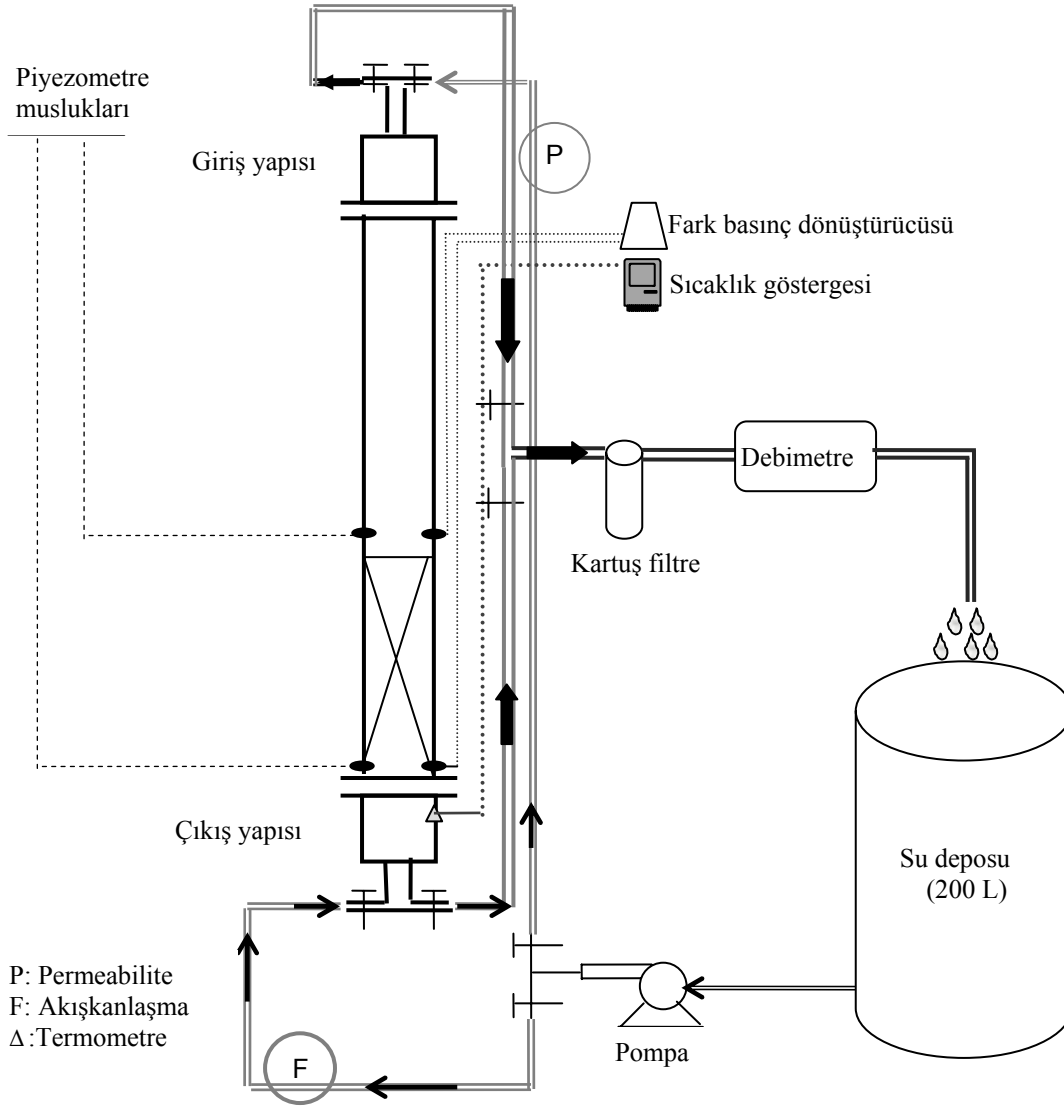
Deneysel çalışmalar pleksiglass malzemedan imal edilmiş 4 cm çapında silindirik filtrasyon kolonunda gerçekleştirilmiştir. Toplam yüksekliği 2 m olan sistem, giriş yapısı (25 cm), filtrasyon bölümü (1.5 m) ve çıkış yapısı (25 cm) olmak üzere 3 kısımdan meydana gelmektedir (Şekil 1).

Deneylerde kullanılan şebeke suyu 200 L hacmindeki polietilen bir depodan sisteme pompa ile beslenmiş ve sürekli olarak geri devrettirilmiştir. Gözlenebilecek yük kaybı değerlerine ve kullanılan filtre malzemesinin yoğunluğuna bağlı olarak 0.5 HP veya 1.5 HP gücünde pompa kullanılmıştır. Su hızının değişmemesi açısından bir frekans konvertörü ile pompa devrinin sabit kalması sağlanmıştır.

Şebeke suyunda ve sistemde bulunması muhtemel partiküler maddeleri tutabilmek amacıyla gözenek çapı 5 µ olan kartuş filtre kullanılmıştır. Sistemde basınç azalmasına bağlı olarak gözlenen hava kabarcığı problemini gidermek üzere kartuş filtre sistem çıkışına (suyun kolon içinden geçtikten sonra tekrar depoya döküldüğü nokta) yerleştirilmiştir.

Debi, ölçüm aralığı 0.17-17 L/dk. olan Euromag MC 308 model elektromanyetik debimetre ile ölçülmüştür. Kolonun çıkış yapısına monte edilen Pt-100 termometre ile su sıcaklığı sürekli olarak izlenmiştir. Yük kaybı ölçümü için piyezometre musluklarından yararlanılmıştır. Yük kaybı, Armfield W3 Akışkanlaşma-Permeabilite düzeneğindeki su manometresi, civa manometresi veya ölçüm aralığı 0-2500 mm su yüksekliği olan fark basınç ölçer cihazı ile ölçülmüştür.

Yatak gözenekliliğinin doğrulukla tespit edilebilmesi ve ölçülen yük kaybı değerlerinin güvenilirliği açısından sistemde hiç hava kabarcığı bulunmamasına büyük özen gösterilmiştir. Bu



Şekil 1. Deney düzeneği

amaçla oluşan hava kabarcıklarının malzemenin içine girmesine izin vermeden sistemden uzaklaştırılmasını sağlamak üzere filtre kolonunun giriş yapısında en tepe noktaya manuel olarak kontrol edilebilen purjör takılmıştır. Deney sırasında malzeme içine hava kabarcığı girip girmediğini kontrol edebilmek amacıyla yük kaybı verileri alınırken hız önce mümkün olan en üst sınıra kadar artırılmış, sonra tekrar azaltılmıştır. Artış ve azalış sırasında ölçülen yük kaybı değerlerinin hız-yük kaybı eğrisinden sapma göstermemesi malzeme içinde sonuçlara tesir edecek miktarda hava kabarcığı bulunmadığını göstermiştir. Her deneyin sonrasında malzeme akışkanlaştırılmış, hava kabarcığı olup olmadığı göz ile de kontrol edilmiştir.

Yatağın en gevşek olduğu durumlarda deney verisi kaydetmeye başlamadan önce su hızı kademeli olarak artırılmış ve malzemenin sıkışması sağlanmıştır. Böylece deney esnasında malzeme yüksekliğinin, dolayısıyla gözenekliliğinin, su hızındaki artışa bağlı olarak değişmesi önlenmiştir. Her malzeme ile en az 3 farklı gözeneklilik değerinde deneyler yapılmıştır.

Karışık tane boyutunda temin edilen malzemeler eleme işlemi (ASTM C136-06, 2006) ile farklı çap aralıklarına (ASTM E11:01) ayrılmış, 6 fraksiyon kum, 5 fraksiyon perlit, 8 fraksiyon garnet ve 3 fraksiyon kırık cam elde edilmiştir. Bu malzemelere ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Karışık malzemeler yerine elenmiş frak-

siyonlarla çalışmak yatağın üniform taneciklerden oluşmasını sağladığından değerlendirmelerin daha temsil edici olmasına imkan vermiştir.

Tablo 1. Farklı filtre malzemelerine ait özellikler

| Malzeme   | Elek aralığı,mm | $d_{es}$ , mm | $\rho$ , g/cm <sup>3</sup> |
|-----------|-----------------|---------------|----------------------------|
| Kum       | 1.40-1.70       | 1.631         | 2.644                      |
| Kum       | 1.18-1.40       | 1.381         | 2.630                      |
| Kum       | 1.00-1.18       | 1.108         | 2.620                      |
| Kum       | 0.85-1.00       | 0.952         | 2.617                      |
| Kum       | 0.71-0.85       | 0.841         | 2.649                      |
| Kum       | 0.60-0.71       | 0.707         | 2.603                      |
| Perlit    | 2.00-2.36       | 2.299         | 2.356                      |
| Perlit    | 1.70-2.00       | 1.974         | 2.351                      |
| Perlit    | 1.40-1.70       | 1.702         | 2.360                      |
| Perlit    | 1.18-1.40       | 1.421         | 2.364                      |
| Perlit    | 1.00-1.18       | 1.163         | 2.365                      |
| Garnet    | 1.70-2.00       | 1.834         | 4.022                      |
| Garnet    | 1.40-1.70       | 1.662         | 4.020                      |
| Garnet    | 1.18-1.40       | 1.380         | 4.023                      |
| Garnet    | 1.00-1.18       | 1.165         | 4.016                      |
| Garnet    | 0.85-1.00       | 0.971         | 3.992                      |
| Garnet    | 0.71-0.85       | 0.817         | 4.017                      |
| Garnet    | 0.60-0.71       | 0.661         | 3.994                      |
| Garnet    | 0.50-0.60       | 0.609         | 4.006                      |
| Kırık cam | 2.00-2.36       | 2.194         | 2.502                      |
| Kırık cam | 1.70-2.00       | 1.871         | 2.504                      |
| Kırık cam | 1.40-1.70       | 1.595         | 2.508                      |

Yoğunluk, malzemenin su ile yerdeğiştirmesi prensibine göre belirlenmiştir. Eşdeğer hacim çapı ( $d_{es}$ ), küresel olmayan bir taneciğin hacminin düzgün bir kürenin hacmine eşitlenmesi esasına dayanarak sayma, tartma ve hesaplama yöntemi ile tespit edilmiştir (Cleasby ve Fan, 1981).

Yatak gözenekliliği tartma metodu ile tayin edilmiştir. Bunun için malzeme filtrasyon kolonuna yerleştirilmeden önce etüvde kurutulmuş, desikatörde bekletilmiş ve kuru ağırlığı tartılarak malzeme kaybı olmaksızın kolona dikkatli bir şekilde boşaltılmıştır. Gözenekliliği ( $\varepsilon$ ) hesaplamak üzere Eşitlik (1) kullanılmıştır:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_{malzeme} / \rho_{malzeme}}{\pi D^2 L / 4} \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de;

m: malzeme ağırlığını (g),  
 $\rho$ : malzeme yoğunluğunu (g/cm<sup>3</sup>),  
D: kolon çapını (cm),  
L: yatak yüksekliğini (cm)

göstermektedir. Kum, filtre ünitelerinde en çok kullanılan ve tercih edilen malzemedir. Perlit ve garnet tabakalı filtrelerde kullanılan mineraller olup; bu malzemeler ile ilgili temiz yatak yük kayıpları oluşumu açısından literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır. Kırık cam ise şekil bakımından oldukça farklı ve filtre malzemesi olarak kullanımı son zamanlarda sıklıkla gündeme gelen bir malzeme olması nedeni ile tercih edilmiştir (Akgiray vd., 2007). Tablo 1'de belirtilen malzemelere ilave olarak nominal çapı 1 mm, eşdeğer hacim çapı 1.18 mm ve yoğunluğu 2.479 g/cm<sup>3</sup> olan cam küreler ile de deneyler mukayese amaçlı olarak yürütülmüştür.

Yatak gözenekliliğinin yük kaybı tahminlerini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir (Ergun, 1952; Bai vd., 2009; Nemeç ve Levec, 2005). Söz konusu ilişkiyi bu çalışmada kullanılan malzemeler için inceleyebilmek amacıyla deney yapılan her malzeme için en az 3 farklı gözeneklilik değeri elde edilmeye çalışılmıştır. Her 3 oluşum için de malzeme akışkanlaştırıldıktan sonra geri yıkama suyu vanası yavaş yavaş kapatılarak malzemenin sakin bir şekilde çökmesi sağlanmıştır. En büyük gözeneklilik değerleri bu şekilde elde edilmiştir ( $\varepsilon_1$ ). En düşük gözeneklilik için kolonun malzeme bulunan kısmına çevresi boyunca çeşitli noktalardan hafif şekilde vurarak malzemenin mümkün olan en düşük seviyeye gelmesi sağlanmıştır ( $\varepsilon_2$ ). Aradaki bir gözeneklilik değeri ise bu iki sınır durum arasında bir yükseklik oluşturarak elde edilmiştir ( $\varepsilon_3$ ). Bu değerler Tablo 2'de verilmiştir.

En düşük gözeneklilik değerleri beklendiği üzere küreler ile elde edilmiştir. Diğer malzemeler için bu sıralama kum < garnet  $\approx$  perlit < kırık cam şeklinde oluşmuştur. Malzeme şekli küresellikten uzaklaştıkça yatak gözenekliliğinin arttığı bilinmektedir (ASCE, AWWA, 2005). Kum, perlit, garnet, kırık cam gibi düzgün şekilli olmayan taneciklerin yüzey alanları kesin bir biçimde belirlenemediğinden bu tür malzemelerin

küresellik katsayısı ( $\psi$ ) doğrudan hesaplanamamaktadır. Bu amaçla en sık kullanılan yöntem sabit yatak yük kayıplarının ölçülmesi ve Ergun denklemi ile küresellik katsayısının dolaylı olarak belirlenmesidir. Söz konusu metotla her fraksiyon için elde edilmiş küresellik katsayısı değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir. En düşük küresellik katsayısının kırık cam şeklindeki malzeme için tespit edilmiş olması ve bu malzemeden oluşan yatakta en büyük gözeneklilik değerlerinin elde edilmesi literatürdeki bilgileri destekler niteliktedir (Akgiray vd., 2007).

Tablo 2. Malzeme fraksiyonları için gözeneklilik aralıkları

| Malzeme   | Elek aralığı, mm | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_2$ | $\varepsilon_3$ |
|-----------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Kum       | 1.40-1.70        | 0.41            | 0.38            | 0.39            |
| Kum       | 1.18-1.40        | 0.42            | 0.38            | 0.41            |
| Kum       | 1.00-1.18        | 0.45            | 0.41            | 0.43            |
| Kum       | 0.85-1.00        | 0.44            | 0.40            | 0.41            |
| Kum       | 0.60-0.71        | 0.47            | 0.42            | 0.45            |
| Perlit    | 2.00-2.36        | 0.51            | 0.46            | 0.48            |
| Perlit    | 1.70-2.00        | 0.48            | 0.43            | 0.46            |
| Perlit    | 1.40-1.70        | 0.48            | 0.43            | 0.46            |
| Perlit    | 1.18-1.40        | 0.47            | 0.42            | 0.45            |
| Perlit    | 1.00-1.18        | 0.46            | 0.42            | 0.44            |
| Garnet    | 1.70-2.00        | 0.49            | 0.45            | 0.47            |
| Garnet    | 1.40-1.70        | 0.50            | 0.46            | 0.47            |
| Garnet    | 1.18-1.40        | 0.49            | 0.45            | 0.47            |
| Garnet    | 1.00-1.18        | 0.50            | 0.46            | 0.48            |
| Garnet    | 0.85-1.00        | 0.49            | 0.45            | 0.48            |
| Garnet    | 0.71-0.85        | 0.50            | 0.46            | 0.48            |
| Garnet    | 0.60-0.71        | 0.48            | 0.45            | 0.47            |
| Garnet    | 0.50-0.60        | 0.50            | 0.46            | 0.48            |
| Kırık cam | 2.00-2.36        | 0.51            | 0.45            | 0.50            |
| Kırık cam | 1.70-2.00        | 0.52            | 0.48            | 0.50            |
| Kırık cam | 1.40-1.70        | 0.53            | 0.49            | 0.51            |
| Küre      | $d_{e\%}$ : 1.18 | 0.40            | 0.37            | 0.38            |

Kum ve kırık cam için tane çapı küçüldükçe gözenekliliğin arttığı görülmüştür. Buna karşın perlit için bu durumun tam tersi gözlenmiştir. En geniş fraksiyon aralığına sahip olan garnet için ise gözenekliliğin tane çapı ile önemli ölçüde değişmediği tespit edilmiştir.

### DeneySEL verilerin değerlendirilmesi

Filtrasyon hızı, tanecik çapı ve yatak gözenekliliği yük kaybını etkileyen başlıca faktörler ara-

sında yer almaktadır. Bu çalışmada farklı filtre malzemeleri ve fraksiyonları kullanılarak yük kaybının bu değişkenlerle olan ilişkisi değerlendirilmiştir.

Tablo 3. Küresellik katsayısı ( $\psi$ )

| Malzeme   | Elek aralığı, mm | $d_{e\%}$ , mm | $\psi$ |
|-----------|------------------|----------------|--------|
| Kum       | 1.40-1.70        | 1.63           | 0.72   |
| Kum       | 1.18-1.40        | 1.38           | 0.76   |
| Kum       | 1.00-1.18        | 1.10           | 0.69   |
| Kum       | 0.85-1.00        | 0.95           | 0.70   |
| Kum       | 0.71-0.85        | 0.84           | 0.69   |
| Kum       | 0.60-0.71        | 0.71           | 0.67   |
| Perlit    | 2.00-2.36        | 2.30           | 0.59   |
| Perlit    | 1.70-2.00        | 1.97           | 0.65   |
| Perlit    | 1.40-1.70        | 1.70           | 0.63   |
| Perlit    | 1.18-1.40        | 1.42           | 0.65   |
| Perlit    | 1.00-1.18        | 1.16           | 0.70   |
| Garnet    | 1.70-2.00        | 1.83           | 0.65   |
| Garnet    | 1.40-1.70        | 1.66           | 0.60   |
| Garnet    | 1.18-1.40        | 1.38           | 0.62   |
| Garnet    | 1.00-1.18        | 1.16           | 0.63   |
| Garnet    | 0.85-1.00        | 0.97           | 0.65   |
| Garnet    | 0.71-0.85        | 0.82           | 0.65   |
| Garnet    | 0.60-0.71        | 0.66           | 0.69   |
| Garnet    | 0.50-0.60        | 0.61           | 0.64   |
| Kırık cam | 2.00-2.36        | 2.19           | 0.52   |
| Kırık cam | 1.70-2.00        | 1.87           | 0.52   |
| Kırık cam | 1.40-1.70        | 1.60           | 0.54   |

### Hız

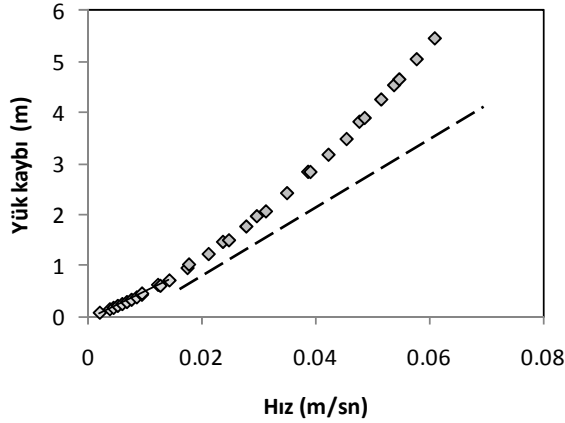
Laminer akım rejiminde yük kaybı hız teriminin ( $v$ ) 1. dereceden kuvveti ile doğru orantılı iken, atalet kuvvetlerinin etkili olmaya başladığı koşullarda  $v^2$  terimi önem kazanmaktadır.

1.00-1.18 mm kum fraksiyonu için hız ile yük kaybının ilişkisi Şekil 2'de verilmiştir. Tüm malzeme çeşitleri ve fraksiyonları için yük kaybının hız ile lineer olmayan bir şekilde değiştiği görülmüştür.

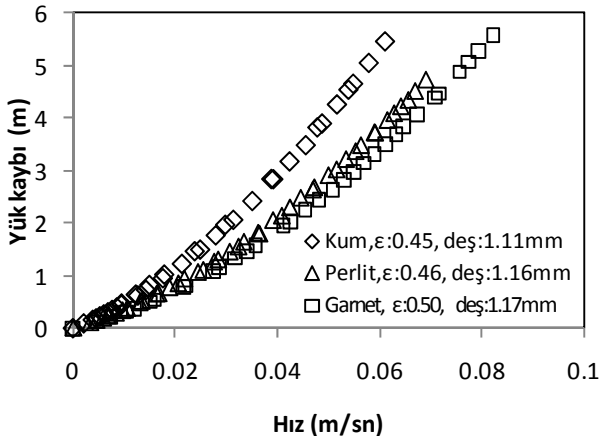
### Yatak gözenekliliği

Gözeneklilik ( $\varepsilon$ ) yük kaybını tahmin etmek üzere önerilen denklemlerde yer alan çok önemli bir değişken olup matematiksel modellerin çoğu gözeneklilik teriminin doğru kuvvetini bulmak üzerine kurulmuştur. Şekil 3, yaklaşık olarak aynı boyuttaki kum, perlit ve garnet için yük

kaybının hız ile değişimini göstermektedir. Her 3 malzeme için de gözeneklilik değerinin en yüksek olduğu deney verileri kullanılmıştır. Yük kaybı oluşumu açısından incelendiğinde aynı filtre hızında en düşük gözenekliliğe sahip kum yatakta en çok yük kaybı olduğu görülmüştür.



Şekil 2. Yük kaybı hız ilişkisi

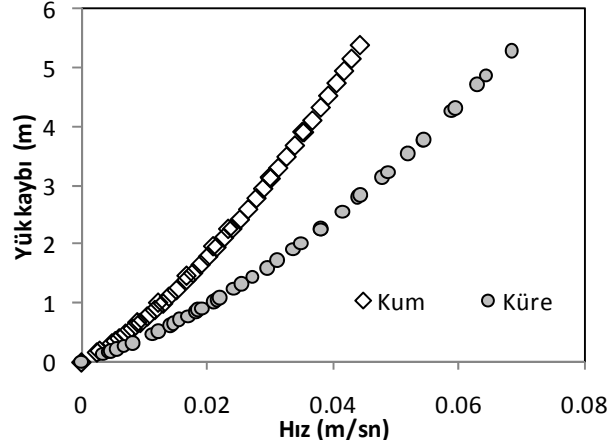


Şekil 3. Farklı filtre malzemeleri için yük kaybı- hız ilişkisi

Lineer olmayan yük kaybı oluşumuna bağlı olarak artan hızlarla birlikte aradaki farkın gittikçe açıldığı görülmektedir. Perlit ve garnet yataklarının gözeneklilik değerleri (sırasıyla 0.46 ve 0.50) arasında önemli bir fark bulunmasına rağmen birbirine çok yakın seyreden yük kaybı değerleri bu oluşumda küreselliğin etkisinin de önemli olabileceğini göstermektedir.

Birbirine yakın tane büyüklüğü değerlerine sahip kum ve kürelerden oluşmuş yataklar için

aynı gözeneklilik değerinde, kumun çok daha yüksek yük kayıpları meydana getirdiği görülmüştür (Şekil 4). Kumun küreden daha düşük küresellik değerine sahip olması ( $\psi \approx 0.70$ ) ya da kumun yüzey pürüzlülüğü bu durumun olası sebepleri arasında sayılabilir (Chang vd.,1999).



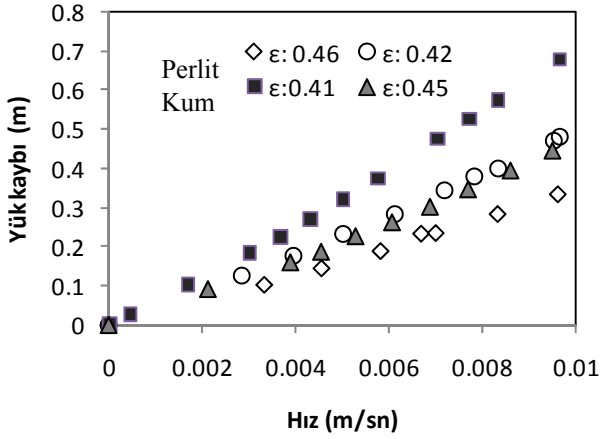
Şekil 4. Aynı gözeneklilik değerinde kum ve küre için yük kaybı oluşumu (küre-  $d_{\epsilon\dot{s}}$ : 1.18 mm,  $\epsilon$ : 0.4; kum- $d_{\epsilon\dot{s}}$ : 1.10 mm,  $\epsilon$ : 0.4)

Şekil 5, 1.0-1.18 mm fraksiyonundaki kum ve perlit için iki farklı gözeneklilik değerinde elde edilen yük kaybı verilerini göstermektedir. Her iki malzeme için de 0.01 m/sn hızda gözeneklilik değerindeki %4'lük fark yük kaybına %30 olarak yansımıştır. Bu sonuç filtre yataklarının gerek tasarımı gerek işletimi sırasında gözenekliliğin çok hassas bir şekilde belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Aynı malzemeler ile yüksek hız değerlerine de çıkılmış ve 0.02 m/sn değerinden sonra yük kaybına etkiyen farkın daha da arttığı görülmüştür.

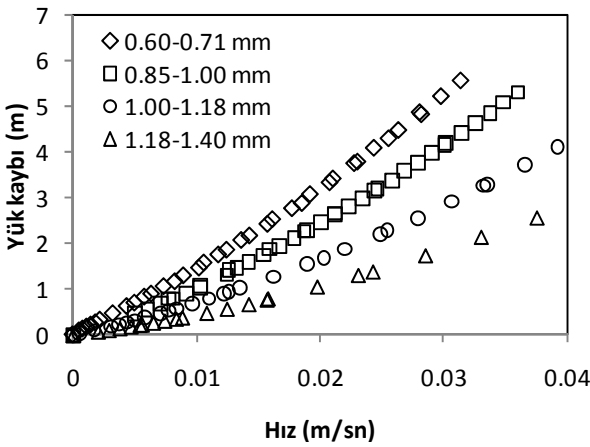
### Tane çapı

Gözeneklilik gibi tane çapı da yük kaybını doğrudan etkileyen parametreler arasında yer almaktadır. Aynı malzemenin farklı fraksiyonları için elde edilen yük kaybı verileri incelenerek bu etki detaylı bir şekilde ortaya konmuştur.

Farklı fraksiyonlarda elde edilmiş kum için tane çapının yük kaybına olan etkisi Şekil 6'da açıkça görülmektedir. Tane çapının etkisini diğer değişkenlerden bağımsız olarak değerlendirebilmek için tüm deneylerin aynı gözeneklilik değerinde yürütülmesine dikkat edilmiştir ( $\epsilon$ : 0.41).



Şekil 5. Gözeneklilik-yük kaybı ilişkisi



Şekil 6. Tanecik çapının yük kaybı üzerindeki etkisi (kum)

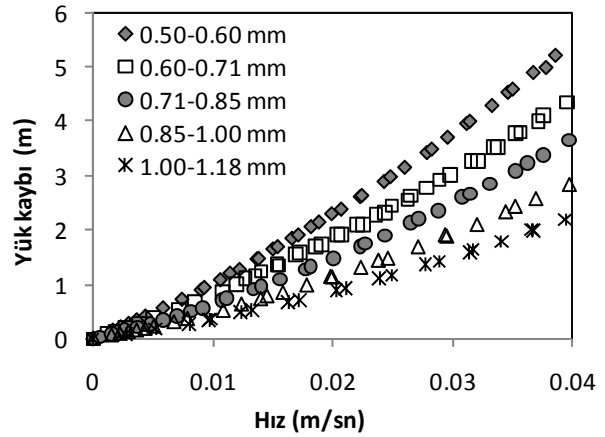
Tane çapı küçüldükçe aynı hıza karşı gelen yük kaybının arttığı görülmektedir. Bu bulguyu malzeme bazında inceleyebilmek için benzer bir grafik garnet fraksiyonları için hazırlanmıştır (Şekil 7). Yine bu malzeme için de tüm deneyler aynı gözeneklilik değerinde yürütülmüştür ( $\epsilon$ : 0.48). Kum ile elde edilen sonuçlarla uyum sağlayacak şekilde garnet fraksiyonlarının da taneçik çapı küçüldükçe yüksek yük kayıpları oluşturduğu belirlenmiştir.

Bu bulgu filtre yataklarında yük kaybını tahmin etmek üzere önerilen modeller için malzeme çapının önemini ortaya koymaktadır.

## Sonuçlar

Filtrasyon ünitelerinde temiz yatak yük kayıplarının belirlenmesi gerek tasarım gerek işletme

açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada farklı filtre malzemeleri kullanılarak temiz yatak yük kayıpları tespit edilmiş, aynı zamanda hız, gözeneklilik, tane çapı parametrelerinin yük kaybı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Her bir malzeme çeşidi ve fraksiyonu için yük kaybı ile hız arasında lineer olmayan bir ilişkinin varlığı ortaya konmuş ve bu konudaki mevcut literatür bilgileri teyit edilmiştir. Yük kaybının gözenekliliğe karşı çok hassas olduğu belirlenmiştir. Filtre yatağının sıkıştırılması ile farklı gözeneklilik değerlerinin elde edilebileceği görülmüştür. Aynı taneçik çapına sahip malzemelerden oluşan yataklarda en yüksek yük kaybının malzeme cinsinden bağımsız olarak gözenekliliğin en düşük olduğu durumda olduğu gözlenmiştir. Ayrıca gözenekliliğin malzeme şekli (küresellik) ile olan ilişkisi de ortaya konmuştur. Gözenekliliğin doğru ve güvenilir bir şekilde belirlenmesi gerektiği, aksi takdirde yük kaybı tahminlerinde büyük hatalar oluşabileceği sonucuna varılmıştır. Tane çapının yük kaybı üzerindeki etkisi farklı malzemeler ve fraksiyonlardan oluşan geniş bir matris çerçevesince incelenmiş ve tane çapı küçüldükçe yük kaybının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 7. Tanecik çapının yük kaybı üzerindeki etkisi (garnet)

## Teşekkür

Bu çalışma İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi- Lisansüstü Tezlerini Destekleme Programı tarafından desteklenen "Küresel olmayan malzemelerin sabit yatak hidroligi" projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.



## Kaynaklar

- Akçiray, 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, Sonuç Raporu, TÜBİTAK MAG 104M435.
- ASTM C136-06, (2004). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, ASTM, PA, USA.
- ASTM E11-01, (2004). Standard test methods for sieve analysis, ASTM, PA, USA.
- AWWA, ASCE, (2005). *Water treatment plant design*, 4<sup>th</sup> edition, McGraw Hill Handbooks, NY.
- Bai, H., Theuerkauf, J., Gillis, P. ve Witt, P., (2009). A coupled DEM and CFD simulation of flow field and pressure drop in fixed bed reactor with randomly packed catalyst particles, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **48**, 8, 4060-4074.
- Chang, R.M., Trussell, R., Martinez, J.G. ve Delaney, C.K., (1999). Laboratory studies on the clean bed headloss of filter media, *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua*, **48**, 4, 137-145.
- Cleasby, J.L. ve Fan, K., (1981). Predicting fluidization and expansion of filter media, *Journal of Environmental Engineering*, **107**, 455-471.
- Ergun, S., (1952). Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, **48**, 2, 89-94.
- Nemec, D. ve Levec, J., (2005). Flow through packed bed reactors: 1. Single-phase flow, *Chemical Engineering Science*, **60**, 6947-6957.
- 
- Trussell, R., (2004). Deep bed filters and high rate service. <http://www.trusselltech.com>, (20.10.2009)