

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL OLMAYAN MALZEMELERİN SABİT YATAK HİDROLİĞİ

**DOKTORA TEZİ
Esra ERDİM**

Anabilim Dalı : Çevre Mühendisliği

Programı : Çevre Bilimleri ve Mühendisliği

OCAK 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL OLMAYAN MALZEMELERİN SABİT YATAK HİDROLİĞİ

**DOKTORA TEZİ
Esra ERDİM
(501032703)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 Aralık 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Ocak 2010

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. İbrahim DEMİR (İTÜ)
Eş Danışman : Prof. Dr. Ömer AKGİRAY (MÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mustafa TURAN (İTÜ)
Prof. Dr. Sedat KABDAŞLI (İTÜ)
Doç. Dr. Atilla AKKOYUNLU (BÜ)
Doç. Dr. Ayşe ÇEÇEN ERBİL (İTÜ)
Prof. Dr. Ahmet METE SAATÇİ (MÜ)**

OCAK 2010

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında fikir ve yardımlarını esirgemeyen, desteklerini her zaman yanımda hissettiğim değerli hocalarım ve tez danışmanlarım Doç. Dr. İbrahim DEMİR ve Prof. Dr. Ömer AKGİRAY'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli katkılarından dolayı hocalarım Doç. Dr. Atilla AKKOYUNLU, Prof. Dr. Sedat KABDAŞLI, Prof. Dr. Mustafa TURAN ve Prof. Dr. Cumali KINACI'ya,

Her zaman ve her koşulda hep yanımda bana destek olan arkadaşım, kardeşim Dr. Elif SOYER'e,

Deneysel çalışmalarımıdaki yardımları ve manevi desteğinden ötürü Dr. Nursen ÖZ ELDEM'e,

Çalışmamda kullandığım malzemelerin üretimini yapmayı kabul eden ve her türlü kolaylığı gösteren Murat Kalıp ve Plastik Tic. Ltd. Şti. yetkilileri Şaban ve Murat SOHTORİK'e, kendileri ile tanışmamı sağlayan aile dostumuz ve büyüğümüz Ali KEÇECİ'ye

Karşılaştığım teknik sorunların giderilmesinde yardımlarını esirgemeyen İTÜ İnşaat Fakültesi, Fakülte Teknolojik Alt Yapı ve Elektrik İşleri Amiri Sefa SÖZBİR ve Teknik Personel Erol ERTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Büyük bir özveri ile beni yetiştirip bugünlere getiren, destek ve yardımlarını her daim sürdüren sevgili annem ve babama, her zaman olduğu gibi bu çalışma sürecinde de sabır ve anlayışını esirgemeyen sevgili eşime, kendisinden sakınmak durumunda kaldığım vakitlere rağmen anlayış gösteren canım kızıma, sevgili kardeşime ve kızımın bakımı için büyük emek gösteren Kezban Akbulut'a sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2010

Esra Erdim
(Çevre Y. Müh.)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Konunun Anlam ve Önemi.....	1
1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
2. GÖZENEKLİ ORTAM	5
2.1 Taneciklerin Karakterizasyonu.....	6
2.1.1 Tanecik yoğunluğu.....	6
2.1.2 Tanecik büyüklüğünün tanımlanması.....	7
2.1.2.1 Eşdeğer hacim çapı ($d_{eş}$).....	7
2.1.2.2 Yüzey çapı (d_s).....	8
2.1.2.3 Yüzey-hacim çapı (d_{sv}).....	8
2.1.2.4 Elek çapı (d_A).....	8
2.1.2.5 Stokes çapı (d_{st}).....	8
2.1.2.6 Serbest çökme çapı (d_f).....	8
2.1.2.7 Direnç çapı (d_D).....	9
2.1.2.8 Çevre çapı (d_c).....	9
2.1.2.9 Projeksiyon alanı çapı (d_a).....	9
2.1.2.10 Feret çapı (d_F).....	9
2.1.2.11 Martin çapı (d_M).....	9
2.1.3 Tanecik şeklinin tanımlanması.....	10
2.1.3.1 Küresellik.....	11
2.1.3.2 Heywood şekil faktörü.....	12
2.1.4 Tanecik boyut ve şeklinin doğrudan belirlenmesi.....	12
2.1.4.1 Elek analizi.....	12
2.2 Taneciklerin Yatak İçinde Yerleşimi.....	14
2.2.1 Küresel taneciklerin yerleşimi.....	15
2.2.1.1 Küresel taneciklerin düzenli yerleşimi.....	15
2.2.1.2 Küresel taneciklerin rasgele yerleşimi.....	16
2.2.2 Küresel olmayan taneciklerin yerleşimi.....	18
2.3 Küresel Olmayan Taneciklerin Özellikleri.....	20
2.4 Küresel Olmayan Taneciklerden Oluşan Yataklarda Duvar Etkisi.....	23
2.5 Gözenekli Ortamda Akım Rejimleri.....	26
2.6 Sabit Yataklarda Akış.....	26
2.6.1 Kapiler tüp modeli.....	30
2.6.2 Ergun denklemi.....	33
3. MATERYAL ve METOT	37
3.1 Permeabilite kolonu- 4 cm.çapında.....	37
3.2 Permeabilite kolonu (10,04 cm çapında).....	38

3.3	Deneysel Çalışma Sistemi.....	39
3.4	İzlenen Parametreler.....	39
3.4.1	Debi.....	39
3.4.2	Sıcaklık.....	41
3.4.3	Yük kaybı.....	42
3.5	Permeabilite Deneşinin Yürütölüşü ve Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar.....	45
3.6	Malzemeler.....	48
3.6.1	Küresel malzemeler.....	48
3.6.2	Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler.....	49
3.6.3	Düştün şekilli olmayan malzemeler (Doğal malzemeler).....	53
3.7	Yoğunluk Ölçümü.....	55
3.8	Malzeme Çapının Belirlenmesi.....	56
3.8.1	Mikrometre ile çap tayini.....	56
3.8.2	Eşdeğer hacim çapı.....	59
3.9	Gözeneklilik.....	61
3.10	Küresellik Katsayısı.....	62
4.	DENEYSEL ÇALIŞMA VERİLERİ	65
4.1	Küresel Malzemelere Ait Veriler.....	65
4.2	Küresel Olmayan Düştün Şekilli Malzemelere Ait Veriler.....	65
4.3	Düştün Şekilli Olmayan Malzemelere (Doğal malzemeler) ait Veriler...	69
5.	DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	71
5.1	Küresel Malzemeler.....	72
5.2	Küresel Olmayan Düştün Şekilli Malzemeler.....	78
5.3	Düştün Şekilli Olmayan Malzemeler.....	97
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER	107
	KAYNAKLAR	109
	EKLER	117
	EK A	119
	EK B	127
	EK C	141
	ÖZGEÇMİŞ	149

KISALTMALAR

A	: Nemec tarafından Ergun denklemindeki k_1 için önerilen katsayı
B	: Nemec tarafından Ergun denklemindeki k_2 için önerilen katsayı
c_1	: Blake-Kozeny sabiti
c_2	: Burke-Plummer sabiti
d_a	: Projeksiyon alanı çapı
d_A	: Elek çapı
d_c	: Çevre çapı
$d_{dış}$: Halka şeklindeki malzemenin dış çapı
d_D	: Direnç çapı
d_{es}-deneysel	: Sayma-tartma yöntemi ile bulunan eşdeğer hacim çapı
d_{es}-teorik	: Teorik formüller ile bulunan eşdeğer hacim çapı
d_f	: Serbest çökme çapı
$d_{iç}$: Halka şeklindeki malzemenin iç çapı
d_M	: Martin çapı
d_p	: Tanecik çapı
d_{st}	: Stokes çapı
d_{sv}	: Yüzey-hacim çapı
D	: Kolon çapı
D_c	: Projeksiyon alanını çevreleyen en küçük daire çapı
f_1	: Foumeny (1996) tarafından önerilen denklemde laminer terim içinde yer alan katsayı
f_2	: Foumeny (1996) tarafından önerilen denklemde türbülanslı terim içinde yer alan katsayı
f_p	: Montillet (2007) tarafından tanımlanan sürtünme faktörü ($\frac{\Delta P (\psi d_{es})}{L \rho V^2}$)
f_v	: Ergun (1952a) tarafından tanımlanan sürtünme faktörü ($\frac{\Delta P g (\psi d_{es})^2 \varepsilon^3}{L \mu V (1-\varepsilon)^2}$)
F	: Birim hacimdeki direnç kuvveti
g	: Yerçekimi ivmesi
h_L	: Yük kaybı
HR	: Hausner oranı
k	: Hidrolik iletkenlik katsayısı
k_1	: Ergun denkleminde laminer terim için önerilen katsayı, 150
k_2	: Ergun denkleminde türbülanslı terim için önerilen katsayı, 1,75
k_1'	: Deneysel veriler ile laminer terim için bulunan katsayı
k_2'	: Deneysel veriler ile türbülanslı terim için bulunan katsayı
K	: Spesifik iletkenlik
L	: Yatak yüksekliği
M_p	: Tanecik ağırlığı
P	: Atmosferik basınç
Q	: Debi
R	: Yarıçap
Re	: Reynolds sayısı ($(\rho(d_{es} \cdot \psi)V/\mu)$)
Re_m	: Modifiye Reynolds sayısı ($(\rho(d_{es} \cdot \psi)V/\mu)/(1-\varepsilon)$)
R_h	: Hidrolik yarıçap
S_p	: Tanecik yüzey alanı

S_v	: Özgöl yüzey
T	: Sıcaklık
v_t	: Nihai çökme hızı
V	: Yüzeysel hız (Q/A)
V₀	: Boşluklar arası hız (V/ε)
V_p	: Tanecik hacmi
μ	: Akışkanın dinamik viskozitesi
ρ	: Akışkanın yoğunluğu
ρ_p	: Tanecik yoğunluğu
ΔP	: Basınç kaybı
ψ	: Küresellik katsayısı
τ	: Kıvrımlılık
ε	: Boşluk oranı, gözeneklilik
β	: Gözenek çapının tanecikler arasındaki ortalama mesafeye oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Tanecik büyüklüğünü belirlemek için yaygın olarak kullanılan enstrümanlar.....	10
Çizelge 2.2 : Katalistler için önerilen eşdeğer çap ifadeleri (Rase, 1990).....	10
Çizelge 2.3 : Düzgün şekilli malzemeler için küresellik değerleri.....	11
Çizelge 2.4 : Küresel olmayan malzemeler için küresellik değerleri.....	12
Çizelge 2.5 : Standart elekler ve elek açıklıkları.....	14
Çizelge 2.6 : Tek boyutlu küreler için rasgele yerleşim türleri ve ilgili yapısal özellikler.....	17
Çizelge 2.7 : Küresel olmayan malzemeler için yatak gözenekliliği tahmini (Coulson, 1949).....	19
Çizelge 2.8 : Üniform çaplı taneciklerden (>500µm) oluşan rasgele yerleşmiş sabit yatakların gözeneklilik değeri (Brown, 1966).....	20
Çizelge 2.9 : Farklı şekildeki katalistlerden meydana gelmiş yataklara ait gözeneklilik değerleri (Lywood, 1996).....	23
Çizelge 3.1 : Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler.....	50
Çizelge 3.2 : Amerikan Standart Elek Serileri - ASTM E11:01.....	55
Çizelge 3.3 : Yoğunluk hesaplama örneği.....	57
Çizelge 3.4 : Çalışmada kullanılan kürelerin mikrometre ile belirlenen çap değerleri.....	58
Çizelge 3.5 : Düzgün şekilli malzemelerin mikrometre ile belirlenen boyutları.....	59
Çizelge 3.6 : Eşdeğer hacim çapı hesaplama örneği ($d_{eş}$ -deneysel).....	60
Çizelge 3.7 : Halka şeklindeki malzemenin eşdeğer hacim çapının ($d_{eş}$ -teorik) belirlenmesi.....	61
Çizelge 3.8 : Halka-1 malzemesi için küresellik katsayısının hesaplanması.....	64
Çizelge 4.1 : Küresel malzemelere ait özellikler.....	65
Çizelge 4.2 : Küresel olmayan düzgün şekilli malzemelere ait özellikler ve deney şartları.....	66
Çizelge 4.3 : Düzgün şekilli malzemeler için $d_{eş}$ -deneysel ve $d_{eş}$ -teorik arasındaki fark.....	69
Çizelge 4.4 : Düzgün şekilli olmayan malzemelere ait özellikler.....	69
Çizelge 5.1 : Sabit yataklarda yük kaybının tahmini için kullanılan alternatif modeller.....	77
Çizelge 5.2 : Küreler için yük kaybında ağırlıklı ortalama % hata değerleri.....	79
Çizelge 5.3 : Düzgün şekilli malzemeler için D/d oranları.....	81
Çizelge 5.4 : Halka şeklindeki malzemelere ait geometrik oranlar.....	83
Çizelge 5.5 : Halka şeklindeki malzemeler için Nemec ve Levec tarafından önerildiği şekilde belirlenmiş A ve B katsayıları.....	84
Çizelge 5.6 : Silindir şeklindeki malzemeler için h/d oranları ile Nemec ve Levec tarafından uyarlanmış A ve B katsayıları.....	88
Çizelge 5.7 : Silindir şeklindeki malzemeler için Foumeny ve diğ. tarafından uyarlanmış katsayılar.....	89
Çizelge 5.8 : Farklı yöntemlerle hesaplanan eşdeğer çap ve buna bağlı yük kaybında tahmini % hata değerlerinin karşılaştırılması.....	95
Çizelge 5.9 : Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler için yük kaybında	96

ağırlıklı ortalama % hata değerleri.....	102
Çizelge 5.10 : Farklı filtre malzemeleri ve fraksiyonlar için küresellik katsayısı.....	102
Çizelge 5.11 : Kum, perlit, garnet ve kırık cam fraksiyonları için hesaplanan k_1 ve k_2 katsayıları.....	103
Çizelge 5.12 : Farklı filtre malzemeleri için önerilen k_1 ve k_2 katsayıları (Trussell ve Chang, 1999).....	103
Çizelge 5.13 : Kum, perlit, garnet ve kırık cam fraksiyonlarına ait farklı çap gösterimleri.....	104
Çizelge 5.14 : Filtre malzemeleri için farklı çap tanımları ile bulunan k_1 ve k_2 katsayıları.....	105

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Gözenekli ortam.....	5
Şekil 2.2 : Tanecik iskelet yoğunluğu.....	7
Şekil 2.3 : Projeksiyon alanı, Feret ve Martin çapının şematik gösterimi	9
Şekil 2.4 : Granülometri eğrisi.....	13
Şekil 2.5 : Rombohedral (solda) ve kübik (sağda) yerleşimin şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.6 : Küresel olmayan taneciklerden oluşan sabit yataklarda yatak gözenekliliğinin cidardan uzaklığın bir fonksiyonu olarak yersel değişimi (Roblee ve diğ., 1958).....	24
Şekil 2.7 : Farklı silindirik şekillerden oluşan gelişigüzel sıkı yerleşmiş yataklarda duvar etkisi değişimi ve farklı modellerle karşılaştırılması (Nemec, 2003).....	25
Şekil 2.8 : Darcy'nin kullandığı deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	28
Şekil 2.9 : Kapiler tüp modeli.....	31
Şekil 3.1 : Permeabilite kolonu (4 cm.)	37
Şekil 3.2 : Flanş yapısı, silikon conta ve elekler.....	38
Şekil 3.3 : Permeabilite kolonu (10,04 cm)	38
Şekil 3.4 : Deney sisteminin şematik gösterimi.....	40
Şekil 3.5 : Elektromanyetik debimetre (DN 10)	41
Şekil 3.6 : Elektromanyetik debimetre (DN 6)	41
Şekil 3.7 : Pt-100 termometre.....	42
Şekil 3.8 : Sıcaklık göstergesi.....	42
Şekil 3.9 : Piyezometre musluğu.....	43
Şekil 3.10 : 4 cm. lik ve 10 cm lik kolonda piyezometre musluklarının yerleşimi	43
Şekil 3.11 : Armfield W3 Akışkanlaşma-Permeabilite düzeneğindeki su ve civa manometresi.....	44
Şekil 3.12 : Fark basınç ölçer.....	44
Şekil 3.13 : Malzemenin kolona yerleştirilmesi için kullanılan düzenek.....	45
Şekil 3.14 : Manuel olarak kullanılan purjör.....	47
Şekil 3.15 : Otomatik purjör sistemi.....	47
Şekil 3.16 : Konik hale dönüştürülmüş giriş yapısı.....	48
Şekil 3.17 : 1-2-3-4-5 mm çaplı cam küreler.....	49
Şekil 3.18 : 6-7-8-10 mm çaplı cam küreler.....	49
Şekil 3.19 : Plastik enjeksiyon makinası.....	51
Şekil 3.20 : Halka şekline ait kalıp seti.....	51
Şekil 3.21 : Küp şekline ait kalıp seti.....	52
Şekil 3.22 : Üçgen prizma şekline ait kalıp seti.....	52
Şekil 3.23 : Hatalı üretilmiş malzemeler.....	52
Şekil 3.24 : Kum için uygulanan ön işlemler: Yıkama ve kurutma.....	53
Şekil 3.25 : Perlit minerali içindeki safsızlıkların oluşturduğu tabaka.....	54
Şekil 3.26 : Elek sarsıcı cihaz (Retsch AS 200).....	55
Şekil 3.27 : Mikrometre.....	58
Şekil 3.28 : Eşdeğer hacim çapının belirlenmesi.....	59
Şekil 5.1 : 1,18 mm çaplı kürelerden oluşan 0,37 gözeneklilik değerindeki sabit yatağa ait hız-yük kaybı eğrisi.....	73

Şekil 5.2 :	Farklı boyutlardaki kürelere ait yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması (1356 adet deney verisi).....	75
Şekil 5.3 :	Farklı D/d oranlarında deneysel ölçüm sonuçları ile Ergun denklemi arasındaki yük kaybı hatası (%).....	76
Şekil 5.4 :	Üçgen prizma şeklinde malzemeden oluşan sabit yatakta hız-yük kaybı eğrisi.....	81
Şekil 5.5 :	Halka şeklinde malzemeye ait yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.....	82
Şekil 5.6 :	Halka-2 malzemesine ait hız-yük kaybı değişimi.....	85
Şekil 5.7 :	Küp şeklinde malzemeye ait yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.8 :	Üçgen prizma şeklinde malzemeye ait yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.....	86
Şekil 5.9 :	Silindir şeklinde malzemeye ait yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.....	87
Şekil 5.10 :	Dikdörtgenler prizması şeklinde malzemeye ait yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.....	89
Şekil 5.11 :	Tüm düzgün şekilli malzemeler için yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.....	91
Şekil 5.12 :	Yük kaybı tahminlerindeki hatanın teorik küresellikle değişimi.....	92
Şekil 5.13 :	Deneysel ve teorik küresellik katsayısı arasındaki ilişki.....	92
Şekil 5.14 :	Farklı küresellik katsayısına sahip malzemeler için belirlenen k_1 katsayısı.....	93
Şekil 5.15 :	Farklı küresellik katsayısına sahip malzemeler için belirlenen k_2 katsayısı.	94
Şekil 5.16 :	1,00-1,18 mm kum fraksiyonundan oluşan 0,45 gözeneklilik değerindeki sabit yatağa ait hız-yük kaybı eğrisi.....	99
Şekil 5.17 :	6 farklı kum fraksiyonu için yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması (ϵ : 0,38-0,47).....	100
Şekil 5.18 :	5 farklı perlit fraksiyonu için yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması (ϵ : 0,42-0,51).....	100
Şekil 5.19 :	8 farklı garnet fraksiyonu için yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması (ϵ : 0,45-0,50).....	101
Şekil 5.20 :	3 farklı kırık cam fraksiyonu için yük kaybı verilerinin Ergun denklemi ile karşılaştırılması (ϵ : 0,45-0,53).....	101
Şekil A.1 :	1 mm küre-1 (ϵ : 0,37)	119
Şekil A.2 :	1 mm küre-2 (ϵ : 0,38)	119
Şekil A.3 :	1 mm küre-3 (ϵ : 0,40)	119
Şekil A.4 :	1 mm küre-4 (ϵ : 0,37)	119
Şekil A.5 :	2 mm küre-1 (ϵ : 0,37)	119
Şekil A.6 :	2 mm küre-2 (ϵ : 0,40)	119
Şekil A.7 :	2 mm küre-3 (ϵ : 0,39)	120
Şekil A.8 :	2 mm küre-4 (ϵ : 0,41)	120
Şekil A.9 :	2 mm küre-5 (ϵ : 0,38)	120
Şekil A.10 :	3 mm küre-1 (ϵ : 0,38)	120
Şekil A.11 :	3 mm küre-2 (ϵ : 0,42)	120
Şekil A.12 :	3 mm küre-3 (ϵ : 0,39)	120
Şekil A.13 :	3 mm küre-4 (ϵ : 0,42)	121
Şekil A.14 :	3 mm küre-5 (ϵ : 0,38)	121
Şekil A.15 :	3 mm küre-6 (ϵ : 0,40)	121
Şekil A.16 :	4 mm küre-1 (ϵ : 0,41)	121
Şekil A.17 :	4 mm küre-2 (ϵ : 0,38)	121
Şekil A.18 :	4 mm küre-3 (ϵ : 0,42)	121
Şekil A.19 :	4 mm küre-4 (ϵ : 0,39)	122
Şekil A.20 :	5 mm küre-1 (ϵ : 0,40)	122

Şekil A.21 : 5 mm küre-2 (ϵ : 0,43)	122
Şekil A.22 : 5 mm küre-3 (ϵ : 0,43)	122
Şekil A.23 : 5 mm küre-4 (ϵ : 0,44)	122
Şekil A.24 : 6 mm küre-1 (ϵ : 0,44)	122
Şekil A.25 : 6 mm küre-2 (ϵ : 0,44)	123
Şekil A.26 : 6 mm küre-3 (ϵ : 0,40)	123
Şekil A.27 : 7 mm küre-1 (ϵ : 0,44)	123
Şekil A.28 : 7 mm küre-2 (ϵ : 0,42)	123
Şekil A.29 : 7 mm küre-3 (ϵ : 0,45)	123
Şekil A.30 : 8 mm küre-1 (ϵ : 0,46)	123
Şekil A.31 : 8 mm küre-2 (ϵ : 0,42)	124
Şekil A.32 : 8 mm küre-3 (ϵ : 0,46)	124
Şekil A.33 : 10 mm küre-1 (ϵ : 0,47)	124
Şekil A.34 : 10 mm küre-2 (ϵ : 0,47)	124
Şekil A.35 : 10 mm küre-3 (ϵ : 0,44)	124
Şekil A.36 : 10 mm küre-4 (ϵ : 0,46)	124
Şekil A.37 : 10 mm küre-5 (ϵ : 0,42)	125
Şekil A.38 : 10 mm küre- 6 (ϵ : 0,41)	125
Şekil B.1 : 0,6-0,71 mm kum-1 (ϵ : 0,47)	127
Şekil B.2 : 0,6-0,71 mm kum-2 (ϵ : 0,42)	127
Şekil B.3 : 0,6-0,71 mm kum-3 (ϵ : 0,45)	127
Şekil B.4 : 0,71-0,85 mm kum (ϵ : 0,46)	127
Şekil B.5 : 0,85-1,00 mm kum-1 (ϵ : 0,41)	127
Şekil B.6 : 0,85-1,00 mm kum-2 (ϵ : 0,43)	127
Şekil B.7 : 0,85-1,00 mm kum-3 (ϵ : 0,45)	128
Şekil B.8 : 0,85-1,00 mm kum-4 (ϵ : 0,46)	127
Şekil B.9 : 0,85-1,00 mm kum-5 (ϵ : 0,40)	127
Şekil B.10 : 0,85-1,00 mm kum-6 (ϵ : 0,43)	127
Şekil B.11 : 0,85-1,00 mm kum-7 (ϵ : 0,40)	127
Şekil B.12 : 0,85-1,00 mm kum-8 (ϵ : 0,44)	127
Şekil B.13 : 0,85-1,00 mm kum-9 (ϵ : 0,43)	129
Şekil B.14 : 0,85-1,00 mm kum-10 (ϵ : 0,41)	129
Şekil B.15 : 1,00-1,18 mm kum-1 (ϵ : 0,41)	129
Şekil B.16 : 1,00-1,18 mm kum-2 (ϵ : 0,45)	129
Şekil B.17 : 1,00-1,18 mm kum-3 (ϵ : 0,43)	129
Şekil B.18 : 1,00-1,18 mm kum-4 (ϵ : 0,44)	129
Şekil B.19 : 1,00-1,18 mm kum-5 (ϵ : 0,42)	130
Şekil B.20 : 1,00-1,18 mm kum-6 (ϵ : 0,41)	130
Şekil B.21 : 1,00-1,18 mm kum-7 (ϵ : 0,45)	130
Şekil B.22 : 1,18-1,40 mm kum-1 (ϵ : 0,38)	130
Şekil B.23 : 1,18-1,40 mm kum-2 (ϵ : 0,41)	130
Şekil B.24 : 1,18-1,40 mm kum-3 (ϵ : 0,42)	130
Şekil B.25 : 1,40-1,70 mmkum-1 (ϵ : 0,38)	131
Şekil B.26 : 1,40-1,70 mmkum-2 (ϵ : 0,41)	131
Şekil B.27 : 1,40-1,70 mmkum-3 (ϵ : 0,39)	131
Şekil B.28 : 1,00-1,18 mm perlit-1 (ϵ : 0,46)	131
Şekil B.29 : 1,00-1,18 mm perlit-2 (ϵ : 0,42)	131
Şekil B.30 : 1,00-1,18 mm perlit-3 (ϵ : 0,44)	131
Şekil B.31 : 1,18-1,40 mm perlit-1 (ϵ : 0,47)	132
Şekil B.32 : 1,18-1,40 mm perlit-2 (ϵ : 0,42)	132
Şekil B.33 : 1,18-1,40 mm perlit-3 (ϵ : 0,45)	132
Şekil B.34 : 1,40-1,70 mm perlit-1 (ϵ : 0,48)	132
Şekil B.35 : 1,40-1,70 mm perlit -2 (ϵ : 0,48)	132
Şekil B.36 : 1,40-1,70 mm perlit -3 (ϵ : 0,43)	132
Şekil B.37 : 1,40-1,70 mm perlit -4 (ϵ : 0,46)	133

Şekil B.38 : 1,70-2,00 mm perlit-1 (ε: 0,48)	133
Şekil B.39 : 1,70-2,00 mm perlit-2 (ε: 0,43)	133
Şekil B.40 : 1,70-2,00 mm perlit-3 (ε: 0,43)	133
Şekil B.41 : 2,00-2,36 mm perlit-1 (ε: 0,47)	133
Şekil B.42 : 2,00-2,36 mm perlit-2 (ε: 0,50)	133
Şekil B.43 : 2,00-2,36 mm perlit-3 (ε: 0,46)	134
Şekil B.44 : 2,00-2,36 mm perlit-4 (ε: 0,51)	134
Şekil B.45 : 2,00-2,36 mm perlit-5 (ε: 0,48)	134
Şekil B.46 : 0,50-0,60 mm garnet-1 (ε: 0,50)	134
Şekil B.47 : 0,50-0,60 mm garnet-2 (ε: 0,46)	134
Şekil B.48 : 0,50-0,60 mm garnet-3 (ε: 0,48)	134
Şekil B.49 : 0,60-0,71 mm garnet-1 (ε: 0,48)	135
Şekil B.50 : 0,60-0,71 mm garnet-2 (ε: 0,45)	135
Şekil B.51 : 0,60-0,71 mm garnet-3 (ε: 0,47)	135
Şekil B.52 : 0,71-0,85 mm garnet-1 (ε: 0,50)	135
Şekil B.53 : 0,71-0,85 mm garnet-2 (ε: 0,46)	135
Şekil B.54 : 0,71-0,85 mm garnet-3 (ε: 0,48)	135
Şekil B.55 : 0,85-1,00 mm garnet-1 (ε: 0,49)	136
Şekil B.56 : 0,85-1,00 mm garnet-2 (ε: 0,45)	136
Şekil B.57 : 0,85-1,00 mm garnet-3 (ε: 0,48)	136
Şekil B.58 : 1,00-1,18 mm garnet-1 (ε: 0,50)	136
Şekil B.59 : 1,00-1,18 mm garnet-2 (ε: 0,46)	136
Şekil B.60 : 1,00-1,18 mm garnet-3 (ε: 0,48)	136
Şekil B.61 : 1,00-1,18 mm garnet-4 (ε: 0,46)	137
Şekil B.62 : 1,18-1,40 mm garnet-1 (ε: 0,49)	137
Şekil B.63 : 1,18-1,40 mm garnet-2 (ε: 0,45)	137
Şekil B.64 : 1,18-1,40 mm garnet-3 (ε: 0,47)	137
Şekil B.65 : 1,40-1,70 mm garnet-1 (ε: 0,50)	137
Şekil B.66 : 1,40-1,70 mm garnet-2 (ε: 0,46)	137
Şekil B.67 : 1,40-1,70 mm garnet-3 (ε: 0,47)	138
Şekil B.68 : 1,70-2,00 mm garnet -1 (ε: 0,49)	138
Şekil B.69 : 1,70-2,00 mm garnet -2 (ε: 0,45)	138
Şekil B.70 : 1,70-2,00 mm garnet -3 (ε: 0,47)	138
Şekil B.71 : 1,40-1,70 mm kırık cam-1 (ε: 0,53)	138
Şekil B.72 : 1,40-1,70 mm kırık cam-2 (ε: 0,49)	138
Şekil B.73 : 1,40-1,70 mm kırık cam-3 (ε: 0,51)	139
Şekil B.74 : 1,70–2,00 mm kırık cam-1 (ε: 0,52)	139
Şekil B.75 : 1,70–2,00 mm kırık cam-2 (ε: 0,48)	139
Şekil B.76 : 1,70–2,00 mm kırık cam-3 (ε: 0,50)	139
Şekil B.77 : 2,00-2,36 mm kırık cam-1 (ε: 0,45)	139
Şekil B.78 : 2,00-2,36 mm kırık cam-2 (ε: 0,45)	139
Şekil B.79 : 2,00-2,36 mm kırık cam-3 (ε: 0,50)	140
Şekil C.1 : Üçgen prizma-1 (ε: 0,41)	141
Şekil C.2 : Üçgen prizma-2 (ε: 0,46)	141
Şekil C.3 : Üçgen prizma-3 (ε: 0,44)	141
Şekil C.4 : Üçgen prizma-4 (ε: 0,40)	141
Şekil C.5 : Üçgen prizma-5 (ε: 0,45)	141
Şekil C.6 : Üçgen prizma-6 (ε: 0,43)	141
Şekil C.7 : Halka-1, 1 (ε: 0,62)	142
Şekil C.8 : Halka-1, 2 (ε: 0,65)	142
Şekil C.9 : Halka-1, 3 (ε: 0,64)	142
Şekil C.10 : Halka-1, 4 (ε: 0,63)	142
Şekil C.11 : Halka-1, 5 (ε: 0,62)	142
Şekil C.12 : Halka-1, 6 (ε: 0,65)	142
Şekil C.13 : Halka-1, 7 (ε: 0,63)	143

Şekil C.14 : Halka-2, 1 (ϵ : 0,53)	143
Şekil C.15 : Halka-2, 3 (ϵ : 0,49)	143
Şekil C.16 : Halka-2, 3 (ϵ : 0,50)	143
Şekil C.17 : Halka-2, 4 (ϵ : 0,52)	143
Şekil C.18 : Halka-2, 5 (ϵ : 0,48)	143
Şekil C.19 : Halka-2, 6 (ϵ : 0,50)	144
Şekil C.20 : Halka-3, 1 (ϵ : 0,69)	144
Şekil C.21 : Halka-3, 2 (ϵ : 0,67)	144
Şekil C.22 : Halka-3, 3 (ϵ : 0,67)	144
Şekil C.23 : Halka-3, 4 (ϵ : 0,69)	144
Şekil C.24 : Halka-3, 5 (ϵ : 0,70)	145
Şekil C.25 : Küp-1, 1 (ϵ : 0,40)	145
Şekil C.26 : Küp-1, 2 (ϵ : 0,46)	145
Şekil C.27 : Küp-1, 3 (ϵ : 0,45)	145
Şekil C.28 : Küp-1, 4 (ϵ : 0,43)	145
Şekil C.29 : Küp-1, 5 (ϵ : 0,43)	145
Şekil C.30 : Küp-2, 1 (ϵ : 0,35)	145
Şekil C.31 : Küp-2, -2 (ϵ : 0,40)	146
Şekil C.32 : Küp-2, 3 (ϵ : 0,38)	146
Şekil C.33 : Tablet, 1 (ϵ : 0,39)	146
Şekil C.34 : Tablet, 2 (ϵ : 0,41)	146
Şekil C.35 : Tablet, 3 (ϵ : 0,43)	146
Şekil C.36 : Silindir-1, 1 (ϵ : 0,39)	146
Şekil C.37 : Silindir-1, 2 (ϵ : 0,41)	147
Şekil C.38 : Silindir-1, 3 (ϵ : 0,42)	147
Şekil C.39 : Silindir-2, 1 (ϵ : 0,43)	147
Şekil C.40 : Silindir-2, 2 (ϵ : 0,39)	147
Şekil C.41 : Silindir-2, 3 (ϵ : 0,41)	147
Şekil C.42 : Dikd.prizması-1, 1 (ϵ : 0,41)	147
Şekil C.43 : Dikd.prizması-1, 2 (ϵ : 0,46)	148
Şekil C.44 : Dikd.prizması-1, 3 (ϵ : 0,44)	148
Şekil C.45 : Dikd.prizması-2, 1 (ϵ : 0,39)	148
Şekil C.46 : Dikd.prizması-2, 2 (ϵ : 0,41)	148
Şekil C.47 : Dikd.prizması-2, 3 (ϵ : 0,45)	148

KÜRESEL OLMAYAN MALZEMELERİN SABİT YATAK HİDROLİĞİ

ÖZET

Ergun denklemi küresel ve küresel olmayan malzemelerden oluşan sabit yataklarda yük kaybının tahmini için kabul gören bir denklem olmakla beraber denklemin küresel olmayan malzemeler için geçerliliği uzun yıllardır sorgulanmaktadır. Bu çalışmada Ergun denkleminin mevcut katsayıları ile sabit yataklarda küresel olmayan malzemeler için geçerliliği araştırılmıştır. Çalışmada iki farklı çapta permeabilite kolonu kullanılmış ve sıcaklık, debi, yük kaybı parametreleri otomasyon sistemi ile sürekli izlenmiştir. Sabit yatak deneylerinde deney tekrarlanabilirliğini engelleyen en önemli sorun hava kabarcıklarının oluşumudur. Deney düzeneğinde gerçekleştirilen çeşitli modifikasyonlar sayesinde bu problemin üstesinden gelinmiştir.

Öncelikle denklemin küresel malzemeler için geçerliliğini tespit etmek üzere 9 farklı boyutta cam küre ile çalışılmış ve denklemin mevcut katsayıları ile küreler için oldukça başarılı neticeler verdiği belirlenmiştir. Küresel malzemeler için Ergun denkleminin duvar etkisinin ihmal edilebilir olduğu düşünülen $D/d \geq 10$ değerlerinde % 3-% 12,1 arasında değişen hata ile tahmin yapabildiği görülmüştür. Dolayısıyla denklemin Ergun tarafından teklif edilen $k_1:150$ ve $k_2: 1,75$ katsayıları ile küresel malzemeler için kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgu ile aynı zamanda kullanılan deneysel düzeneğin ve yöntemin güvenilirliği de teyit edilmiştir.

İkinci aşamada farklı şekillerde (küp, silindir, halka, tablet, dikdörtgenler prizması, üçgen prizma) ve boyutlarda olmak üzere özel olarak imal edilmiş 11 çeşit düzgün geometrik malzeme ile sabit yatak deneyleri yürütülmüştür. Düzgün geometrik şekillerin küreselliği teorik olarak hesaplanabildiği için değişik hızlarda meydana gelen yük kayıpları Ergun denklemi ile hesaplanmış ve deneylerde ölçülen yük kayıpları ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan malzemelerden her biri için Ergun denklemindeki katsayıların ne derece geçerli olduğu ve beklenebilecek hata oranları tespit edilmiştir. Teorik küresellik ve teorik çap değeri bilinen düzgün şekilli malzemelerden oluşan sabit yataklar için Ergun denkleminin yük kayıplarını % 11 - 55 aralığında değişen hatalar ile tahmin edebildiği görülmüştür. Bu geniş hata aralığı Ergun denkleminin mevcut k_1 ve k_2 katsayıları ile küresel olmayan malzemeler için kullanılamayacağını düşündürmüştür. Teorik küresellik katsayısı ve Ergun denklemi ile bulunan deneysel küresellik katsayısı arasındaki ilişkiyi tahmin etmek üzere değerlendirmeler yapılmış ve teorik küresellik değeri bilinen bir malzeme için

$$\psi_{deneysel} = 0,96 (\psi_{teorik}) - 0,16$$

denklemin yardımıyla düzeltilmiş deneysel küresellik değerinin hesaplanabileceği, dolayısıyla Ergun denklemi ile kabul edilebilir hata sınırları içinde yük kaybı tahmini yapılabileceği ortaya konmuştur.

Son aşamada ise su filtrasyonunda yaygın olarak kullanılan malzemelerle deneyler yürütülmüştür. Değişik boyutlarda ve değişik kaynaklardan elde edilmiş 6 fraksiyon kum, 5 fraksiyon perlit, 8 fraksiyon garnet ve 3 fraksiyon kırık cam ile gerçekleştirilen deneylerde Ergun tarafından teklif edilen k_1 ve k_2 değerlerini kullanarak yük kaybı verilerinin ne kadar iyi temsil edilebildiği araştırılmıştır. Ergun denkleminin mevcut katsayıları ile kum, perlit ve garnet için yük kaybını tahmin etmekte başarılı olduğu görülmüştür.

Şekil olarak birbirinden farklı bu malzeme grupları için Ergun denkleminin teorik küresellik ve çap değeri ile kullanıldığında yük kaybını kabul edilebilir doğrulukla tahmin edemediği belirlenmiştir. Denklem küresel olmayan malzemeler için de kullanılabilmesi için modifiye edilmesi gerektiği, bu işlem için en uygun parametrenin k_1 ve k_2 katsayıları olduğu, pratik açıdan uygulanabilir olması da göz önüne alındığında katsayılar için öngörülen bu değişikliğin küresellik katsayısı ile ilişkilendirilerek yapılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

HYDRAULIC BEHAVIOUR OF NON-SPHERICAL PARTICLES THROUGH FIXED-BEDS

SUMMARY

Though, Ergun equation is widely accepted for the prediction of head loss in fixed beds composed of spherical and non-spherical particles the validity of the equation has been a subject of debate for long years. In this study, the validity of Ergun equation in fixed beds for non-spherical particles with its original coefficients was examined. Two permeability columns of different diameters were used and parameters such as temperature, flow and head-loss were monitored continuously by an automation system. The most important problem encountered in fixed-bed experiments which also prevents reproducibility of the experiments is the presence of air bubbles. The problem was overcome with certain modifications in the experimental system.

First, experiments were conducted with 9 different sized glass spheres in order to determine the validity of the equation for spherical particles and it was found out that the equation was fairly successful. Also it was discovered that Ergun equation was capable of making predictions with an error of 3%-12,1% for spherical particles within $D/d \geq 10$ for which the wall effect is thought to be negligible. So it was concluded that Ergun equation is valid for spherical particles with the proposed coefficients. This finding also confirmed the reliability of the experimental set-up and the method applied.

In the second stage, fixed bed experiments were conducted with 11 types well defined geometric shaped particles of different shapes (cube, cylinder, hollow ring, tablet, rectangular prism, triangular prism) and sizes. As the sphericity of the well defined geometrical particles can be calculated theoretically, head-loss measured at various flow rates were compared with the head-loss calculated by Ergun equation. The possible error and the validity of the coefficients in the Ergun equation was determined for each type of media.

It was found that Ergun equation could predict the head-loss within 11%-55% for fixed beds made of well-defined geometric shapes whose sphericity and equivalent diameter are calculated theoretically. Such a wide range in the prediction lead to the idea that Ergun equation can not be used for non-spherical particles with the proposed coefficients. Assessments were made to presume the relationship between the experimental and theoretical sphericity. For a media whose theoretical sphericity is known the equation below can be used to find the corrected experimental sphericity and thus the head-loss can be calculated by Ergun equation within acceptable error limits.

$$\psi_{experimental} = 0,96 (\psi_{theoretical}) - 0,16$$

Finally, experiments were carried on a variety of media used in water filtration. 6 fractions of sand, 5 fractions of perlite, 8 fractions of garnet and 3 fractions of crushed glass with various sizes were obtained from several sources. It was examined how strongly the headloss data could be presented by using the coefficients as proposed by Ergun. The equation was found to be successful in predicting the head-loss for sand, perlite, garnet and crushed glass.

To conclude, it was figured out that Ergun equation was not able to predict the head-loss within acceptable accuracy when used with theoretical sphericity and equivalent diameter. The equation needs to be modified to be available for non-spherical particles, also. The coefficients are anticipated to be the most suitable parameters for modification, and in terms of practicability a relation between the coefficients and sphericity is thought to be proper.

1. GİRİŞ

1.1 Konunun Anlam ve Önemi

Sabit yataklar çevre, kimya, inşaat, petrol, ziraat mühendisliği gibi farklı disiplinlerde endüstriyel uygulamalar, distilasyon, kurutma, filtrasyon gibi çeşitli amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır. Yük kaybı ile tanımlanan enerji kayıpları sabit yataklı sistemlerin tasarım ve işletimi açısından dikkate alınması gereken en önemli kriterdir. Yük kayıplarını hesaplamak için önerilen çok sayıda denklem mevcut olmasına rağmen en yaygın olarak kullanılan denklem Ergun (1952a) denklemidir. Denklem, Ergun tarafından önerilen katsayılar ile hem küreler hem de küresel olmayan malzemeler için kullanılmakla beraber bu katsayılar üzerindeki tartışmalar yıllardan beri devam etmektedir. Su ve atıksuların filtrasyonunda sıklıkla kullanılan malzemeler silika kumu, garnet, ilmenit, perlit, kırık cam, antrasit kömürü ve aktif karbon olup bu malzemelerin büyük çoğunluğu küresel olmayan parçacıklardan oluşmaktadır. Sabit yatakların sıklıkla kullanıldığı diğer bir disiplin olan kimya mühendisliğinde de reaktörlerde kullanılan katalistler çoğunlukla küreden farklı şekildedirler. Sabit yataklarda meydana gelen yük kayıplarının hesaplanabilmesi için küresel olmayan malzemeler için de geçerli olan bir denkleme ihtiyaç vardır. Ergun denkleminin küreden aşırı farklı şekildeki (iğne gibi sivri veya ince plaka ve pul gibi basık) malzemeler için doğru neticeler vermeyebileceği kabul edilmekle beraber, küreden çok farklı olmayan şekildeki malzemelere uygulanabilirliği genel olarak kabul edilmiştir. Yaygın kullanılan filtre malzemelerinin küresellik değerleri 0,4 veya daha üzerindedir (Soyer ve Akgiray, 2006) ve bu tür malzemeler için Ergun denkleminin geçerli olduğu varsayılmaktadır. Ancak son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda Ergun denklemindeki katsayıların kum ve antrasit gibi küresel olmayan her malzeme için ayrı değerlere sahip olduğu (Trussell ve Chang, 1999), hatta bu katsayıların malzeme şekli dikkate alınarak belirlenmesi gerektiği iddia edilmiştir (Nemec ve Levec, 2005; Foumeny ve diğ., 1996). Fakat söz edilen yeni çalışmalarda yeterli miktarda veri toplanmadığı, çok kısıtlı sayıda ve çok az çeşitte malzeme ile deneyler yürütüldüğü görülmüştür.

Bu çalışma ile Ergun denkleminin küresel malzemeler için kabul edilebilir hata sınırları içinde kullanılabileceği bilgisi teyit edilmiş ve literatüre destekleyici bilgi olarak kazandırılmıştır.

Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler için Ergun denkleminin orijinal katsayıları ile kullanılamayacağına tespit edilmesi neticesinde teorik küreselliği bilinmeyen malzemeler için teorik ve deneysel küresellik değerleri arasında ortaya konan ilişkinin yük kaybı tahmininde kolaylık sağlayacağı umulmaktadır.

Küreselliğin temiz yatak yük kayıplarına etkisi, filtre geri yıkama hidrolüğünde kullanılan modeller için de önemlidir (Turan, 1992; Akgiray ve Saatçi, 2001; Akoyunlu, 2003; Akgiray ve diğ., 2004; Akgiray ve Soyer, 2006). Bu bakımdan çalışma kapsamında elde edilen neticelerin yalnızca filtrelerdeki yük kayıplarının doğru hesaplanması açısından değil, geri yıkama sırasındaki yatak genişlemelerinin modellenmesi çalışmalarına da katkı sağlayacağı umulmaktadır.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı sabit yataklarda kapsamlı ve iyi tasarlanmış deneyler yürüterek Ergun denkleminin (Ergun'un teklif ettiği k_1 ve k_2 katsayıları ile) küresel olmayan malzemeler için geçerliliğini araştırmaktır. Bunun için öncelikle farklı şekillerde (küp, silindir, halka, tablet, dikdörtgenler prizması, üçgen prizma) ve boyutlarda olmak üzere 11 çeşit düzgün geometrik malzeme temin edilmiştir. Kullanılan malzemelerin küresellik değerleri belirlenirken yaygın olarak kullanılan filtre malzemelerinin küresellik değerleri dikkate alınmış ve 0,4 değerinden yüksek olmasına dikkat edilmiştir. Düzgün geometrik şekillerin küreselliği hesaplanabildiği için değişik hızlardaki yük kayıpları Ergun denklemi ile hesaplanmış ve deneylerde ölçülen yük kayıpları ile mukayese edilmiştir. Kullanılan malzemelerden her biri için Ergun'un katsayılarının ne derece geçerli olduğu ve beklenebilecek hata oranları tespit edilmiştir. Ergun'un teklif ettiği k_1 ve k_2 katsayılarının küresel olmayan her malzeme için farklı olduğu, yani sabit olmadığı belirlenmiş ve bu konu kapsamlı bir çalışma ile ortaya konmuştur.

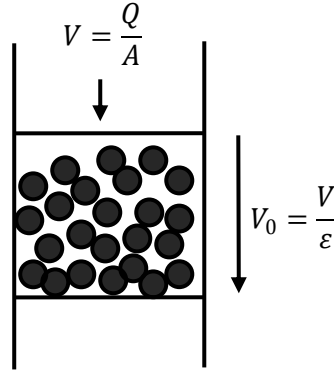
Diğer taraftan Ergun denkleminin küresel malzemeler için mevcut katsayılar ile geçerliliğini araştırmak için 9 farklı boyutta cam küre temin edilmiş ve sabit yatak deneyleri yürütülmüştür. Ergun denkleminin mevcut katsayıları ile küreler için oldukça başarılı neticeler verdiği teyit edilmiştir.

Ayrıca su filtrasyonunda yaygın olarak kullanılan malzemelerle de deneyler yapılmıştır. Farklı kaynaklardan elde edilmiş ve çok iyi elenerek hazırlanmış 6

fraksiyon kum, 5 fraksiyon perlit, 8 fraksiyon garnet ve 3 fraksiyon kırık cam ile yürütülen deneylerde Ergun'un teklif ettiği k_1 ve k_2 değerlerini kullanarak yük kaybı verilerinin ne kadar iyi temsil edilebildiği araştırılmıştır. Ayrıca, kum ve antrasit gibi malzemeler için farklı k_1 ve k_2 değerlerinin kullanılması gerektiği iddialarının geçerliliği araştırılmıştır.

2. GÖZENEKLİ ORTAM

Gözenekli ortam, belirli bir kontrol hacminde katı tanecikler arasındaki boşluklardan oluşan bir yapı olarak tanımlanabilir (Şekil 2.1). Gözeneklilik (ϵ), boşluk hacminin toplam hacime oranlanması ile hesaplanan bir parametredir. Belirli bir kesit alanından (A) geçen akış (Q), yani yüzeysel hız (V) değerinin, boşluklar arasındaki hız (V_0) ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1 : Gözenekli ortam.

Gözenekli ortamda akış ile ilgili bilinen ilk çalışmada Darcy (1856), ince taneciklerden meydana gelen sabit bir yatakta oluşan yük kaybının yataktan geçen debi ile doğru orantılı olduğunu ortaya koymuştur. Aynı zamanda gözenekli ortamda akış sırasında oluşan direncin bir ölçüsü olarak geçirimsizlik kavramını öne sürmüştür. Geçirimsizlik parametresi, çalışmalarında hidrolik yarıçap kavramını kullanan Blake (1922) tarafından yatak özelliklerini de dikkate alacak şekilde yeniden uyarlanmıştır. Kozeny (1927) bu çalışmaları daha da ilerletmiş ve Carman (1937) ilave düzenlemelerle laminar akış için günümüzde de halen kullanılmaya devam eden yarı ampirik denklemini ortaya koymuştur. Aynı dönemlerde, Burke ve Plummer (1928) gözenekli ortamda türbülanslı akım şartlarını temsil eden bir denklem teklif etmişlerdir. Daha sonra Ergun (1952a) laminar ve türbülanslı akım koşulları için önerilen denklemlerin toplanabilir nitelikte olduğunu ortaya koymuş ve oldukça geniş bir işletme aralığı için yük kaybı-debi ilişkisine dayanan ve mühendislik açısından kabul edilebilir hata yüzdeleri içinde sonuçlar veren bir denklem önermiştir. Gözenekli ortamda akışın kapsamlı bir şekilde ele alınabilmesi için öncelikle bu

ortamı oluşturan taneciklerin özelliklerinin ve taneciklerin yatak içinde yerleşimlerinin incelenmesi gerekir.

2.1 Taneciklerin Karakterizasyonu

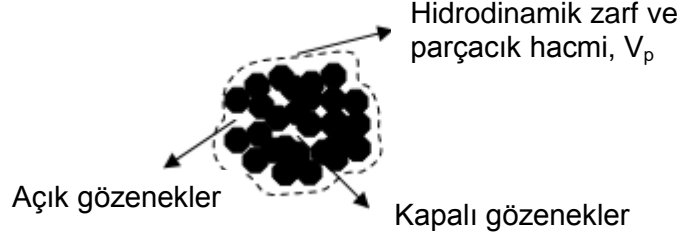
Taneciklerin karakterizasyonu boyut, şekil, büyüklük ve morfoloji gibi taneciğe özgü parametrelerin yanı sıra taneciğin akışkan içindeki dinamik davranışlarını ifade eden direnç katsayısı ve nihai çökme hızı (v_t) gibi kavramları da kapsamalıdır. Şekil ve yüzey morfolojisi oldukça düzensiz taneciklerin karakterizasyonu için çeşitli yöntemler mevcuttur ancak uygulanan yöntemle ilgili olarak sonuçlar birbirleriyle uyumluluk göstermeyebilir. Bunun yanında tercih edilen uygulamaya bağlı olarak bir yöntem diğerlerine üstünlük sağlayabilir.

2.1.1 Tanecik yoğunluğu

Çeşitli yoğunluk tanımları mevcut olmakla beraber uygulama alanlarına bağlı olarak bu tanımlardan biri diğerine kıyasla daha uygun olabilmektedir. Gözenekli olmayan tanecikler için yoğunluk, taneciğin ağırlığının hacmine oranlanması ile bulunur.

$$\rho_p = \frac{M_p}{V_p} \quad (2.1)$$

Küçük gözenekleri olan tanecikler için ise yukarıdaki denklemde yer alan hacim yerine malzemenin gözeneksiz olduğu kabul edilerek bulunan zarf hacmi kullanılmalıdır. Akım içerisinde tanenin davranışı inceleniyor veya tanelerin toplam yoğunlukları belirlenmeye çalışılıyorsa bu yaklaşım hidrodinamik açıdan daha uygundur. Toplam ağırlığın tahmini için ise iskelet yoğunluğu bilinmelidir. İskelet yoğunluğu, taneciklerin ağırlığının iskelet hacimlerine oranı olarak tanımlanır. Uygulamada, gaz adsorpsiyonu, gaz veya su ile yer değiştirme ve civa porozimetresi ile iskelet hacminden ziyade gözenek hacmi belirlenir. Bunun yanında, açık ve kapalı gözeneklere sahip malzemeler de mevcuttur. Kapalı gözeneklere gaz, su veya civa ile ulaşamaz, dolayısıyla hacimleri ölçülemez. Bu durumda, hesaplanan iskelet yoğunluğu, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi kapalı gözeneklerin hacimlerinden de etkilenir. Gözeneksiz malzemeler için, tane yoğunluğu tam olarak iskelet yoğunluğuna eşittir. Gözenekli malzemeler için ise, iskelet yoğunluğu tane yoğunluğundan büyüktür.



Şekil 2.2 : Tanecik iskelet yoğunluğu.

Gözenekli bir malzeme küçük parçalara ayrıldığında, bazı gözeneklerin kaybolması nedeniyle küçük parçaların yoğunluğu, parçalara ayrılmamış haldeki yoğunluktan büyük olmaktadır. Tane boyutu küçüldükçe tüm gözenekler elimine edildiğinden tane yoğunluğu gözeneksiz tanecik yoğunluğuna yaklaşır. Gözenekli malzemelerle yürütülen çalışmalarda bu eğilim göz önüne alınmalı ve tane yoğunluğu dikkatle değerlendirilmelidir.

2.1.2 Tanecik büyüklüğünün tanımlanması

Tanecik büyüklüğü tekil bir taneciği tanımlamak üzere seçilmiş bir veya birden fazla sayıda lineer boyuttur. Örneğin küre gibi ideal bir tanecik çap ile tanımlanır. Fakat küre dışındaki düzgün şekilli taneciklerin tanımlanmasında genellikle iki veya daha çok sayıda boyut kullanılır. Küp bu genelleştirmenin dışında kalarak tek bir boyut ile tanımlanabilir, ancak dikdörtgenler prizması, silindir, halka şeklindeki tanecikler için en az iki boyut gereklidir. Pratikte sık kullanılan düzgün şekilli olmayan tanecikler genellikle tek bir boyut ile tanımlanamazlar. Bu gibi taneciklerin büyüklükleri belirli referans özellikleri dikkate alınarak tanımlanır. Kullanım şekline bağlı olarak karakterizasyon için kullanılacak tane büyüklüğü tanımı değişiklik gösterebilir. Düzgün şekilli olmayan taneciklerin tanımlanması için kullanılacak çeşitli çap ifadeleri aşağıda verilmiştir. Ancak bu tanımlardan yalnızca elek çapı, hacim çapı, yüzey çapı, ve yüzey-hacim çapı sabit ve akışkan yatak uygulamalarında kullanılmaktadır.

2.1.2.1 Eşdeğer hacim çapı ($d_{eş}$)

Tanecik ile aynı hacme sahip olduğu varsayılan kürenin çapıdır.

$$d_{eş} = \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.2)$$

V_p : Tanecik hacmi

2.1.2.2 Yüzey çapı (d_s)

Tanecik ile aynı yüzey alanına sahip olduğu varsayılan kürenin çapıdır.

$$d_s = \left(\frac{S_p}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

S_p : Tanecik yüzey alanı

2.1.2.3 Yüzey-hacim çapı (d_{sv})

Tanecik ile aynı yüzey alanı/hacim oranına sahip olduğu varsayılan kürenin çapıdır.

$$d_{sv} = \frac{6V_p}{S_p} = \frac{d_{es}^3}{d_s^2} \quad (2.4)$$

Bu çap farklı kaynaklarda Sauter çapı olarak da adlandırılmaktadır.

2.1.2.4 Elek çapı (d_A)

Taneciğin geçtiği en küçük elek açıklığı olarak tanımlanır.

2.1.2.5 Stokes çapı (d_{st})

Stokes akım rejiminde serbest düşme hareketi yapan taneciğin çapıdır.

$$d_{st} = \sqrt{\frac{18 \mu v_t}{(\rho_p - \rho)g}} \quad (2.5)$$

μ : Akışkanın dinamik viskozitesi

v_t : Taneciğin nihai çökme hızı

ρ_p : Taneciğin yoğunluğu

ρ : Akışkanın yoğunluğu

g : Yerçekimi ivmesi

2.1.2.6 Serbest çökme çapı (d_f)

Aynı akışkan içinde tanecik ile aynı yoğunluğa ve nihai çökme hızına sahip olduğu varsayılan kürenin çapıdır. Bir taneciğin nihai çökme hızı; akışkanın kaldırma kuvvetini ve sürtünme kuvvetini yenerek yerçekimi kuvvetine paralel ve aynı yönde kazandığı sabit hızdır.

2.1.2.7 Direnç çapı (d_D)

Aynı yoğunluk ve viskozite değerlerine sahip aynı hızdaki akışkan içinde taneciğe etkiyen direnç ile aynı dirence maruz kaldığı varsayılan kürenin çapıdır.

2.1.2.8 Çevre çapı (d_c)

Taneciğin dıştan çevreleyen sınır ile aynı çevreye sahip olduğu varsayılan kürenin çapıdır.

2.1.2.9 Projeksiyon alanı çapı (d_a)

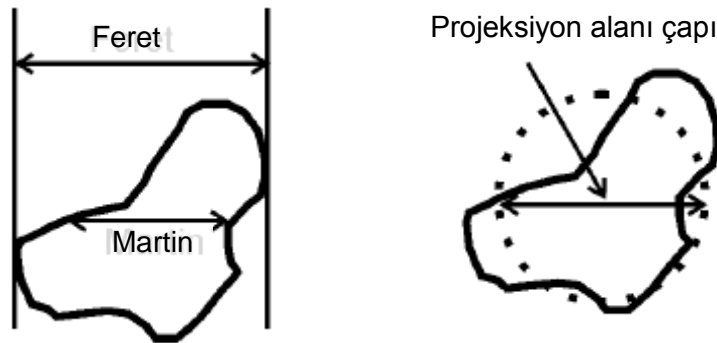
Taneciğin en stabil durumunda düzleme dik yönde bakıldığında projeksiyon alanı ile aynı projeksiyon alanına sahip olduğu varsayılan kürenin çapıdır (Şekil 2.3).

2.1.2.10 Feret çapı (d_f)

Taneciğin projeksiyon çevresinden çizilen paralel teğetler arasındaki mesafenin ortalamasını temsil eden istatistiksel bir çaptır.

2.1.2.11 Martin çapı (d_M)

Taneciğin projeksiyon sınırlarında ortalama kiriş uzunluğu olarak tanımlanan istatistiksel bir çaptır. Şekil 2.3' de görüldüğü üzere seçilen bu uzunluk projeksiyon profilini mümkün olduğunca eşit iki kısma ayırır.



Şekil 2.3 : Projeksiyon alanı, Feret ve Martin çapının şematik gösterimi.

Teknolojinin gelişmesiyle tanecik çapının enstrümanlar kullanılarak belirlenmesi de mümkün olmuştur. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan cihazlar ve hangi çapın tespit edilebildiği Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Tanecik büyüklüğünü belirlemek için yaygın olarak kullanılan enstrümanlar.

Enstrüman	Eşdeğer Çap	Örnek (URL)
Mikroskop	Projeksiyon alanı çapı	
Elek	Elek çapı	www.atmcorporation.com
Lasentec (tanecik giriş uzunluğu)	Martin çapı	www.lasentec.com
Malvern	Alan-ışık dağılımı özellikleri	www.malvern.co.uk
Coulter Counter	Hacim çapı	www.beckman.com
Sedigraph ve Andreasen pipeti	Çökeltme çapı	www.micromeritics.com

Farklı şekillerde katalistlerden oluşan katalitik reaktörlerde kullanılacak eşdeğer çaplar Çizelge 2.2'de verilmiştir (Rase, 1990).

Çizelge 2.2 : Katalistler için önerilen eşdeğer çap ifadeleri (Rase, 1990).

Şekil	Eşdeğer çap, d_p
Küre	$d_p = \text{kürenin çapı}$
Silindir ($d=h$)	$d_p = \text{silindirin çapı}$
Silindir ($d \neq h$)	$d_p = \frac{6d}{4 + 2d/h}$
Halka	$d_p = 1,5 (d_{dış} - d_{iç})$
Düzgün şekilli olmayan tanecikler ($\psi = 0,5-0,7$)	$d_p = \psi d_{eş}$

2.1.3 Tanecik şeklinin tanımlanması

Doğal ve yapay olarak üretilmiş katı formdaki tanecikler çok farklı şekillerde bulunabilmekle beraber pratikte ilgilenilen taneciklerin çoğu düzensiz bir şekle sahiptir. Tanecik şeklinin küreden farklılığını ortaya koyan pek çok ampirik çarpan önerilmiştir. Bu ampirik tanımlamalar çoğunlukla tane hacmi, yüzey alanı, projeksiyon alanı ve projeksiyon çevresi parametrelerinden iki tanesinin kullanılması ile elde edilir. Projeksiyon alanı ve çevresi spesifik bir eksene normal alınarak belirlenmelidir. Asimetrik tanecikler için referans yönü genellikle simetri eksenine normal ya da paralel olarak alınır. Günümüze kadar ortaya konan şekil faktörleri arasında da bir fikir birliği bulunmamaktadır. Farklı şekillerdeki bazı tanecikler aynı şekil faktörüne sahip olabilir. Karmaşık şekillerin sadece tek bir parametre ile tanımlanmaya çalışılması durumunda aykırı fikirlerin olması kaçınılmazdır. Bu nedenle uygulamada kullanılacak şekil faktörü seçilirken kullanım amacı ile ilişkisine dikkat edilmelidir.

2.1.3.1 Küresellik

Wadell (1933) tarafından öne sürülen küresellik şu şekilde tanımlanmıştır:

$$\psi = \frac{\text{Tanecik ile eşdeğer hacimdeki kürenin yüzey alanı}}{\text{Taneciğin yüzey alanı}} \quad (2.6)$$

Küresellik kavramı Brownell ve Katz (1947) ve Fair ve diğ. (1968) tarafından da benimsenmiş ve kullanılmıştır. Gerçek bir küre için küresellik değeri 1'e eşittir. Küresel olmayan malzemeler için küresellik daima 1'den küçük olacaktır. Taneciğin en boy oranı 1'den uzaklaştıkça küresellik azalır. Küresellik parametresinin kullanılmasındaki en önemli zorluk düzgün olmayan şekilli tanecikler için yüzey alanının belirlenmesidir.

Tanecik şeklinin bir ifadesi olarak öne sürülen küreselliğin direnç katsayısı bağıntılarında da kullanılabileceği iddia edilmiştir (Wadell, 1934). Geometrik oranlar açısından bakıldığında küreyi andıran şekiller için küreselliğin bir korelasyon parametresi olarak kullanılabileceğine dair bazı teorik bulgular mevcut olmakla beraber diğer koşullarda kullanımının ampirik olduğu ifade edilmiştir (Clift ve diğ., 1978). Leva (1959) ile Subramanian ve Arunachalam (1980) küresellik parametresinin değerlendirmesi için Ergun denklemine dayanan deneysel metotlar önermişlerdir. Fakat bu şekilde belirlenen küreselliğin gerçekten taneciğin yüzey özelliklerini mi tanımladığı yoksa dataya en iyi uyum gösteren parametre mi olduğu konusunda kesin bir yargıya varılamamıştır (Trussell ve Chang, 1999). Bazı düzgün şekilli malzemeler için Wadell (1933) tarafından önerilen şekilde hesaplanan küresellik değerleri Çizelge 2.3'de, küresel olmayan malzemeler için küresellik değerleri ise Çizelge 2.4'de (Geldart, 1986) verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Düzgün şekilli malzemeler için küresellik değerleri.

Şekil	Geometrik oranlar	Küresellik
Basık küre		0,70-0,93
Eliptik	1:2:4	0,79
Silindir	Yükseklik=çap	0,87
	Yükseklik=2xçap	0,83
	Yükseklik=4xçap	0,73
	Yükseklik=1/2xçap	0,83
	Yükseklik=1/4xçap	0,69
Dikdörtgenler prizması	1:1:1	0,81
	1:1:2	0,77
	1:2:2	0,77
	1:1:4	0,68
	1:4:4	0,64
	1:2:4	0,68

Çizelge 2.4 : Küresel olmayan malzemeler için küresellik değerleri.

Malzeme	Küresellik
Kum	
Yuvarlak kum	0,86
Keskin kenarlı kum	0,66
Kırılmış taş	0,8-0,9
Kömür	
Pulverize kömür	0,73
Kırılmış kömür	0,63-0,75
Aktif karbon	0,70-0,90
Kırık cam	0,65

2.1.3.2 Heywood şekil faktörü

Hacimsel şekil faktörü olarak da adlandırılan Heywood şekil faktörü taneciğin projeksiyon profilini temel almaktadır ve şu şekilde hesaplanır:

$$k = \frac{V_p}{d_a^3} \quad (2.7)$$

$$d_a = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} \quad (2.8)$$

Ancak aralarında boyut ve şekil dağılımı bulunan tanecikler için V_p 'nin tahmini çok kolay değildir.

2.1.4 Tanecik boyut ve şeklinin doğrudan belirlenmesi

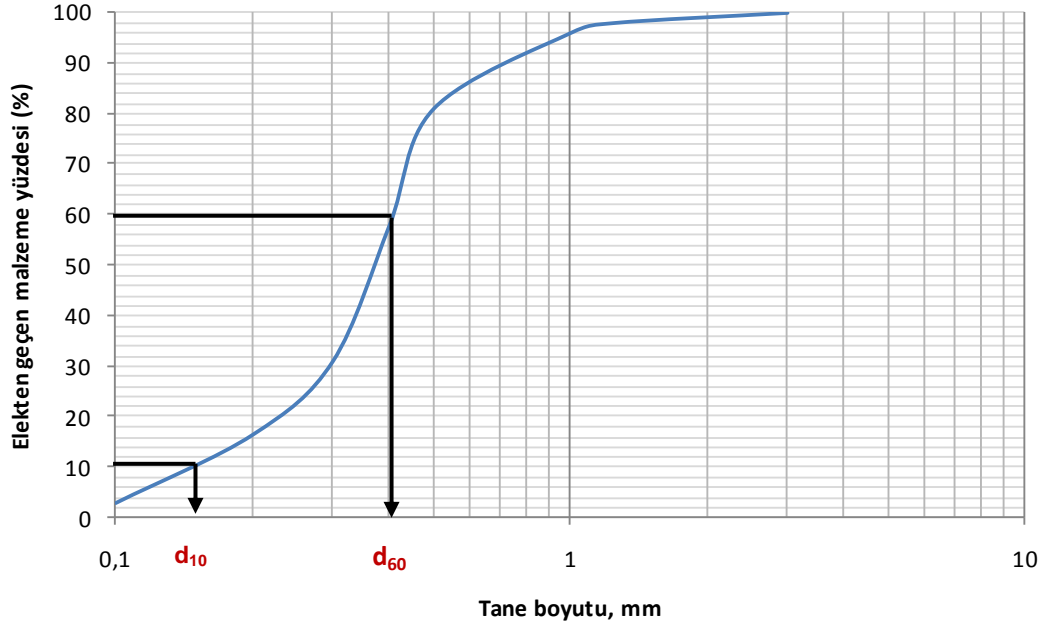
Tanecik boyut ve şeklinin doğrudan karakterizasyonu için elek analizi, görüntü teknikleri, yıkama ile karakterizasyon (elutasyon), özdirenç ve optik algılama teknikleri ile tane yüzey karakterizasyonu gibi teknikler kullanılabilir (Yang, 2003). Bu yöntemlerden en sıklıkla kullanılan elek analizi metodu aşağıda anlatılmıştır.

2.1.4.1 Elek analizi

Taneciklerin sınıflandırılması için en çok kullanılan metottur. ABD'de genellikle U.S. elek çapı ve Tyler elek çapı olmak üzere iki standart mesh (ağ gözü) boyutu kullanılmaktadır. Avrupa'da ise bunların yanında İngiliz standartları ve Alman DIN standartları da kullanılmaktadır. Bir eleğin mesh sayısı, elek örgüsünde bir inçteki paralel tellerin sayısıdır. ASTM (American Society of Testing Materials) tarafından yapılan farklı sistemlere ait standart mesh boyutları sınıflandırması Çizelge 2.5'de verilmiştir. Mesh boyutu, seride birbirini izleyen eleklerdeki açıklığın faktörü $2^{1/2}$

olacak şekilde dizayn edilir. Örneğin 1,68 mm açıklığa sahip U.S. 12 mesh eleği, 1,19 mm açıklığa sahip U.S. 16 mesh eleğinin $2^{1/2}$ katıdır.

Elek analizi sonuçları, apsite malzemenin geçtiği elek çapı, ordinatta ise geçen malzeme yüzdesi olacak şekilde yarı logaritmik kağıda işlenir. Ortaya çıkan S şeklindeki eğriye granülometri eğrisi de denir (Şekil 2.4). Elek analizi yardımıyla karışık bir malzemenin efektif çapı ve üniformaluluk katsayısı belirlenebilir. Elek analizi, karışık malzeme içerisinde bulunan en kaba ve en ince malzeme boyutu hakkında bilgi vermez. Elek analizi ile tane şeklinin ayırt edilmesi de mümkün değildir. İğne şeklinli bir malzeme elek aralığından geçebilir ya da farklı bir duruş şekli ile elek üzerinde kalabilir. Eleme işleminin süresi, malzeme miktarı ve eleğin deformasyonu elek analizi sonuçlarını etkileyen faktörler arasındadır. Tel erozyonuna bağlı olarak elek açıklığının genişlemesi de tutarsız sonuçlara sebep olabilir. Küçük tanecikler için statik elektrik veya nem ile topak oluşumuna dikkat edilmelidir.



Şekil 2.4 : Granülometri eğrisi.

Çizelge 2.5 : Standart elekler ve elek açıklıkları.

US mesh No.	Standart açıklık, mm	Tyler mesh No.	İngiliz mesh No.	Standart açıklık, mm	Alman DIN No.	Standart açıklık, mm	ASTM E11:01 No.	Standart açıklık, mm
3 ½	5,66	3 ½	–	–	1	6,000	3 ½	5,60
4	4,76	4	–	–	–	–	4	4,75
5	4,00	5	–	–	–	–	5	4,00
6	3,36	6	5	3,353	2	3,000	6	3,35
7	2,83	7	6	2,812	–	–	7	2,80
8	2,38	8	7	2,411	2 ½	2,400	8	2,36
10	2,00	9	8	2,057	3	2,000	10	2,00
12	1,68	10	10	1,676	4	1,500	12	1,70
14	1,41	12	12	1,405	–	–	14	1,40
16	1,19	14	14	1,204	5	1,200	16	1,18
18	1,00	16	16	1,003	6	1,020	18	1,00
20	0,84	20	18	0,853	–	–	20	0,85
–	–	–	–	–	8	0,750	–	–
25	0,71	24	22	0,699	–	–	25	0,71
30	0,59	28	25	0,599	10	0,600	30	0,60
–	–	–	–	–	11	0,540	–	–
35	0,50	32	30	0,500	12	0,490	35	0,50
40	0,42	35	36	0,422	14	0,430	40	0,425
45	0,35	42	44	0,353	16	0,385	45	0,355
50	0,297	48	52	0,295	20	0,300	50	0,300
60	0,250	60	60	0,251	24	0,250	60	0,250
70	0,210	65	72	0,211	30	0,200	70	0,212
80	0,177	80	85	0,178	–	–	80	0,180
100	0,149	100	100	0,152	40	0,150	100	0,150
120	0,125	115	120	0,124	50	0,120	120	0,125
140	0,105	150	150	0,104	60	0,102	140	0,106
170	0,088	170	170	0,089	70	0,088	170	0,090
200	0,074	200	200	0,076	80	0,075	200	0,075
230	0,062	250	240	0,066	100	0,060	230	0,063
270	0,053	270	300	0,053	–	–	270	0,053
325	0,044	325	–	–	–	–	325	0,045
400	0,038	400	–	–	–	–	400	0,038
635	0,020	–	–	–	–	–	635	0,002

2.2 Taneciklerin Yatak İçinde Yerleşimi

Sabit bir yatakta taneciklerin ne şekilde yerleştiği, bu yerleşimin belli kurallar çerçevesinde mi yoksa rastgele mi olduğu uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur (Cumberland ve Crawford, 1987). Sabit yataklar özellikle taşınım olayı açısından çok önemli olup yatağın yapısal özellikleri meydana gelen reaksiyon hız ve mekanizmalarını doğrudan etkilemektedir. Örneğin yatak gözenekliliği (porozite) yalnızca yatakta oluşan yük kaybı bakımından değil aynı zamanda tanecikler arasındaki akışın izleyeceği yol açısından da önem taşımaktadır (Reyes ve Inglesia, 1991; Sederman ve diğ., 2001). Genel olarak sabit bir yatakta

oluşan reaksiyon ve taşınımın etkin bir şekilde değerlendirilebilmesi için yatak gözenekliliği gibi yapısal özelliklerin belirlenmesi gereklidir. Zira bu özellikler Ergun denklemi gibi modellerin kullanılabilmesi için bilinmesi gereken parametreler arasında yer almaktadır.

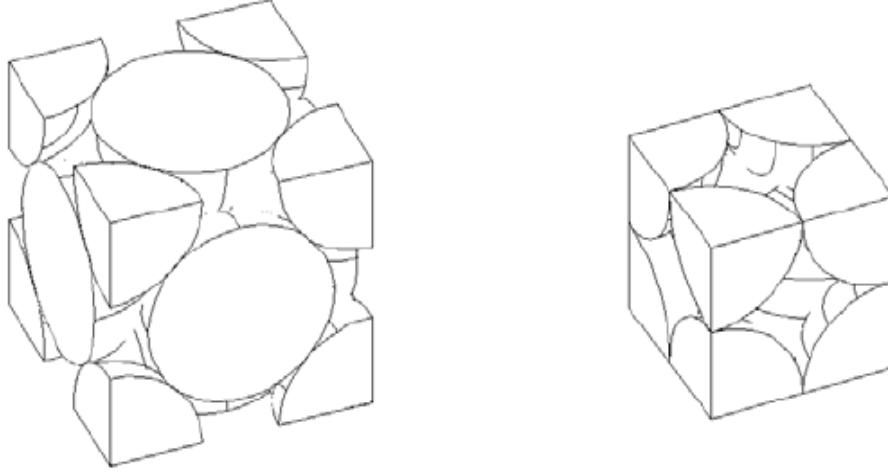
Bir kolon içindeki taneciklerin nasıl dizildikleri ve bu dizilişin yatağın yapısal özelliklerini nasıl etkilediği tanecik şekli, tanecik boyut dağılımı, kolonu doldurma şekli ve kolon cidarı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu değişkenlerin etkilerini incelemek üzere deneysel ve bilgisayar simülasyonlu çok sayıda çalışma yürütülmüştür.

2.2.1 Küresel taneciklerin yerleşimi

Her ne kadar düzgün küresel taneciklere pratik uygulamalarda nadiren rastlansa da, taneciklerin dizilişi ile ilgili çalışmalar söz konusu olduğunda, özellikle gözeneklilik ve koordinasyon sayısı gibi temel faktörlerin belirlenmesinde sağladıkları kolaylıklar sebebiyle model olarak tek boyutlu üniform küreler tercih edilmektedir (German, 1989). Kürelerin araştırmacılar için bu kadar ilgi çekici olmasının önemli bir diğer sebebi de düzensizlik ve dağınıklık kavramlarıyla oldukça karmaşık hale gelen topolojinin yarıçap gibi basit geometrik terimlerle ve her bir kürenin konumunun belirlenebilmesiyle açıklanabilmesidir (Liu ve Thompson, 2000).

2.2.1.1 Küresel taneciklerin düzenli yerleşimi

Düzenli yerleşim belirli ve kısa bir mesafe boyunca tekrarlayan periyodik yapı olarak tanımlanmaktadır. Gözeneklilik/yatak yoğunluğu veya diziliş (simetri) ve koordinasyon sayısı (küre başına temas noktası) ile karakterize edilebilen düzenli yerleşim için iki sınır durum mevcuttur (Şekil 2.5). Bunlardan ilki kübik konfigürasyon olup en yüksek gözeneklilik değerine (ϵ : 0,4764) sahip yerleşim şeklidir. Koordinasyon sayısının 6 olduğu bu yerleşimde her bir kürenin temas halinde olduğu 6 komşu küre mevcuttur. Diğer yerleşim şekli rombohedral konfigürasyon olup en düşük gözeneklilik değerine (ϵ : 0,2595) sahiptir ve koordinasyon sayısı 12'dir.



Şekil 2.5 : Rombohedral (solda) ve kübik (sağda) yerleşimin şematik gösterimi.

Pratikte karşılaşılabilecek durumların bu iki sınır yerleşim şekli arasında olacağı dikkate alınmalıdır. Göz önünde bulundurulması gereken diğer bir unsur ise sistemin kararlılığıdır. Katı formdaki küresel bir taneciğin kararlı durumda olması için 3 noktadan destek alması gerekir. Rombohedral yerleşim yatay pozisyonda yeterli sayıda temas noktası bulunmasına imkan sağlaması nedeni ile en kararlı durumu oluşturur fakat bu durumda potansiyel enerji en düşük seviyededir. Aksine, kübik yerleşimde her kürenin diğerleriyle yalnızca 1 temas noktası bulunduğundan en kararsız durum oluşur ve potansiyel enerji maksimum seviyededir. Sonuç olarak düzenli yerleştirilen bir yatakta gözeneklilik azaldıkça kararlılık artar, çünkü kürelerin birbirleriyle olan temas noktaları artar. Bu konu ile ilgili yürütülmüş oldukça detaylı çalışmalar bulunmaktadır (Haughey ve Beveridge, 1969; Cumberland ve Crawford, 1987; German, 1989).

2.2.1.2 Küresel taneciklerin rasgele yerleşimi

Rasgele yerleşim birbiri ile ilgisi olmayan kesikli olayların sonucunda oluşan ve tekrarlanabilirliği düşük bir yapıdır (German, 1989). Her ne kadar doğada sıkça karşılaşılan bir durum olsa da rasgele yerleşimin oluşumunda herhangi bir kural bulunmayışı bu yapının modellenmesi ile ilgili çalışmaları güçleştirmektedir. Her bir kürenin birbirine göre durumu ancak olasılık ihtimalleri ile tanımlanabilmekte, bu da yatağın geometrik özelliklerinin dağılım değerleri ile ifade edilmesine ve ancak istatistiksel analiz ile değerlendirme yapılabilmesine imkan vermektedir (Haughey ve Beveridge, 1969). Ayrıca kolon cidarında daha farklı bir dizilişin gözlenmesi ve taneciklerin akışkanlaştırıldıktan sonra yatak içinde öncekinden farklı bir diziliş ile yerleşmesi de değerlendirmeyi güçleştiren noktalar.

Scott (1960) tarafından yapılan çalışmaların rasgele yerleşim ile ilgili ilk değerlendirmeler olduğu düşünülmektedir.

Tek boyutlu küreler için rasgele yerleşim türleri

Bir yatağın doldurulma şekli o yatağı oluşturan taneciklerin küresel olup olmamasından bağımsız olarak yatak gözenekliliğini etkiler. Dolayısıyla farklı rasgele yerleşim türleri arasında ayırım yapabilmek çok önemlidir. Çizelge 2.6'da eşit boyuttaki küreler için en sık karşılaşılan rasgele yerleşim türleri, gözeneklilik aralıkları ve koordinasyon sayısı bilgileri verilmiştir. Her düzenli yerleşim için karakteristik bir gözeneklilik ve koordinasyon sayısı bilgisi mevcuttur. Rasgele yerleşimde ise kullanılan yöntemle bağlı olarak bu parametrelerin bir aralık içinde bulunduğu gözlenmiştir.

Çizelge 2.6 : Tek boyutlu küreler için rasgele yerleşim türleri ve ilgili yapısal özellikler.

Yerleşim türü	Ortalama gözeneklilik	Koordinasyon sayısı
Kübik*	0,4764	6
Akışkanlaşma başlangıcı	0,440-0,460	5-6
Rasgele gevşek yerleşim (RLP)	0,390-0,420	5-7
Rasgele dökerek yerleşim (RPP)	0,375-0,390	6-8
Rasgele sıkı yerleşim (RCP)	0,363-0,375	7-9
Rombohedral*	0,2595	12

*rasgele yerleşim türü değildir, yalnızca sınır koşulları belirtmek için gösterilmiştir

Meydana gelen yerleşim türü kolonu doldurmak için kullanılan enerjinin miktarına bağlıdır. Momentum en düşük seviyede iken ve köprü oluşumu için en uygun şartlar sağlandığında çok gevşek rasgele yerleşim meydana gelir. Bu durum genellikle akışkanlaşmış bir yatakta hızın çok yavaş bir şekilde azaltılmasını takiben kürelerin yatak içinde yavaşça çökmesi ile sağlanır. Yatak gözenekliliği 0,46 gibi yüksek değerlerdedir. Bu tür yerleşim akışkanlaşma başlangıcındaki yerleşim olarak adlandırılır.

Rasgele gevşek yerleşim (RLP), deneysel olarak kürelerin kolona tek tek yerleştirilmesi ile elde edilebilir. Bu şekilde kürelere daha fazla momentum aktarılmış olacaktır. Diğer taraftan ise köprü oluşumu hala mümkün olacaktır. Fakat bu tarz bir yerleşim şekli pratik açıdan uygulanabilir değildir. Scott (1960), rasgele gevşek yerleşimi elde etmek için geliştirdiği yöntemde kolonu yatay konumda iken doldurmuş, daha sonra kolonu kendi eksenine etrafında yavaşça döndürmüş ve sonra düşey konuma getirmiştir. Rasgele gevşek yerleşim ile oluşacak gözenekliliğin deneysel koşullara hassasiyeti göz önünde bulundurulmalıdır. Yapılan çalışmaların çoğunda gözenekliliğin 0,39-0,41 arasında değiştiği ifade edilmiştir.

Scott ve Kilgour (1969), bahsedilen bu zorluklardan dolayı rasgele gevşek yerleşimin bir sınır durum oluşturamayacağını, bunun sonucunda da tekrarlanabilir geometrik dizilişler elde edilemeyeceğini belirtmiştir.

Pratikte çok sık karşılaşıldığı şekilde tanecikler kolona yukarıda bulunan bir seviyeden dökülerek yerleştiriliyorsa, küreler daha fazla momentuma sahip olacaklar ancak yine de belli bir dereceye kadar köprü oluşturma ihtimalini koruyacaklardır. Dolayısıyla daha düşük gözeneklilik değerleri (0,375-0,399) elde edilmesi mümkün olacaktır. Bu şekilde sağlanan yerleşim türü rasgele dökerek yerleşim olarak adlandırılır.

En yoğun yerleşim ise rasgele sıkı yerleşim (RCP) olarak adlandırılan yerleşim şekli olup bu seçenekte gözenekliliğin belirlenmesi çok daha kolay olmaktadır. Deneysel olarak bu yerleşim şeklini elde etmek için kolona kürelerin yüksek seviyede bir noktadan dökülmesi ve daha sonra mümkün olduğu kadar kolonun sallanarak mümkün olduğunca çok momentum kazandırılması, dolayısıyla da malzemenin birbiriyle köprü oluşturma ihtimalinin azaltılması gerekir. Dikkatle gerçekleştirilen deneyler sonrasında Scott ve Kilgour (1969) rasgele sıkı yerleşim şeklinde elde edilebilecek gözeneklilik değerinin $0,3634 \pm 0,0005$ olduğunu tespit etmiştir. Bu değer halen üniform küreler ile elde edilebilecek en küçük gözeneklilik değeri olarak kabul edilmektedir. Her ne kadar bu sınır değeri teorik olarak destekleyecek bir çalışma bulunmasa da aksini belirten herhangi bir çalışmaya da rastlanmamıştır.

2.2.2 Küresel olmayan taneciklerin yerleşimi

Küresel olmayan taneciklerden oluşan sistemlerin karmaşık yapısı bu konuda oldukça kısıtlı sayıda teorik ve deneysel çalışma yürütülmesine neden olmuştur. Oman ve Watson (1944) farklı şekillerde malzemeler ile gerçekleştirdikleri deneylerde yatak gözenekliliğinin sırasıyla silindir, küre, granül, Raschig halkaları ve Berl saddles (bir çeşit eğri şekli) için giderek artan değerler aldığını tespit etmişlerdir.

Coulson (1949), küp, silindir ve plaka şeklinde malzemelerden oluşan sabit yataklar ile çalışmış ve sonuçların taneciklerin düşme yüksekliğine bağlı olduğunu bulmuştur (Çizelge 2.7). Brown (1966) üniform çaplı taneciklerden oluşan rasgele yerleşmiş yataklar için yatak gözenekliliğinin tanelerin küreselliğine bağlı olduğunu ifade etmiştir (Çizelge 2.8). Küresellik, mikroskop altında incelenebilecek kadar küçük taneler için Wadell (1935) tarafından önerilen ve aşağıdaki formül ile belirlenen değerlerin ortalaması alınarak bulunabilir.

$$\psi = \frac{d_c}{D_c} \quad (2.9)$$

Burada d_c , taneciğin en geniş görünümündeki projeksiyon alanına eşit dairenin çapı, D_c ise projeksiyonunu çerçeveleyen en küçük dairenin çapıdır. Eğer sabit yatak farklı şekillerde taneciklerin karışımından oluşuyorsa, küresellik genellikle farklı küreselliklerin aritmetik ortalaması kullanılarak hesaplanmaktadır.

Zou ve Yu (1996) tek boyutlu küresel olmayan taneciklerden oluşan yatakların gevşek ve yoğun rasgele yerleşimi üzerinde çalışmış ve gözenekliliğin tanecik şekli ve doldurma yöntemi ile doğrudan ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir. Gevşek ve yoğun rasgele yerleşimlerin başlangıçtaki gözeneklilik değerlerini küreselliğe bağlı olan denklemlerle ifade etmişlerdir. Chang ve diğ. (1999) tarafından kum, antrasit ve kürelerle yapılan çalışmada granüler yatak içerisinde akış esnasında oluşacak yük kaybının yatak gözenekliliği ve malzeme boyutlarına karşı hassas olduğu vurgulanmıştır. Araştırmacılar geri yıkamanın sonlandırılma şekline ve malzemenin kolona vurularak sıkıştırılmasına bağlı olarak aynı malzeme grubu için en az 3 farklı gözeneklilik değerinde deneyler yürütmüşlerdir.

Çizelge 2.7 : Küresel olmayan malzemeler için yatak gözenekliliği tahmini (Coulson, 1949).

Malzeme	Normal yükleme	Sıkı yerleşim	Küçük tüpler için düzeltme faktörü
Tabletler	0,36	0,31	1+0,43 (d_p/D)
Çubuklar			
Kısa	0,40	0,33	1+0,46 (d_p/D)
Uzun	0,46	0,40	1+0,46 (d_p/D)
Küreler			
Üniform	0,40	0,36	1+0,42 (d_p/D)
Karışık çaplar	0,36	0,32	
Düzensiz olmayan şekilli malzemeler	0,42 (ortalama)	0,42 (ortalama)	1+0,3 (d_p/D)

Yatağın sıkıştırılmış durumundaki yoğunluğunun gevşek halindeki yoğunluğuna oranı “Hausner oranı” olarak tanımlanır. Zou ve Yu (1996) tarafından yapılan çalışmada Hausner oranı (HR) ve küresellik arasında aşağıdaki gibi bir bağıntının olduğu gösterilmiştir.

$$HR = 1,478 \cdot 10^{-0,136\psi} \quad (2.10)$$

Çizelge 2.8 : Üniorm çaplı taneciklerden (>500µm) oluşan rasgele yerleşmiş sabit yatakların gözeneklilik değeri (Brown, 1966).

Gözeneklilik		
Küresellik	Gevşek yerleşim	Sıkı yerleşim
0,25	0,85	0,80
0,30	0,80	0,75
0,35	0,75	0,70
0,40	0,72	0,67
0,45	0,68	0,63
0,50	0,64	0,59
0,55	0,61	0,55
0,60	0,58	0,51
0,65	0,55	0,48
0,70	0,53	0,45
0,75	0,51	0,42
0,80	0,49	0,40
0,85	0,47	0,38
0,90	0,45	0,36
0,95	0,43	0,34
1,00	0,41	0,32

Pratik uygulamalar açısından yatak gözenekliliğini etkileyen faktörlerin başında tanecikler, kullanılan kolon, doldurma ve işletme metotları yer alır. Bu faktörler önem sırasına göre şu şekilde sıralanabilir: Tanecik şekli, çapı, çap dağılımı, taneciğin yeniden eski şeklini alma katsayısı, tane yüzey özellikleri (sürtünme); kolonun şekli, boyutları, yüzey özellikleri (sürtünme); birikme (deposition) metodu, birikme şiddeti, tanecik çökme hızı; vibrasyonlu sıkışma, basınçlı sıkışma.

2.3 Küresel Olmayan Taneciklerin Özellikleri

Küresel olmayan taneciklerden oluşan yataklara ait çok az sayıda deneysel ya da teorik nitelikte çalışma bulunmasının bu sistemlerin karmaşık yapısı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil parametresi, taneciklerin sabit yataklarda yerleşimi konusundaki en önemli faktörlerden biridir. Küresel olmayan tanecikleri içeren yatakların rasgele (düzensiz) yerleşimi kürelerden oluşan yataklara nazaran daha yüksek yatak gözenekliliği değerlerinin oluşmasına imkan verir. Küresel ya da küre benzeri şekilli malzemeler düzenli yerleşim eğilimi gösterirken, küresel olmayan malzemeler köprü oluşturma eğilimi göstererek boşluk hacminin artmasına neden olurlar (Oakshott ve Edwards, 1994). Tanecik şekli küreden saptıkça bu oluşum daha net gözlenir. Bununla birlikte düzenli yerleşmiş bir yatakta kürelerin 'boşlukları dolduran' malzemeler olmadığı, küresel olmayan malzemelerin ise çok daha yüksek yoğunluklarda yataklar oluşturabileceği gözden kaçırılmamalıdır.

Teorik olarak bakıldığında silindir şeklinde malzemelerden oluşan bir yatak, düzenli şekilde yerleşmiş ise, maksimum yoğunluk ('1-ε' olarak tanımlanmaktadır) değeri 0,9069 olarak bulunur, buna karşın düzenli şekilde yerleşmiş kürelerden oluşan yatakta ise aynı değer 0,7405'dir (Nemec, 2003). Aynı durum bir dereceye kadar, en azından izotropik şekilli malzemelerin düzensiz yerleşimleri için de geçerlidir. Örneğin çapı yüksekliğine eşit olan (eş boyutlu) silindirler, kürelerin oluşturabileceğinden dahi düşük yatak gözeneklilikleri oluşturabilmektedir. Literatür çalışmalarında 0,3 değeri gibi oldukça düşük gözeneklilik değerlerine rastlanmaktadır (Winterberg ve Tsotsas, 2000). Bununla birlikte düşük küresellik değerlerine sahip izotropik olmayan silindirlerden (çap/yükseklik boyutlarının oranı 1'den farklı olanlarda) oluşan yatakların gözeneklilik değerleri küreler için söz konusu olan değerlerin üzerine çıkmaktadır.

Sonuç olarak küresel olmayan taneciklerin sabit yataklarda yerleşimi, kürelerden oldukça farklı davranışlar sergilemektedir. Bu tanecikler birbirleri ile temas açısından farklı dağılımlar gösterebilmekte ve 'temas noktaları' yerine 'temas alanları' oluşturabilmektedirler. Haughey ve Beveridge (1969) kısa silindirlerin nokta, çizgi ya da yüzey temaslarında bu durumu ifade etmiştir. Yatağa yerleşim ya da yığılma modu incelendiğinde de farklı davranışlarla karşılaşmaktadır. Yatağın tekrar yerleşimleri (doldurulması) tekrarlanabilirliğin azaldığını göstermekte ayrıca yatak gözenekliliği, sıkı ve gevşek dolgulu yataklarda oldukça büyük farklılıklar sergileyebilmektedir. Diğer yandan yatağın az miktarda titreşime maruz bırakılması ve sıkıştırılması ile kürelerden oluşan yatakların sahip olabileceğinden oldukça düşük gözeneklilik değerleri elde edilebilir. Bu davranış, sıkışma/sarsılma sırasında taneciklerin yeniden yerleşimlerine ve köprülenme ile oluşan boşlukların yok olması neticesine bağlanmaktadır. Özellikle izotropik şekilli taneciklerden oluşan yataklarda gözlenen bu durumda, bazı tanecikler diğerlerinin oluşturduğu çukur bölgelere yerleşmektedir (Cumberland ve Crawford, 1987).

Küresel olmayan taneciklerin davranışları hakkında niteliksel değerlendirmeler oldukça faydalı olmakla birlikte bu çalışmalar ve yorumlar gözeneklilik gibi sabit yatağın yapısal parametrelerinin sayısal değerleri hakkında bilgi vermez.

Küresel olmayan (ve izotropik olmayan) taneciklerden meydana gelmiş sabit yatağın gözenekliliği küresellik ile yakından ilişkilidir, dolayısıyla sabit yatağın yoğunluğu taneciklerin küreselliğinin bir fonksiyonu olarak kabul edilmektedir (German, 1989). Bununla birlikte yatağın oluşumu sırasındaki karmaşıklık (farklı geometrik şekiller farklı dolgu özellikleri sergilemektedir) nedeniyle küresellik gibi tek bir şekil

faktörünün, yatak gözenekliliğini hassas bir şekilde değerlendirmeye imkan verecek bir parametre olmasını beklemek çok anlamlı değildir (Nemec, 2003).

Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda malzemelerin geometrik şekillerine göre spesifik eşitlikler önerilmiştir. Örneğin Zou ve Yu (1996) silindirler için gevşek ve sıkı rasgele yerleşme durumları için sırayla aşağıdaki eşitlikleri önermişlerdir.

$$\ln(\varepsilon_0) = \psi_s^{5,6} e^{5,9(1-\psi_s)} \ln(0,40) \quad (2.11)$$

$$\ln(\varepsilon_0) = \psi_s^{6,7} e^{8,0(1-\psi_s)} \ln(0,36) \quad (2.12)$$

Nemec (2003) çalışmasında, Yu ve Standish (1993) tarafından önerilen bağıntının (Denklem 2.13), küreler, silindirler ve loblu taneciklerden oluşan rasgele gevşek yerleşmiş yataklarda Denklem 2.12'ye nazaran daha yüksek doğruluklu neticeler verdiğini belirtmiş ve bu durumun nedenini Zou ve Yu'nun çalışmalarında üniform şekil ve boyutlarda silindirler kullanmasına karşın (dolayısıyla bu malzeme ile daha düşük yatak gözenekliliği elde edilmiştir), kendisinin endüstriyel sabit yataklarda kullanılan ve gerek şekil gerek boyut açısından üniformaluluk derecesi düşük katalistler kullanmasına bağlamıştır.

$$\ln(\varepsilon_0) = (15,5\psi_s^{1,6} - 0,8\psi_s^{4,9}) \ln(0,38) \quad (2.13)$$

Nemec'in halkalar için incelediği sistemlerde ise yatak gözenekliliği Denklem 2.13 ile yapılan tahminden farklı neticeler vermiştir. Araştırmacı bu durumu küresellik değerinin düşük olmasının, tanecikler arası sürtünmeye ilave katkı sağlamadığını (dolayısıyla yatak gözenekliliğini arttırmada bir etkisi olmadığını), bunun yerine gözenekliliğin tanelerin kendi iç boşlukları nedeniyle arttığını belirtmiştir.

Halkalardan oluşan bir yatağın gözenekliliği (ε_{hc}), eş çap ($d_{fc}=d_{dış}$) ve yükseklik değerlerine sahip (h) silindirlerden oluşan yatağın gözenekliliğine halkaların iç boşluklarının eklenmesi suretiyle tahmin edilebilmektedir (Nemec, 2003).

$$\varepsilon_{hc} = \varepsilon_{fc} + (1 - \varepsilon_{fc})(d_{iç}/d_{fc})^2 \quad (2.14)$$

$d_{iç}$: Halkanın iç çapı

Bununla birlikte araştırmacı, Raschig halkalarında olduğu gibi iç çapın büyük olması durumunda ($d_{dış}/d_{iç}<2$) Dixon (1988) tarafından önerilen düzeltmenin yapılması gerekliliğini belirtmiştir.

Çizelge 2.9'da Lywood (1996) tarafından farklı şekillerdeki malzemelerden oluşan yataklara ait gözeneklilik değerleri verilmiştir.

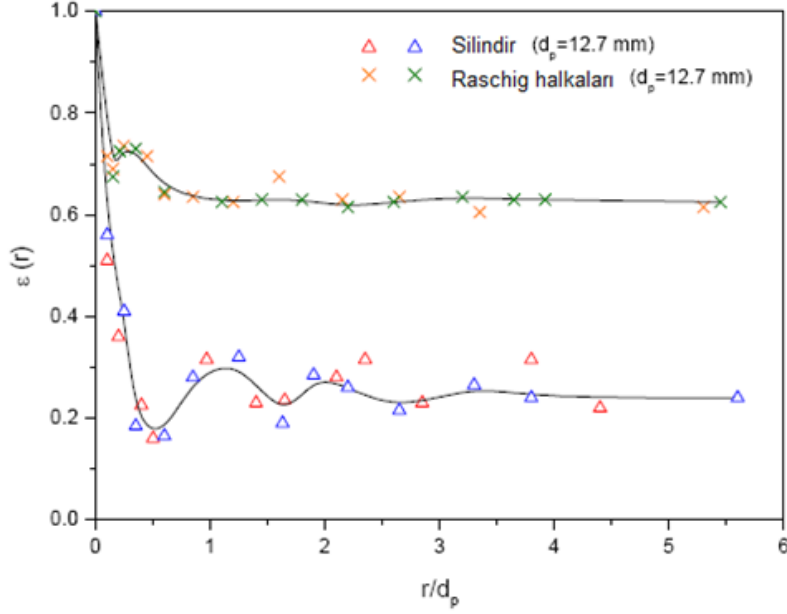
Çizelge 2.9 : Farklı şekildeki katalistlerden meydana gelmiş yataklara ait gözeneklilik değerleri (Lywood, 1996).

Şekil	$h/d_{dış}$	$d_{dış}/d_{iç}$	ϵ
Küre	/	/	0,360
Silindirler	0,5	/	0,405
Silindirler	1,0	/	0,355
Silindirler	1,33	/	0,376
Halkalar	1,0	2,56	0,450
Halkalar	0,68	2,56	0,460

2.4 Küresel Olmayan Taneciklerden Oluşan Yataklarda Duvar Etkisi

Eş boyutlu silindirler (çapı yüksekliğine eşit olan) gibi küresel olmayan izotropik taneciklerden oluşan yataklarda gözenekliliğin yersel değişimi farklı araştırmacılar tarafından Şekil 2.6'da gösterilmiş ve bu davranışın eşdeğer çapta kürelerin davranışı ile çok benzer nitelik taşıdığı belirtilmiştir (Nemec, 2003; Roblee ve diğ., 1958). İzotropik şekilleri nedeniyle bu silindirler oldukça düzenli şekilde yerleşerek 0,25'e kadar düşük değerlere sahip toplam yatak gözenekliliklerine sahip olabilmektedirler. Bununla birlikte tanecik şekilleri eksenini merkezden geçmeyen şekillere dönüştükçe düzenli yerleşim azalmaya ve toplam yatak gözeneklilikleri artmaya başlar. Düzensiz yerleşim özellikle taneciklerin içinde bulunduğu hazne cidarlarına yakın kısımlarda belirgin olarak gözlenir.

Benyahia (1996), en boy oranı 1'den farklı olan silindirler ile yaptığı çalışmada yersel gözeneklilik değişimi için osilasyon davranışı gözlediğini belirtmiştir. Bununla birlikte gözlenen bu davranış için uygun bir matematiksel denklem önermek güçtür. Şekil 2.6'da gösterilen data incelendiğinde araştırmacılar bu osilasyon davranışının çok fazla gözlenmediğini, başlangıçta parçacık çapının yarısı kadar duvardan olan uzaklıkta belirgin olan sivriliğin halkaların iç boşlukları nedeniyle gözlendiğini ifade etmişlerdir (Roblee ve diğ., 1958). Granüller gibi düzensiz şekilli tanelerde ise cidardan uzaklığın bir fonksiyonu olarak yersel gözeneklilik, sadece basit bir üstel azalma eğilimi göstermektedir (Cumberland ve Crawford, 1987). Bu durumun nedeni düzensiz şekilli tanelerin öngörülebilir bir düzenli yerleşim eğilimi göstermemelerine bağlanmıştır.



Şekil 2.6 : Küresel olmayan taneciklerden oluşan sabit yataklarda yatak gözenekliliğinin cidardan uzaklığın bir fonksiyonu olarak yersel değişimi (Roblee ve diğ., 1958).

Dolayısıyla pratik uygulamalar için aşağıdaki genel formda verilen üstel fonksiyon kullanılabilir (Winterberg ve Tsotsas, 2000).

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_0 \left(1 + a \cdot \exp \left[-b \frac{D/2 - r}{d_e} \right] \right) \quad (2.15)$$

Denklemdaki a ve b katsayıları her ayrı durum (her ayrı şekil) için ayrı olarak belirlenmelidir. Bu fonksiyon kolon çapı ve tanecik boyutu arasındaki yukarıda bahsedilen çelişkili durumu da kapsamakta ve taneciklerin yerleşimi ile ilgili olarak ortaya çıkan salınımsal değişimi de düzeltmektedir.

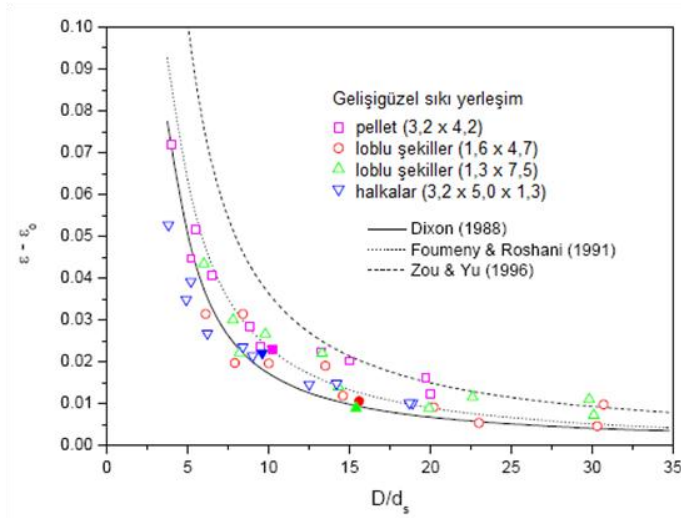
Küresel olmayan parçacıklar durumundaki duvar etkisine dair kesin tahminler verecek diferansiyel bir modelin bulunması güçlüğü ile birlikte toplam yatak gözenekliliği için bir integral model ihtiyacı da söz konusudur. Dixon (1988) ve Foumeny ve Roshani (1991) tarafından silindirlere oluşan yataklar için önerilen modeller sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + 0,1(d_s/D) + 0,7(d_s/D)^2 \quad (2.16)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{0,68}{(D/d_s)^{0,85} \sqrt{1,84(D/d_s) - 1}} \quad (2.17)$$

Toplam yatak gözenekliliği (ε_0), taneciklerin bir fonksiyonu olmasının yanı sıra tanelerin kolona yerleştirilme yöntemine de bağlıdır. Bazı araştırmacılar tarafından deneysel verilere uyum ile hesaplanan bazı spesifik değerler verilmiş olsa da duvar etkisi davranışının genelleştirilmiş bir formunun bulunması önem taşımaktadır.

Şekil 2.7'de Nemec (2003) tarafından elde edilen deneysel veriler diğer araştırmacıların modelleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.7 : Farklı silindirik şekillerden oluşan gelişigüzel sıkı yerleşmiş yataklarda duvar etkisi değişimi ve farklı modellerle karşılaştırılması (Nemec, 2003).

Bu modellerin elde edilmesi sırasında, Dixon (1988) eş boyutlu (yüksekliği çapına eşit) silindirlerle; Fomeny ve Roshani (1991) düşük $h/d_{dış}$ oranına sahip silindirlerle, Zou ve Yu (1996) ise geniş bir $h/d_{dış}$ aralığında bulunan silindir tanecikleri ile çalışmıştır. ($1 \leq h/d_{dış} \leq 16$). Araştırmacılar sonuçlarını Dixon (1988) tarafından verilen denkleme benzer bir denklem ile düzeltmişlerdir.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + 0,24(d_s/D) + 1,22(d_s/D)^2 \quad (2.18)$$

Bununla birlikte bu modelin silindirik taneciklerin duvar etkisi tahmininde kullanılabilecek uygun bir model olmadığı ifade edilmiştir. Ayrıca gevşek dolgulu yataklar için bir modele esas teşkil edecek veri toplanmasının güçlüğü üzerinde durulmuş ve küresel olmayan tanecikleri içeren yataklarda tekrarlanabilir neticelerin elde edilmesi için rasgele sıkı doldurulmuş yataklarla çalışılması gerekliliği ifade edilmiştir (Nemec, 2003).

2.5 Gözenekli Ortamda Akım Rejimleri

Gözenekli ortamda lineer olmayan kayıpların varlığı çok önemlidir. Bu kayıpların sebebi bir çok araştırmacı tarafından tartışılmış, bazıları ortamda türbülansın önem kazanması nedeniyle lineer olmayan kayıpların oluştuğunu öne sürmüştür. Bununla beraber düşük Reynolds sayılarında da ($1 < Re < 10$) Darcy bağıntısından sapmalar olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalar gözenekli ortamda türbülans oluşumunun farklı Reynolds sayılarında başladığını göstermiştir. Borulardaki akıştan farklı olarak ortaya çıkan bu değişkenlik malzeme şekli, büyüklüğü ve sıkışması ile ilişkilendirilebilir.

Gözenekli ortamda dört farklı akış rejimi gözlenebilir. İlki genellikle Darcy rejimi olarak adlandırılır ve bu akış rejimi $Re < 1$ olduğu durumda gözlenir. 0,5 mm çaplı malzemedan oluşan bir yatakta, yaklaşık 6,6 m/s filtrasyon hızında Re sayısı 1 olur. Darcy rejiminde akım daima laminar özellik taşır.

İkinci rejim Forchheimer rejimi (inertial) olarak adlandırılır. Bu bölgede de akım yine laminardır fakat zamanla atalet etkileri görülmeye başlanır. Başlangıç evresinde yük kaybı esas olarak yüzeysel hız ($V=Q/A$) ile doğru orantılı iken akışın son safhalarında V^2 ile ilişkili olarak ortaya çıkar. Bu bölgenin üst sınırında Re sayısı yaklaşık 100'dür.

Üçüncü rejim durgunluk halinden tamamıyla türbülanslı hale geçişi ifade eder. Bu rejimin başlangıç evresinde türbülans yalnızca bazı bölgelerde gözlenirken son evrede türbülans tüm ortamda hakim duruma gelmiştir. Malzeme ve akış özelliklerine de bağlı olarak bu rejimin üst sınırında Re sayısının 600 ile 800 arasında olduğu tahmin edilmektedir.

Re sayısının 800'ün üzerinde olduğu dördüncü ve son rejim ise tamamıyla türbülanslıdır.

2.6 Sabit Yataklarda Akış

Gözenekli ortamın hidrodinamik özellikleri incelenirken esas olarak taneciklerin arasındaki boşluklar dikkate alınmalıdır ancak bu boşlukları dolduran akışkanların da önemli bir rol oynadığı unutulmamalıdır. Literatürde rastlanan çalışmaların çoğunda bu çalışmada olduğu gibi akışkan olarak viskoz olarak da tabir edilen Newtonian akışkanlar kullanılmıştır. Navier-Stokes denklemi Newtonian akışkanlar için kullanılabilecek en uygun denklemlerden biri olup; akışkanın herhangi bir bölgesindeki kuvvetler dengesinin dinamik ifadesi olarak nitelendirilebilir.

Bu denklem, akışkan içerisindeki birim kütleyle etki eden momentum (ivmelenme) değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin toplamına eşit olduğunun doğruluğunu ortaya koymaktadır.

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) + \rho V \nabla V + \nabla P - \rho g - F - \mu \nabla^2 V = 0 \quad (2.19)$$

Denklemdaki ikinci terim akışkan içerisindeki birim kütleyle etki eden momentum (ivmelenme) değişimlerini göstermektedir. Bu terimin çok yüksek Reynolds sayılarında dahi ihmal edilebilir olduğu ifade edilmiştir (Jiang ve diğ., 2000; Nemeç, 2003). Üçüncü ve dördüncü terimler sürtünme ve yerçekimi etkilerinin basınç kaybına olan katkısını içermektedir. Beşinci terim (F), birim yatak hacmindeki direnç kuvveti olup akışkan ile tanecik yüzeyi arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır. Altıncı terim ise değişen hız profillerine bağlı olarak oluşan viskoz kuvvetleri temsil etmektedir. Navier-Stokes denkleminin oldukça karışık yapısı ancak bazı kabuller ve sadeleştirmeler yaparak analitik çözümler elde edilmesine imkan vermektedir.

Yarıçapı R, uzunluğu L olan dairesel düz bir boru ele alındığında atalet terimi sıfır kabul edilir ve kalan terimlerin sınır koşullar için integrali alınır, çözüm Hagen-Poiseuille denklemi olarak ortaya çıkar (Denklem 2.20).

$$V_0 = \frac{\Delta P R^2}{8L\mu} \quad (2.20)$$

Ancak Hagen-Poiseuille denklemi Re sayısının (Denklem 2.21) 2100'den küçük olduğu, yani akımın durgun ve stabil olduğu durumlarda geçerlidir.

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (2.21)$$

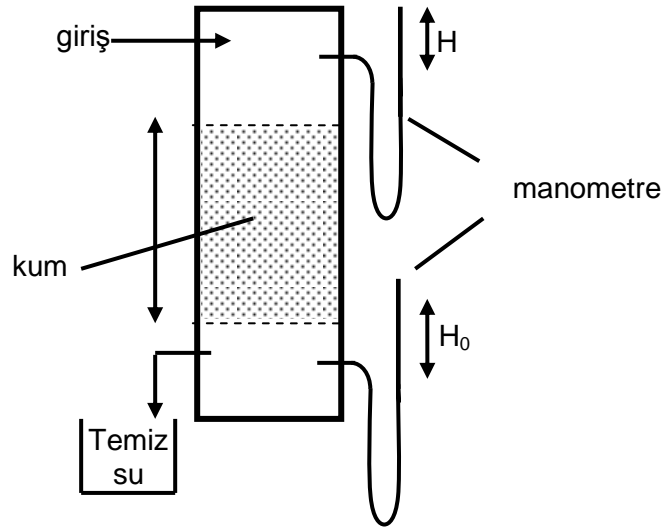
Bu noktanın ötesinde, akım stabilitesini kaybeder ve çalkantılar oluşmaya başlar. Stabil ve durgun akım laminer olarak isimlendirilirken, çalkantıların görüldüğü akım türbülanslı olarak tanımlanır. Türbülanslı akımda Hagen-Poiseuille denklemi geçerliliğini kaybeder, yük kaybı hızın lineer bir fonksiyonu değil üstel bir fonksiyonu haline gelir. Hagen-Poiseuille denklemi türetilirken her ne kadar atalet terimi ihmal edilmiş olsa da bu terim aslında eğrisel ve kesiti değişken borularda oldukça önemlidir. Atalet teriminin de gözönüne alınmasıyla debi ve yük kaybı arasındaki ilişki Denklem 2.22'deki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta P = x_1 Q + x_2 Q^2 \quad (2.22)$$

Gözenekli ortamda akış borularında akışa benzer şekilde modellenebilir. Gözenekli ortamda akışın incelenmesi ile ilgili en eski çalışmalar 1856'da Henry Darcy tarafından ortaya konmuştur. Darcy, 3,5 m uzunluğunda, 35 cm çapında dikey bir kolonda (Şekil 2.8) kum ve ile yaptığı deneyler sonucunda kolondan geçen debiyi tahmin etmek üzere Denklem 2.23'ü öne sürmüştür:

$$Q = \frac{kA}{L}(H + L - H_0) \quad (2.23)$$

k, hidrolik iletkenlik katsayısı olup kumun geçirgenliğine bağlıdır. Bu katsayı, uzunluk/zaman biriminde olup hem gözenekli ortamın hem de akışkanın özelliklerine bağlıdır. A; kolonun kesit alanı, L; yatak yüksekliğidir. Atmosferik basınç P ile gösterilirse, kum tabakasının üzerindeki basınç P+H, tabakanın altındaki basınç P+H₀ olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla kum tabakası boyunca basınç farkı, ΔP = ρg(H+L-H₀) şeklinde bulunabilir.



Şekil 2.8 : Darcy'nin kullandığı deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Bazı kaynaklarda Darcy denklemi olarak gösterilen ampirik hidrolik ifade (Denklem 2.24) aslında Darcy denkleminin farklıdır.

$$V = \left(\frac{K}{\mu}\right) \frac{\Delta P}{L} \quad (2.24)$$

Denklem 2.24'de, hidrolik iletkenlik katsayısı (k) yerinde spesifik iletkenlik (K) olarak tanımlanan yeni bir parametre bulunmaktadır. Nutting (1930) tarafından, Darcy'nin çalışmalarından kısa bir süre sonra öne sürülen bu katsayı akışkan özelliklerinden bağımsız, fakat ortam özelliklerine bağlıdır.

Hidrolik iletkenlik katsayısı ile spesifik iletkenlik arasındaki ilişki Denklem 2.25' de gösterilmiştir.

$$k = \frac{K}{\mu} \quad (2.25)$$

Gözenekli ortamda akışı inceleyen çalışmalarda çoğunlukla Darcy'nin k katsayısı yerine spesifik iletkenliğin tercih edildiği görülmüştür (Todd, 1960).

Darcy deney sonuçlarını rapor ederken su sıcaklığını 10°C olarak kabul ettiğini belirtmiş ve çalışmalarında viskozite etkisini göz önüne almamıştır. Ancak Hazen (1893) Darcy tarafından öne sürülen denklemi sıcaklık-viskozite etkisini de içerecek şekilde yeniden düzenlemiştir (Denklem 2.26).

$$V = \left(\frac{T + 10}{60}\right)k_{50} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.26)$$

T: Su sıcaklığı, F°

k₅₀: Referans hidrolik iletkenlik katsayısı değeri, aynı ortamda 50 F° sıcaklıkta ölçülen değer

Darcy kanunu yalnızca çok düşük hızlarda geçerli olmaktadır. Forchheimer (1901) debi-yük kaybı ilişkisinin Darcy tarafından öngörüldüğü şekilde lineer olmadığını gösteren çalışmalar yapmıştır. Lineer olmayan bu davranışın sebebi, akış doğrultusunda ve gözenek kesitinde oluşan değişikliklere bağlı oluşan yersel kayıplardır. Scheidegger (1960), Hubbert (1956), Irmay (1958), Sunada (1965), Ahmed ve Sunada (1969) ile diğer birçok araştırmacı Forchheimer'in öne sürdüğü lineer olmayan denklemin Navier-Stokes denkleminden başlayarak türetilebileceğini destekleyen çalışmalar yürütmüştür. Du Plessis (1994) ve Whitaker (1996) de teorik analizlere dayanan çalışmalarıyla deneysel bulguları desteklemiştir.

Gözenekli ortamda akış ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, özellikle geçmişten bugüne kadar yapılan çalışmaları özetleyen yayınlar (Scheidegger, 1960; Molerus, 1993; Trussell ve Chang, 1999) konunun derinlemesine anlaşılabilmesi açısından oldukça faydalıdır.

2.6.1 Kapiler tp modeli

Darcy denkleminde yer alan iletkenlik kavramı ile gözenekli ortamda akış ancak belirli hız sınırları içinde açıklanabilmektedir. Oysa ki iletkenlik parametresinin yatak gözenekliliği ve karakteristik uzunluk gibi temel fiziksel özelliklerle ilişkilendirilebilmesi durumunda akış özellikleri çok daha iyi anlaşılabilir. Sabit yataklar boyut ve şekil bakımından birbirine benzer tekil taneciklerden meydana gelmiştir ve bu tanecikleri arasındaki akışı modellemek için önerilen iki farklı teori mevcuttur. İlk teori münferit tanecik modeline dayanırken, ikinci teori borulardaki akışa benzerlik üzerine kurulmuştur. Aslında her iki yaklaşım da küresel ve küreye yakın şekillerdeki taneciklerden oluşan yataklardaki yük kaybı için kabul edilebilir tahminler vermektedir. Ancak küreden oldukça farklı şekiller içeren yataklar için yetersiz kalmaktadırlar (Yang, 2003).

Gözenekli ortamda akışı modellemek üzere kullanılan en yaygın teori borulardaki akışa benzerlik yaklaşımıdır. Bu yaklaşıma kapiler tüp veya kanal modeli de denilmektedir. Esas olarak, tümü eşit çapta olduğu varsayılan bir demet kapiler tp içinden geçen akışa benzetme yapılmaktadır. Daha geliştirildiğinde daraltılmış tp modeli elde edilmiştir. Bu modelde, farklı en kesitlerde kıvrımlı kanallardan oluşan demet, sabit yataktaki farklı çap ve eğriliklerde gözenekleri temsil etmektedir. Bu yaklaşıma en önemli katkılar Blake (1922), Kozeny (1927), Carman (1937) ve Ergun (1952a) tarafından yapılmıştır. Münferit tanecik modeli, sabit yatağın akış sırasında kendi sınır tabakasına sahip tekil taneciklerden oluştuğunu kabul eder. Bu yaklaşımı geliştiren en önemli araştırmacılar: Burke ve Plummer (1928), Ranz (1952), Happel (1958), Galloway ve Sage (1970) ile Gauvin ve Katta (1973)'dir. Kavramsal olarak bakıldığında münferit tanecik modeli sabit yatak içerisinde akışın fiziksel tanımına daha yakın olmakla birlikte boru içinden akım benzerliği tarihsel olarak daha geniş kullanım alanı bulmuştur. Boru içerisindeki akışa benzerlik ile geliştirilen denklemlerin küreselliği genellikle 0,6'dan daha büyük taneler için kullanılması uygundur. Münferit tanecik modeli ile geliştirilen denklemler ise küreselliği 0,6'dan daha küçük olan tanecikleri de kapsayan daha geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Kapiler tp modeli gözenekli ortamı temsil edecek bir karakteristik uzunluğun belirlenmesini gerektirir ve bu karakteristik uzunluk hidrolik yarıçap olarak adlandırılır. Hidrolik yarıçap kabul ile farklı kesit alanlarına sahip üniform olmayan tüplerin toplamını temsil eden tek bir tüpün mevcut olduğu ve bu tüpün çapının gözeneklerin çapına eşdeğer olduğu kabul edilir (Şekil 2.9). Hidrolik yarıçap kavramı için yapılması gereken kabuller:

- a) Hiç bir gözenek kapalı değildir.
- b) Gözenekler rasgele dağılmışlardır.
- c) Gözenekler boyut olarak mümkün olduğunca üniformdur.
- d) Gözeneklilik çok yüksek değildir.
- e) Akışkan hareketi kapiler tüpler içinden harekete benzer.

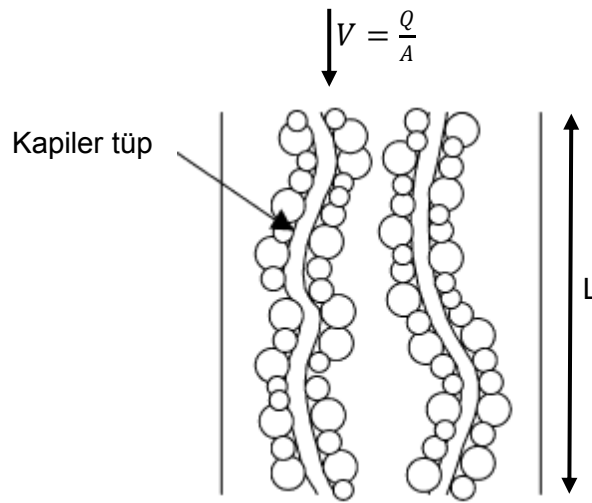
olarak belirtilmiştir (Scheidegger, 1974).

Kapiler tüp modeli her ne kadar sabit yataklarda akış için uygun görünse de bu kavramın kabulü için taneciklerin her noktada uniform olması gerektiği, kanallanmanın olmaması gerektiği, tanecik çapının kolon çapına kıyasla küçük olması ve bu oranın yatak boyunca her noktada sabit olması gerektiği noktalarına da dikkat edilmelidir.

Dairesel kesitli borularda laminar akım şartlarında ortalama hız Hagen-Poiseuille denklemi ile belirlenebilmektedir. Ancak sabit yatağın farklı kesit alanlarına sahip tüplerden oluştuğu kabul edildiğinde tek bir tüpün çapı kullanılamaz. Bu durumda, alanın ıslak çevreye oranı olarak tanımlanan hidrolik yarıçap kullanılır. Dairesel bir borunun çapının (D), hidrolik yarıçapın 4 katına eşit olduğu bilgisinden hareketle Hagen- Poiseuille denklemi tekrar yazılırsa,

$$V_0 = \frac{\Delta P R^2}{8L\mu} = \frac{\Delta P (2R_h)^2}{8L\mu} = \frac{\Delta P R_h^2}{2L\mu} \quad (2.27)$$

denklemini elde edilir.



Şekil 2.9 : Kapiler tüp modeli.

Üniform şekil ve büyüklükteki tanecikler için hidrolik yarıçap şu şekilde elde edilir:

$$R_h = \frac{\text{akış için uygun alan } X L}{\text{ıslak çevre } X L} = \frac{\text{akış için uygun hacim}}{\text{toplam ıslak yüzey}} \quad (2.28)$$

$$R_h = \frac{V_{\text{boşluk}} / V_{\text{toplam}}}{A_{\text{toplam}} / V_{\text{toplam}}} = \frac{\varepsilon}{NA_p / \left(\frac{NV_p}{1-\varepsilon}\right)} = \frac{\varepsilon V_p}{(1-\varepsilon)A_p} \quad (2.29)$$

Düzensiz şekilli olmayan malzemeleri tanımlamak için kullanılan eşdeğer hacim çapı ($d_{e\varnothing}$) hidrolik yarıçap ifadesinde yerine konduğunda

$$d_{e\varnothing} = 6 \frac{V_p}{A_p} \quad (2.30)$$

$$R_h = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \frac{d_{e\varnothing}}{6} \quad (2.31)$$

elde edilir.

Akışkanın yatak içinde katettiği yolun yatak yüksekliğinden farklı olduğu da dikkate alınmalıdır. Çünkü akışkan, yatak içinde düz bir yol değil kıvrımlı bir akım yolu izleyecektir. Bu da katedilen yolun yatak yüksekliğinin (L) 1,5-2 katı olması demektir. Diğer yandan, yüzeysel hız (V), boşluklar arasındaki hıza (V_0) kıyasla kullanımı daha çok tercih edilen bir parametre olmuştur. Yatak yüksekliği ve hız için ilgili bağıntılar Denklem 2.32 ve 2.33'de verilmiştir. τ , kıvrımlılığını göstermektedir.

$$L_e = L\tau \quad (2.32)$$

$$V_0 = \frac{V}{\varepsilon} \tau \quad (2.33)$$

Bu eşitlikler Hagen-Poiseuille denklemleri ile birleştirildiğinde,

$$\frac{\Delta P}{L} = 72\tau^2 \mu \frac{1}{d_{e\varnothing}^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} v \quad (2.34)$$

Denklem 2.34 elde edilir. Kıvrımlılık oldukça belirsiz fiziksel bir kavram olup doğrudan ölçülmesi mümkün değildir. $72\tau^2$ çarpımının belirlenmesindeki güçlükler nedeniyle bu çarpan genellikle sabit bir sayı (c_1) olarak alınmış ve yük kaybı-hız ilişkisinden yola çıkarak deneysel olarak belirlenmiştir. c_1 katsayısı literatürde Blake-Kozeny-Carman katsayısı olarak bilinmektedir. Denklem 2.34 Darcy denklemine

benzemekle beraber daha önce belirtildiği gibi yüksek hızlarda bu denklem geçerliliğini yitirmektedir.

Akışkanın hızındaki artışa bağlı olarak meydana gelen kuvvet (F_k) tanımlanırken karakteristik bir alan (S), hacim başına etkiyen kinetik enerji (K) ve boyutsuz bir parametre olan sürtünme faktörü (f) dikkate alınarak,

$$F_k = S.K.f \quad (2.35)$$

elde edilir. Borularda S ; ıslak alan olarak ifade edilirken, K ; $1/2\rho V_0^2$ olarak hesaplanır. Yarıçapı R olan dairesel bir boruda F_k için Denklem 2.36 elde edilir.

$$F_k = (2\pi RL)\left(\frac{1}{2}\rho V_0^2\right)f \quad (2.36)$$

Bununla beraber, genellikle kuvvet yerine yük kaybı ölçüldüğünden ($F_k = \Delta P \cdot \pi \cdot R^2$)

$$\Delta P = \left(\frac{L}{R}\right)\rho V_0^2 f \quad (2.37)$$

şeklinde yazılır. Denklem 2.31, 2.32 ve 2.33'deki hidrolik yarıçap, yatak yüksekliği ve hız ile ilgili düzeltmeler yerine konduğunda,

$$\frac{\Delta P}{L} = 3f\tau^3\rho \frac{1}{d_{es}} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} V^2 \quad (2.38)$$

denklemini bulunur. $3f\tau^3$ katsayısı ancak deneysel olarak belirlenebilen bir sabit olup Burke ve Plummer (1928) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar sebebiyle Burke-Plummer katsayısı (c_2) olarak adlandırılmıştır.

2.6.2 Ergun denklemi

Sabri Ergun, ABD'de Fizik eğitimi almış ve daha sonraki dönemlerde de akademik çalışmalarını ABD'de farklı üniversitelerde devam ettirmiş bir Türk bilim adamıdır. 1952 yılında ortaya koyduğu ve halen bir çok disiplinde yaygın olarak kullanılan denkleminin çalışmalarını Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, PA'da yürütmüştür. Sabit yataklarda gözlenen Re sayısı aralıklarının 1-10000 arasında olması ve bu geniş aralıkta kullanılabilecek geçerli tek bir denklemin bulunmaması Ergun denkleminin ortaya çıkmasında en önemli unsurlardan biri olmuştur.

Borularda akış ile sabit yataklarda akış arasında oldukça büyük benzerlik bulunmaktadır. Pürüzsüz borularda dahi laminar akış ile türbülanslı akış arasında keskin bir geçiş bölgesi gözlenmesinin akışkanın yol boyunca karşılaştığı daralma, genişleme ve yön değişimleri nedeniyle olduğu tahmin edilmektedir. Bu durum sabit yataklar açısından değerlendirildiğinde laminar akım şartlarında dahi hızın karesi ile doğru orantılı meydana gelebilecek yersel kayıpların varlığını işaret etmektedir. Dolayısıyla yük kaybı atalet ve viskoz kuvvetlerinin her ikisinin de etkisi altında oluşmaktadır. Sabit yataklarda da gözlenen durum bu şekildedir. Akışkanın düz değil kıvrımlı bir yol izlemesi, gözenek çaplarının sabit değil değişken olması meydana gelen yük kaybı için her iki akım rejiminin de dikkate alınmasını gerektirir. Ergun (1952a), laminar akım şartları için geçerli olduğu bilinen Blake-Kozeny-Carman denklemi ile türbülanslı akım şartlarını temsil eden Burke-Plummer denklemlerinin toplanabilir formda olduğunu ifade ederek günümüzde de hala yaygın bir şekilde kullanılmaya devam eden denklemini ortaya koymuştur.

$$\frac{\Delta P}{L} = k_1 \frac{\mu V}{(\psi d_{e\zeta})^2} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + k_2 \frac{\rho V^2}{(\psi d_{e\zeta})} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.39)$$

Ergun, farklı boyutlarda küreler, kum ve pulverize karbon ile gerçekleştirdiği 640 deney sonucunda k_1 ve k_2 katsayılarını 150 ve 1,75 olarak önermiştir. 2,54 cm çapında ve 75 cm uzunluğunda cam tüp şeklindeki düzenekte akışkan olarak CO_2 , N_2 , CH_4 ve H_2 gazları kullanılmıştır (Ergun, 1949).

Diğer yandan Leva ve diğ. (1947) tarafından önerilen gözeneklilik fonksiyonunun doğruluğunu kontrol etmek üzere çalışmalar yürütmüş ve viskoz enerji şartlarında $(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3$ teriminin, kinetik kayıpların olduğu şartlarda ise $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ teriminin geçerliliğini doğrulamıştır. Gözenekli malzemelerden oluşan bir yatakta, yatağın gözenekliliğinin (ε) hesaplanabilmesi için malzemenin yoğunluğunun doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Gözenekli malzemelerin yoğunluğunu belirlemek üzere farklı yöntemler mevcut olmakla beraber bu değerlerin gözeneklilik hesaplarında kullanılabilmesi için düzeltme faktörlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum ise yük kaybının gözeneklilik parametresi ile ilişkisinin doğruluğu hakkında şüphe uyandırmaktadır. Ergun (1951), tüm bu çelişkileri gidermek amacıyla gözenekli malzemelerin yoğunluğunun belirlenmesi için gaz akışına dayan bir metot geliştirmiş ve metodun doğruluğunu gözenekli olmayan malzemeler ile de test ederek uyumlu sonuçlar aldığını belirtmiştir.

Sabit yataklarda yük kaybını tahmin etmek üzere önerilen çok sayıda denklem mevcut olmasına rağmen, Ergun denklemi nispeten basit yapısı nedeniyle çok tercih

edilen bir denklem olmuştur. Ancak denklemdeki k_1 ve k_2 katsayılarının herhangi bir fiziksel teoriye dayanmaması, yalnızca dataya en iyi uyum sağlayan değerler olma özelliği taşıması bu katsayılar ve denklemin geçerli olduğu koşullar üzerinde uzun yıllardan beri devam eden tartışmalara neden olmuştur. Kimi çalışmalarda denklemde yer alan yatak gözeneklilik parametresinin Ergun tarafından kabul edildiği şekilde ortalama bir değer olarak alınamayacağı, kimilerinde ise gözeneklilik fonksiyonunun üstel değerlerinin değiştirilmesi gerektiği iddia edilmiştir (MacDonald, 1979; Zhao ve diğ., 2005; Gibilaro ve diğ., 1985). Bir grup çalışma Ergun denkleminin duvar etkisi olayını gözönüne almadığı ve bu konuda geliştirilmesi gerektiği üzerine yoğunlaşmıştır (Eisfeld ve Schitzlein, 2001; Montillet ve diğ., 2001; Montillet ve diğ. 2007). Ancak bu konuda da farklı görüşler mevcuttur. Bazı araştırmacılar duvar etkisinin yük kaybını artırıcı yönde etki oluşturduğunu (Carman, 1937; Mehta ve Hawley, 1969), bazıları ise yük kaybında azalma gözlediklerini belirtmişlerdir (Foumeny ve diğ., 1993, Sonntag, 1960; Andersson, 1963). Diğer bir grup ise yük kaybında meydana gelen değişimin Re sayısına bağlı olduğunu (Reddy ve Joshi, 2008), laminar akımda yük kaybının arttığını, türbülanslı akım rejiminde ise azaldığını belirtmiştir (Reichelt, 1972; Rose ve Rizk, 1949). Yine Re sayısı ile ilişkiyi vurgulayan Hicks (1970), Tallmadge (1970), Lee ve Ogawa (1974), Ergun denkleminin yüksek Re sayılarında geçerli olmadığını iddia etmiş ve yeni modeller önermişlerdir.

Son yıllarda gerçekleştirilen bazı çalışmalar ise Ergun denkleminin dayandığı kapiler tüp modeli yerine farklı modeller kullanmak üzerine geliştirilmiştir. Wu ve diğ. (2008) gözenekleri genişleyen-daralan kanallar olarak düşünmüş ve Ergun denkleminde yer alan k_1 ve k_2 katsayıları yerine gözenek geometrisine bağlı terimler içeren ifadeler kullanılmasını önermiştir (Denklem 2.40). Bu sayede denklemde yer alan tüm parametrelerin fiziksel bir dayanağının olduğu iddia edilmektedir.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{72\mu\tau(1-\varepsilon)^2V}{D_p^2\varepsilon^3} + \frac{3\tau(1-\varepsilon)\rho V^2\left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2}\right)}{4\varepsilon^3D_p} \quad (2.40)$$

τ , kıvrımlılık Yu ve Li (2004) tarafından önerildiği şekilde kullanılmıştır.

$$\tau = \frac{1}{2} + \left[1 + \frac{1}{2}\sqrt{(1-\varepsilon)} + \sqrt{(1-\varepsilon)} \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon}} - 1\right)^2 + \frac{1}{4}}}{1 - \sqrt{1-\varepsilon}} \right] \quad (2.41)$$

Tanecikler arasındaki ortalama mesafe ile tanecik çapının toplamı gözenek çapı olarak tanımlanmıştır. Gözenek çapının, tanecikler arasındaki ortalama mesafeye oranı ise β 'yı verir.

$$\beta = \frac{1}{(1 - \sqrt{1 - \varepsilon})} \quad (2.42)$$

Aynı denklem Ergun denklemi ile kıyaslayabilmek bakımından boyutsuz birimlere dönüştürülerek yazılırsa Denklem 2.43 elde edilir.

$$f_v = \frac{\Delta P}{L} \frac{D_p^2 \varepsilon^3}{\mu v (1 - \varepsilon)^2} = 72\tau + \frac{3\tau}{4} \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{\beta^4} - \frac{5}{2\beta^2} \right) Re_m \quad (2.43)$$

$$Re_m = \frac{\rho (\psi d_{e\vartheta}) V}{\mu (1 - \varepsilon)} \quad (2.44)$$

Ergun denkleminin aynı boyutsuz büyüklükler ile düzenlenmiş hali aşağıda verilmiştir.

$$f_v = 150 + 1,75 Re_m \quad (2.45)$$

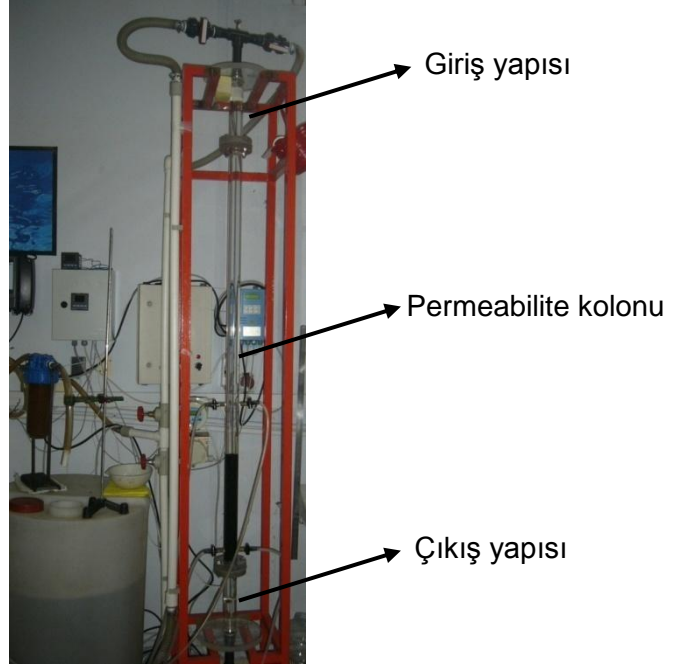
3. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan düzenekler, malzemeler, izlenen parametreler, ölçüm prensipleri ve deneyler sırasında karşılaşılan güçlükler ile bunları gidermek için uygulanan yöntemler anlatılmıştır.

3.1 Permeabilite kolonu- 4 cm.çapında

Pleksiglas malzemeden imal edilmiş olan kolon silindirik olup iç çapı 4 cm.'dir. Kolonun iç çapı çok sayıda farklı noktalardan kumpas ile yapılan ölçümler sonucu belirlenmiştir.

Kolon, giriş yapısı (25 cm), permeabilite kolonu (150 cm) ve çıkış yapısı (25 cm) olmak üzere 3 kısımdan meydana gelmektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Permeabilite kolonu (4 cm).

Giriş yapısı, kolon ve çıkış yapısı flanşlarla birbirine bağlanmıştır. Akış sırasında sızmayı engellemek için flanşlar arasına silikon conta yerleştirilmiştir. Gerek yukarıdan aşağı akış (permeabilite), gerek aşağıdan yukarı akış halinde malzeme kaybını önlemek amacıyla bu silikon contaların arasına paslanmaz çelik

malzemeden 2 farklı gözenek çapında (100 mikron ve 1 cm) elek yerleştirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : Flanş yapısı, silikon conta ve elekler.

3.2 Permeabilite kolonu (10,04 cm. çapında)

Pleksiglas malzemeden imal edilmiş olan kolon silindirik olup iç çapı 10,04 cm'dir (Şekil 3.3). Kolonun iç çapı çok sayıda farklı noktadan kumpas ile ölçüm yaparak belirlenmiştir. 4 cm çaplı kolonda olduğu şekilde giriş, çıkış yapıları ve kolon arasında flanş bağlantıları kullanılmış ve silikon contalar flanşlar arasına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.3 : Permeabilite kolonu (10,04 cm).

3.3 Deneysel Çalışma Sistemi

Deneysel akışkan olarak şebeke suyu kullanılmıştır. Su, 200 L hacmindeki polietilen bir depodan sisteme pompa ile beslenmiş ve sürekli olarak geri devrettirilmiştir. Pompa emme yüksekliğinin fazla olmasını sağlamak amacıyla deponun pompadan daha yukarı bir seviyeye yerleştirilmesine dikkat edilmiştir. Permeabilite sırasında hedeflenen yük kaybı değerlerine ve malzemenin yoğunluğuna bağlı olarak 0,5 HP veya 1,5 HP gücünde pompa kullanılmıştır. Pompa devrinin sabit kalması su hızının ve sıcaklığının değişmemesi açısından çok önemli olduğundan bir frekans konvertöründen faydalanılmıştır. Şebeke suyunda ve sistemde bulunması muhtemel partiküler maddeleri tutabilmek amacıyla gözenek çapı 5 mikron olan kartuş filtre kullanılmıştır. Sistemde basınç azalmasına bağlı olarak gözlenen hava kabarcığı problemini gidermek için kartuş filtre farklı noktalarda denenmiş ve sistem çıkışının (suyun kolon içinden geçtikten sonra tekrar depoya döküldüğü nokta) en uygun yer olduğuna karar verilmiştir.

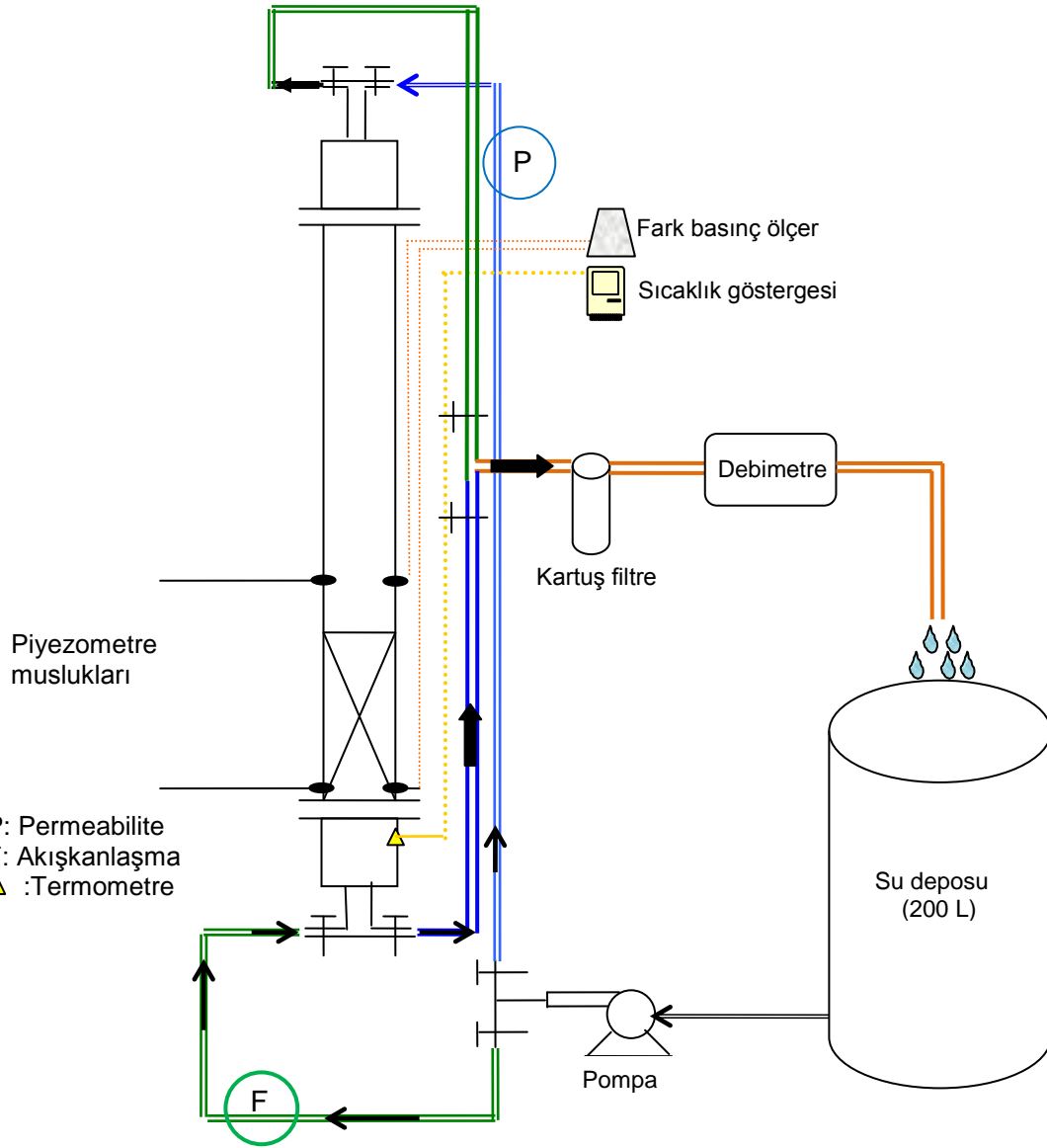
Deney sistemi permeabilite çalışmaları yürütmek üzere tasarlanmakla beraber, giriş ve çıkış yapıları yatak gözenekliliğini ayarlamak amacıyla akışkanlaşmaya da imkan sağlayacak şekilde düzenlenmiştir. Giriş ve çıkış yapılarında kullanılan bağlantı elemanları ve vanalar PVC malzemedan seçilmiştir. Bu sayede metal aksamda gözlenebilecek korozyonun önüne geçilmiş ve ayrıca metal bağlantı elemanları kullanılması durumunda birleşim noktalarında oluşabilecek aşırı yüklenmeye bağlı muhtemel çatlama/kırılma problemleri engellenmiştir. Kolon, demir malzemedan yaptırılmış bir iskeleye sabitlenmiş ve dengede olup olmadığı su terazisi ile kontrol edilmiştir. Zeminden kaynaklanan eğrilik nedeniyle iskele bir platform üzerine oturtulmuş ve yüksekliği ayarlanabilir bağlantı parçaları ile platformun dengede olması sağlanmıştır. Her deneyden önce ve deney sırasında kolonun denge durumu kontrol edilmiştir. Sistemin şematik gösterimi Şekil 3.4'de verilmiştir.

3.4 İzlenen Parametreler

3.4.1 Debi

Sistemde iki adet elektromanyetik debi ölçer mevcuttur. Elektromanyetik debimetre Faraday'ın indüksiyon prensibine göre ölçüm yapmaktadır. Bu cihaz, boruyu çevreleyen manyetik sarımdan ve borunun iç yüzeyi ile aynı hızda çap boyunca boruyu delerek geçirilmiş iki elektrottan oluşur. Bu elektrotlar akışkanla temas halindedir ancak akışa müdahale etmezler ve dolayısıyla hiç bir yük kaybı

oluşturmazlar. Elektrotlar bir gerilim ölçere bağlanmıştır. Elektrik akımı verildiğinde sarımlar manyetik alan oluşturur ve bir voltmetre elektrotlar arasındaki gerilim farkını



Şekil 3.4 : Deney sisteminin şematik gösterimi.

ölçer. Bu gerilim farkı iletken akışkanın akış hızı ile doğru orantılıdır, böylece akış hızı gerilim farkı ile ilişkilendirilerek hesaplanabilir.

Euromag MC 308 model debimetrenin (DN 10 çapında) ölçüm aralığı 0,47 – 47 L/dk (Şekil 3.5) iken diğer Euromag MC 308 model debimetrenin (DN 6 iç çapında) ölçüm aralığı 0,17 – 17 L/dk'dır (Şekil 3.6).

Her iki debimetre de manuel olarak yapılan ölçümler ile her deney sırasında kontrol edilmiştir. Manuel debi ölçümü bir kronometre yardımıyla belirli hacimdeki bir mezürün ne kadar sürede dolduğunun belirlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Deney

sırasında DN6 debimetresinin ölçüm aralıklarının dışında kalan debi değerleri için DN10 debimetresi kullanılmıştır. Debinin (Q) kolonun kesit alanına (A) oranlanması ile hesaplanan yüzeysel hız ($V=Q/A$) çalışmanın bundan sonraki kısımlarında “hız” olarak anılacaktır.



Şekil 3.5 : Elektromanyetik debimetre (DN 10).



Şekil 3.6 : Elektromanyetik debimetre (DN 6).

3.4.2 Sıcaklık

Kolonun çıkış yapısına monte edilen Pt-100 termometre (Şekil 3.7) ile akışkanın sıcaklığı sürekli olarak ölçülmüş ve göstergeye (Şekil 3.8) aktarılmıştır.



Şekil 3.7 : Pt-100 termometre.



Şekil 3.8 : Sıcaklık göstergesi.

3.4.3 Yük kaybı

Yük kaybı ölçümü için piyezometre musluklarından yararlanılmıştır (Şekil 3.9). Kolon üzerine monte edilen 2 adet piyezometre musluğunun biri alt flanştan itibaren 4 cm çaplı kolonda 3,8 cm yukarıya, 10,04 cm çaplı kolonda ise 2,92 cm yukarıya yerleştirilmiştir (Şekil 3.10). Diğer piyezometre musluğu her iki kolonda da alt flanştan 60 cm yukarıda bulunmaktadır. Ayrıca sisteme 2 adet ilave piyezometre musluğu mevcut piyezometre muslukları ile eş yükseklikte olacak şekilde monte edilmiştir. Bu sayede kolon çevresi boyunca eş yükseklikte farklı noktalarda aynı basınç (yük kaybı) değerinin varlığı kontrol edilmiştir.

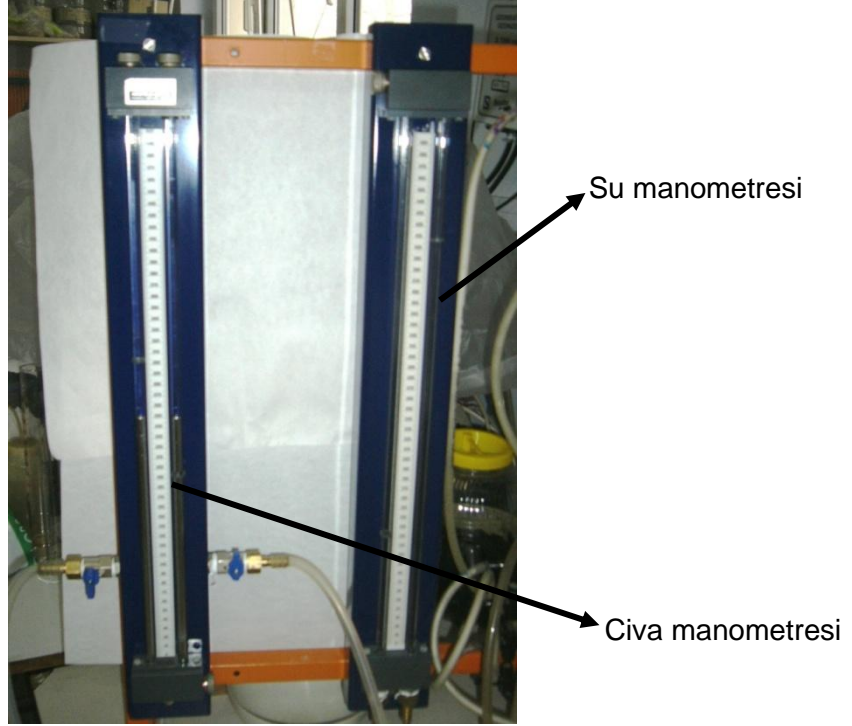


Şekil 3.9 : Piyezometre musluğu.



Şekil 3.10 : 4 cm lik ve 10 cm lik kolonda piyezometre musluklarının yerleşimi.

Yük kaybı, Armfield W3 Akışkanlaşma-Permeabilite düzeneğindeki su manometresi, civa manometresi (Şekil 3.11) veya fark basınç ölçer cihazı (Şekil 3.12) kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 3.11 : Armfield W3 Akışkanlaşma-Permeabilite düzeneğindeki su ve civa manometresi.

SHHDP-5400 model fark basınç ölçüm cihazının ölçüm aralığı 0-2500 mm H₂O olup hassasiyeti 0.075% olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.12 : Fark basınç ölçer.

Deneylerde hangi sistem/sistemler ile yük kaybının ölçüleceğine malzemenin oluşturacağı öngörülen yük kaybı değerlerine ve cihazların ölçüm aralıklarına göre karar verilmiştir.

Küreler ve kum, perlit, garnet, kırık cam gibi doğal malzemelerde yüksek yük kayıpları gözlemlendiğinden 50 cm'ye kadar olan değerler su manometresi ile, daha

yüksek değerler civa manometresi ile ölçülmüştür. Civa manometresi ile okunabilen en yüksek yük kaybı değeri 6 m'dir. Küresel olmayan düzgün şekilli malzemelerde ise daha düşük yük kayıpları olduğundan fark basınç ölçer kullanılmıştır. Fark basınç ölçer kalibre edilmiş olarak teslim alındığından ayrıca kalibrasyon işlemi uygulanmamıştır. Ancak cihazın doğruluğu kullanıldığı her deneyde belirli akışkan hızları için su manometresi ile karşılaştırılarak test edilmiştir.

3.5 Permeabilite Deneyinin Yürütülüşü ve Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

Yaklaşık 50 cm yükseklik oluşturacak miktarda malzeme kolona yerleştirilmeden önce yıkanmış ve etüvde kurutulmuştur. Gerek tartım sırasında gerek malzemenin kolona aktarılması sırasında malzeme kaybı olmamasına özen gösterilmiştir. Ayrıca malzemenin hem kolona yerleştirilmesi hem de kolondan boşaltılması işlemlerini daha rahat yapabilmek için özel olarak tasarlanmış eğimli bir düzenek kullanılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 : Malzemenin kolona yerleştirilmesi için kullanılan düzenek.

Permeabilite deneylerine başlamadan önce su aşağıdan yukarı doğru verilerek (akışkanlaştırma) malzeme içinde bulunan hava kabarcıkları uzaklaştırılmıştır. Pompanın devri yavaş yavaş azaltılarak akışkanlaşma sona erdirilmiş ve yatağın en gevşek durumuna gelmesi sağlanmıştır.

Daha düşük gözeneklilik değerlerinde (yatağın daha sıkı olması) çalışılması planlanıyorsa çekiç benzeri bir cisim yardımıyla kolonda malzemenin bulunduğu kısma her yönden çok yavaşça vurulmuş ve malzemenin sıkışması sağlanmıştır.

Sistem permeabilite konumuna getirildikten sonra yatak en gevşek halinde ise deney verisi kaydetmeye başlamadan önce su hızı kademeli olarak artırılmış ve

malzemenin çökmesi sağlanmıştır. Böylece deney esnasında malzeme yüksekliğinin değişmesi önlenmiştir. Yatağın sıkı olduğu durumlarda ise böyle bir uygulama yapılmamıştır. Deney sırasında malzeme içine hava kabarcığı girip girmediğini kontrol edebilmek amacıyla yük kaybı ölçülürken 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 hiç hava kabarcığı bulunmadığını göstermiştir. Her deneyin sonrasında malzeme akışkanlaştırılmış, hava kabarcığı olup olmadığı göz ile de kontrol edilmiştir. Her malzeme ile en az 3 farklı gözeneklilik değerinde deneyler yapılmıştır.

Deney sırasında debi, yük kaybı ve sıcaklık parametreleri büyük bir dikkatle sürekli olarak takip edilmiştir. Suyun yoğunluk ve viskozite değerleri sıcaklığa bağlı olarak aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır (Perry ve Green, 1997) .

$$\mu = \frac{0,001}{0,021482[T - 8,435 + (T^2 - 16,87T + 8149,5492)^{1/2}] - 1,2} \quad (3.1)$$

μ : Dinamik viskozite, (kg/m/sn)

T : Sıcaklık, (°C)

ρ : Yoğunluk (kg/m³)

$$\rho = 999,84 + 0,066436T - 0,008793T^2 + 7,8934 \cdot 10^{-5}T^3 - 4,9115 \cdot 10^{-7}T^4 \quad (3.2)$$

Su akışının yukarıdan aşağıya doğru olduğu permeabilite deneyinde basınç azalmasına bağlı olarak hava kabarcığı oluşumu karşılaşılan en önemli sorundur. Yatak gözenekliliğinin doğrulukla tespit edilebilmesi ve ölçülen yük kaybı değerlerinin güvenilirliği açısından sistemde hiç hava kabarcığı bulunmamasına özen gösterilmesi gerekmektedir (Montillet, 2007). Hava kabarcığı oluşumu engellenmediği takdirde bu kabarcıklar malzeme içine girerek boşlukların azalmasına, dolayısıyla ilave yük kaybına neden olurlar. Özellikle akışkan olarak su kullanılan sistemlerde takip ve kontrol mekanizması çok iyi olmalıdır. Bu çalışma kapsamında hava kabarcığı problemini engellemek üzere sistemde uygulanan çeşitli düzenleme/değişiklikler aşağıda sıralanmıştır:

Kartuş filtre için en uygun yerin belirlenmesi: Daha önce pompa çıkışında yani kolonun giriş noktasında bulunan kartuş filtre sistemin çıkış noktasına yerleştirilmiştir. Gerek permeabilite gerekse akışkanlaşma durumunda kolondan çıkan suyun önce kartuş filtreden, sonra debimetrelerden geçerek depoya serbest şekilde dökülmesi sağlanmıştır.

Purjör: Oluşan hava kabarcıklarını sistemden uzaklaştırmak amacıyla her iki kolonun da giriş yapısında en tepe noktaya manuel olarak kontrol edilebilen purjör takılmıştır (Şekil 3.14). 10,04 cm çaplı kolonda bu uygulamanın yetersiz kaldığı görülmüş ve mevcut sistem yerine zaman rölesine bağlı olarak çalışan, gerek görülmesi halinde sürekli açık kalabilen otomatik purjör sistemi monte edilmiştir (Şekil 3.15). Sürekli açık kalma durumunda çıkan su bir hortum ile depoya geri verilmiştir.



Şekil 3.14 : Manuel olarak kullanılan purjör.



Şekil 3.15 : Otomatik purjör sistemi.

Giriş yapısı: 10,04 cm. çaplı kolonda akışkanlaştırma sırasında malzeme içinden çıkan hava kabarcıklarının bütünüyle çıkış hattından uzaklaştırılamadığı, bir kısmının giriş yapısına tutunduğu gözlenmiştir. Sistem daha sonra deney yapmak üzere permeabilite konumuna getirildiğinde giriş yapısına tutunmuş olan

kabarcıkların malzemenin içine girdiği görülmüştür. Bu durumu engellemek üzere düz olarak tasarlanmış giriş yapısı konik hale getirilmiştir (Şekil 3.16).



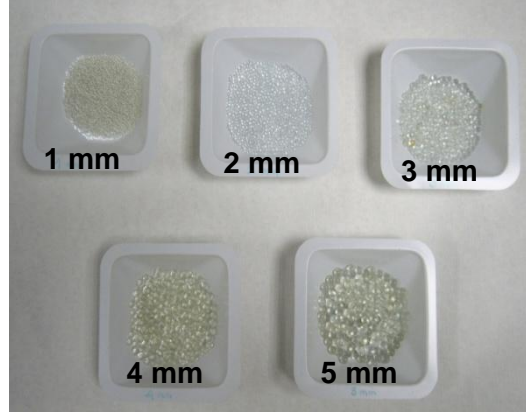
Şekil 3.16 : Konik hale dönüştürülmüş giriş yapısı.

Düzgün geometrik şekilli malzemeler plastik enjeksiyon yöntemi ile imal edildiğinden hammadde olarak Naylor 6 ve delrin malzemesi kullanılmıştır. Her iki maddenin de yoğunluğu suya oldukça yakın değerdedir (Naylor 6: 1,13 g/cm³, Delrin: 1,37 g/cm³). Bu maddelerden imal edilmiş malzemeler kolonda su ile ilk defa temas ettiklerinde yüzeylerine hava kabarcıklarının tutunduğu gözlenmiştir. Bu nedenle deneye başlamadan önce tüm hava kabarcıklarının uzaklaştırılması için malzeme kolon içinde 4-5 gün bekletilmiştir.

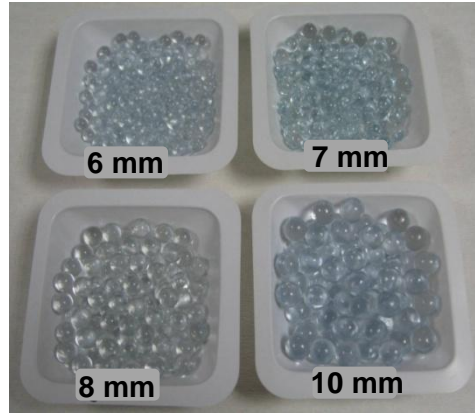
3.6 Malzemeler

3.6.1 Küresel malzemeler

9 farklı çapta cam küre ile çalışılmıştır. Marienfield-Superior marka 1-2-3-4-5 mm çapındaki cam küreler (soda lime glass) (Şekil 3.17) Şahinler Kimya Bilgisayar ve Tekstil Kozmetik San. Tic. Ltd. Şti. tarafından 1 kg'lık ambalajlar halinde temin edilmiştir. 6-7-8-10 mm çapındaki cam küreler (Şekil 3.18) ise yurtdışından temin edilmiştir. Tüm malzemeler deneysel çalışmada kullanılmadan önce yıkanmış ve 103°C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur.



Şekil 3.17 : 1-2-3-4-5 mm çaplı cam küreler.














Şekil 3.18 : 6-7-8-10 mm çaplı cam küreler.

3.6.2 Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler

Halka şeklinde 3, silindir şeklinde 2, dikdörtgenler prizması şeklinde 2, tablet şeklinde 1, üçgen prizma şeklinde 1 ve küp şeklinde 2 adet olmak üzere farklı ölçülerde toplam 11 değişik şekilde malzeme ile çalışılmıştır. Malzeme boyut ve hammadde bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

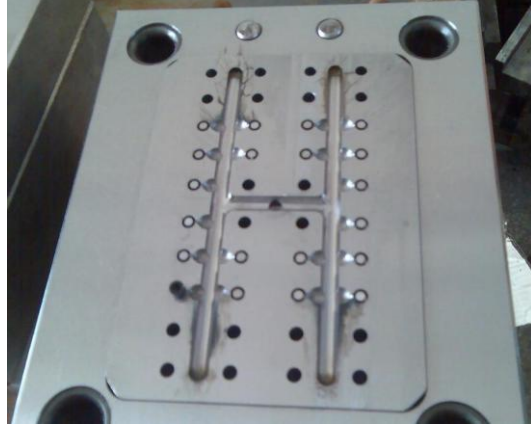
Malzemeler plastik enjeksiyon kalıp (Şekil 3.19) yöntemi ile özel sipariş üzerine Murat Kalıp ve Plastik Tic. Ltd. Şti. tarafından imal edilmiştir. Halka ($d_{iç}$: 3 mm, $d_{dış}$: 4,93 mm, h: 4,19 mm), küp (a: 4,01 mm) ve üçgen prizma (a: 3,46 mm, h: 3,89 mm) şekline ait kalıp setleri Şekil 3.20-3.22’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler.

Malzeme	Boyut, mm	Ham madde	Malzeme	Boyut, mm	Ham madde
 Halka-1	$d_{iç}: 3$ $d_{dış}: 4,93$ $h: 4,19$	Naylon6	 Halka-2	$d_{iç}: 1,84$ $d_{dış}: 4,78$ $h: 4,09$	Delrin
 Halka-3	$d_{iç}: 3,49$ $d_{dış}: 4,90$ $h: 4$	Delrin	 Silindir-1	$d: 3,90$ $h: 3,99$	Delrin
 Silindir-2	$d: 2,89$ $h: 5,11$	Delrin	 Tablet	$d: 4,80$ $h: 2,98$	Delrin
 Dikdörtgenler prizması-1	$a: 5,01$ $b: 5,01$ $c: 2,87$	Delrin	 Dikdörtgenler prizması-2	$a: 2,91$ $b: 2,93$ $c: 4,98$	Delrin
 Üçgen prizma	$a: 3,46$ $h: 3,89$	Naylon6	 Küp-1	$a: 4,01$	Naylon6
 Küp-2	$a: 3,99$	Delrin			



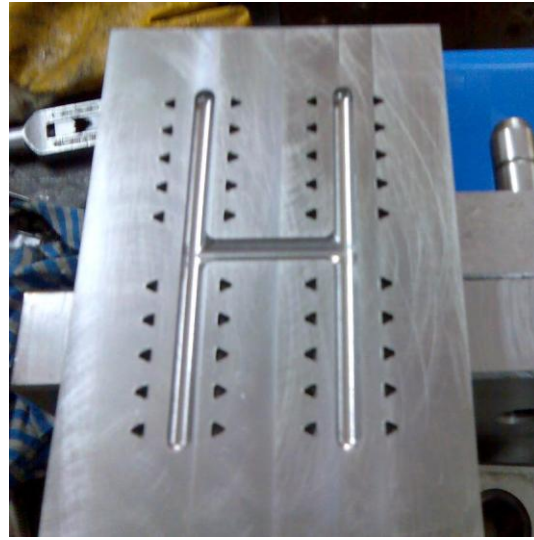
Şekil 3.19 : Plastik enjeksiyon makinası.



Şekil 3.20 : Halka şekline ait kalıp seti.



Şekil 3.21 : K p Şekline ait kalıp seti.



Şekil 3.22 :  ĝgen prizma Şekline ait kalıp seti.

Baskı işlemi sonrasında malzemelerin içinde bazı ipliksi kalıntılar ve bozuk Şekli malzemeler (Şekil 3.23) bulunduĝu görülmüştür. Bu nedenle deney öncesinde tüm malzemeler ayıklanmıŐ, yikanmıŐ ve 50 C sıcaklıktaki etüvde kurutulmuştur.



Şekil 3.23 : Hatalı üretilmiş malzemeler.

3.6.3 Düzgün şekilli olmayan malzemeler (Doğal malzemeler)

Bu kapsamda kum, perlit, garnet ve kırık cam ile çalışılmıştır.

Kum, İSKİ Kağıthane İçme Suyu Arıtma Tesisi'nden temin edilmiştir. Deney öncesinde ön işlem olarak yıkama ve kurutma işlemleri uygulanmıştır (Şekil 3.24).



Şekil 3.24 : Kum için uygulanan ön işlemler: Yıkama ve kurutma.

Perlit, İzmir Cumaovası Etiper Perlit İşletmeleri'nden kırılmış olarak temin edilmiştir. Perlit mineralinin elde edilmesinde uygulanan adımlar şu şekildedir: Açık stok sahasından getirilen perlit cevheri 40 cm aralıklı ızgara üzerine dökülerek ham perlit silosuna alındıktan sonra silodan besleyici vasıtasıyla çeneli kırıcıya gönderilir. Çeneli kırıcıdan 60 mm'den küçük boyutlarda çıkan cevher 3 bölmeli ham perlit silosunda toplanır. Buradan döner kurutucu fırınına gelir. Döner kurutucu fırına giren 300°C sıcaklıktaki hava ile perlit cevherinin serbest nemi alınıp buradan çelik siloya gönderilir. Çelik silo altından titreşimli besleyici ile konveyör banta verilir. Buradan iki katlı titreşimli eleğe beslenir. 2,36 mm üzeri impakt kırıcıya kırılmak üzere geri dönüş bantına verilir. 1,2-2,36 mm arası siloya gönderilir. 1,2 mm altı malzeme tek katlı (0,6 mm) eleğe beslenir. Elek üzeri 0,6-1,2 mm siloya gönderilir. Elek altı ise 0-0,6 mm ise havalı seperatörden geçirilerek tozu alınır (0-0,250 µm) ve ayrı bir siloya gönderilir. Siloda (0-0,6 mm), (0,6-1,2 mm) ve (1,2-2,4 mm) ebatlarında stoklanır. İşletmede bu işlemlere maruz kalan perlit mineralinin 0,6-1,2 mm ve 1,2-2,4 mm aralığındaki iki fraksiyonu İTÜ Çevre Mühendisliği Laboratuvarı'na gönderilmiş ve deneysel çalışmalar bu numuneler üzerinde yürütülmüştür. Fakat işletmenin 2007 yılı itibariyle kapanmış olması nedeniyle ancak tesiste kalan miktarda malzeme tedarik edilebilmiştir. Bu nedenle perlit ile tüm deneyler 4 cm çaplı kolonda yürütülmüştür.

Garnet, İstanbul'da bulunan Karma Yat Teknik Firması'ndan temin edilmiş ve ön işlem olarak yıkama ve kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Buna rağmen garnet ve perlit minerali kolona yerleştirilip, yatak gözenekliliğini ayarlamak üzere malzeme

genişletildikten sonra malzemenin üst kısmında daha açık renkli bir tabakanın olduğu görülmüştür (şekil 3.25). Bu durumun malzeme içinde bulunabilecek safsızlıklardan kaynaklandığı ve bu miktarın malzeme yoğunluğunu etkileyeceği düşünülerek deneye başlamadan önce malzemeler ayrı bir kolonda safsızlıklar giderilinceye kadar yıkanmıştır. Deneyler, malzeme tekrar kurutulduktan sonra gerçekleştirilmiştir.



şekil 3.25 : Perlit minerali içindeki safsızlıkların oluşturduğu tabaka.

Kırık cam, şişecam- Anadolu Cam Sanayi A.ř.'den temin edilmiştir. Geri kazanılmış camın kırılarak elenmesi ile elde edilen pulverize cam, hızlı filtrasyon için önerilen yeni bir malzeme çeşidi olup kum yerine kullanıldığı zaman daha ekonomik olacağı konusunda çeşitli çalışmalar mevcuttur (Aqua Test, 1995; Elliot, 2001; Evans ve diğ., 2002; Piccirillo ve Letterman, 1997; Rutledge ve Gagnon 2002, Akgiray ve diğ., 2007).

Karışık tane boyutunda temin edilen tüm malzemelerin (kum, perlit, garnet, kırık cam) farklı çap aralıklarına (fraksiyonlara) ayrılması işlemi ASTM C136-06 (2006) standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. Malzeme elek sarsıcı cihazda (Retsch AS 200, şekil 3.26) uygun olduğu öngörülen standart eleklerde 10 dakika elendikten sonra, 1 dakika elde eleme işlemi sürdürülmüştür. Standartta, her elek için aşağı geçen malzeme miktarının elek üzerinde kalan malzemenin ağırlıkça %1'inden az oluncaya kadar eleme işlemine devam edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bunun için ilk 1 dakikalık sürenin bu kriteri sağlamakta yeterli olmadığı durumlarda elde eleme işlemi kriter sağlanıncaya kadar sürdürülmüştür.



Şekil 3.26 : Elek sarsıcı cihaz (Retsch AS 200).

Amerikan Standart Elek Serileri - ASTM E11:01 de belirtilmiş olan ve bu çalışmada kullanılan elek çapları Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : Amerikan Standart Elek Serileri - ASTM E11:01.

Standart, mm	Gösterim	Alternatif
2,36		No.8
2,00		No.10
1,70		No.12
1,40		No.14
1,18		No.16
1,00		No.18
0,85		No.20
0,71		No.25
0,60		No.30
0,50		No.35

3.7 Yoğunluk Ölçümü

Yoğunluk, cam malzemeden imal edilmiş farklı hacim (50 cm^3 , 100 cm^3) seçenekleri bulunan piknometre şişeleri ile tayin edilmiştir. Bu yöntem ile katı maddelerin özgül ağırlığı malzemenin su ile yerdeğiştirmesi esasına dayanarak belirlenmektedir. Metot şu şekilde uygulanmıştır:

- Etüvde kurutulup desikatörde soğutulan piknometre şişesinin kapaksız olarak tartılması.
- Piknometrenin tamamen su ile doldurulup, kılcal bir boruya sahip olan kapağın kapatılması, fazla suyu taşıtarak kapağın çıkarılması ve piknometrenin cidarlarının kurularak tartılması.
- Piknometrenin içindeki suyun tamamen boşaltılması ve piknometrenin tartılması.
- İçi ıslak piknometreye etüvde kurutulup desikatörde soğutulmuş malzemenin bir miktar konması ve tartılması.
- İçinde malzeme bulunan piknometrenin tamamen su ile doldurulup kapağının kapatılması. Ardından malzemenin tamamının ıslanması ve taneler arasında hava boşluğu kalmaması için piknometrenin çalkalanması, gerekli ise cidarlarına hafifçe vurulması. Kapağın çıkartılıp cidarın kurularması ve piknometrenin tartılması.
- Su sıcaklığının ölçülmesi.

Yukarıdaki adımlar izlenerek hesaplamalar yapılmış ve malzemenin deney yapılan sıcaklıkta özgül ağırlığı tayin edilmiştir. Aynı sıcaklıkta suyun yoğunluk değeri de kullanılarak malzeme yoğunluğu hesaplanabilmiştir. Örnek oluşturmak üzere 1,00-1,18 mm kum fraksiyonuna ait yoğunluk tayini için hesap adımları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

3.8 Malzeme Çapının Belirlenmesi

3.8.1 Mikrometre ile çap tayini

Mikrometre (Şekil 3.27), cisimlerin ölçülerini 1/1000 mm hassasiyetle ölçmeye yarayan bir ölçüm aletidir. Mikrometre milinin üstündeki yatay çizgi 25 taksimata bölünmüş olup taksimatlar arası 1 mm açıklığındadır. Ayrıca, 1/2 milimetreyi gösteren çizgilerle ikiye ayrılmışlardır.

Çizelge 3.3 : Yoğunluk hesaplama örneği.

	1,00-1,18 mm kum				
	Su sıcaklığı:19,8°C				
1. Kuru piknometre ağırlığı	31,539	31,539	31,539	31,539	31,539
2. Tamamen su ile dolu piknometre ağırlığı	131,597	131,597	131,597	131,597	131,597
3. İçi ıslak piknometrenin ağırlığı	31,859	31,796	31,750	31,784	31,770
4. İçi ıslak piknometre+ malzeme ağırlığı	70,147	72,103	68,614	73,274	70,744
5. Piknometre+malzeme+tamamen su dolu ağırlık	155,262	156,561	154,428	157,278	155,744
6. Malzeme ağırlığı= 4-3	38,288	40,307	36,864	41,49	38,974
7. Piknometreyi doldurmak için su ağırlığı= 2-1	100,058	100,058	100,058	100,058	100,058
8. Malzeme üzerine piknometreyi doldurmak için konulan ilave su ağırlığı= 5-1-6	85,435	84,715	86,025	84,249	85,231
9. Eşdeğer su ağırlığı= 7-8	14,623	15,343	14,033	15,809	14,827
10. Deney yapılan sıcaklıkta malzemenin özgül ağırlığı= 6/9	2,618341	2,627061	2,626951	2,624454	2,628583
11. Deney yapılan sıcaklıkta suyun yoğunluğu (g/cm ³)	0,998243	0,998243	0,998243	0,998243	0,998243
12. Malzemenin yoğunluğu=10*11 (g/cm ³)	2,614	2,622	2,622	2,620	2,624
	Ort. yoğunluk (g/cm³):			2,620	



Şekil 3.27 : Mikrometre.

Mikrometre küresel malzemeler ile küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler için oldukça kullanışlı ve hassas sonuçlar veren bir alet olmasına karşın, düzgün olmayan malzemelerde değişik noktalardan alınan ölçümlerin farklı neticeler vermesi nedeniyle çap tayininde kullanılması uygun görülmemiştir.

Bu çalışmada kullanılan ve nominal çap değeri 1-2-3-4-5-6-7-8-10 mm olduğu ifade edilen kürelerin mikrometre ile ölçülen çapları Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Çalışmada kullanılan kürelerin mikrometre ile belirlenen çap değerleri.

Nominal küre çapı, mm	Mikrometre ile ölçüm sonucu, mm	Ölçüm sayısı	Standart sapma
1	1,23	25	0,07
2	2,05	22	0,06
3	3,09	20	0,05
4	4,02	20	0,05
5	4,89	20	0,06
6	5,96	20	0,09
7	7,12	20	0,07
8	7,86	20	0,09
10	9,99	20	0,06

Düzgün şekilli malzemelerin mikrometre ile belirlenen boyutları Çizelge 3.5’de gösterilmiştir.

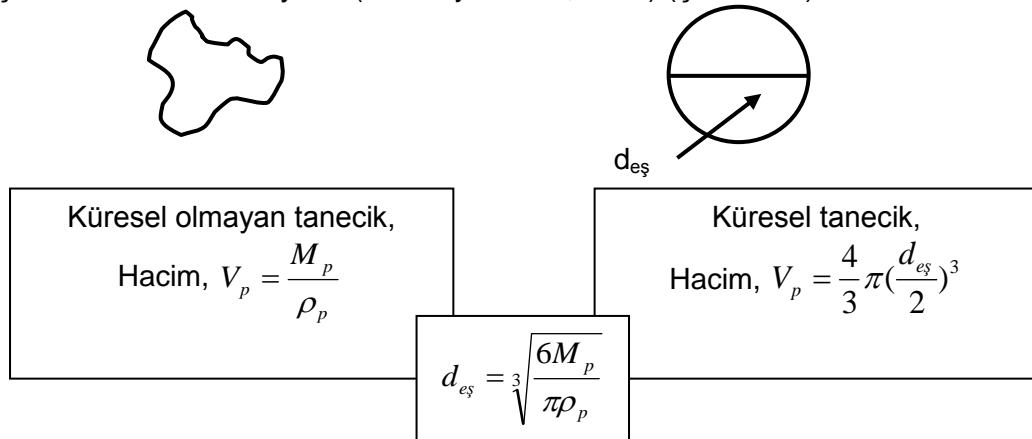
Çizelge 3.5 : Düzgün şekilli malzemelerin mikrometre ile belirlenen boyutları.

Malzeme	Ölçüm sayısı	Mikrometre ile ölçüm sonucu (mm)		
Halka-1	23	$d_{iç}:3,00$ $\sigma: 0$	$d_{dış}:4,93$ $\sigma: 0,029$	$h: 4,19$ $\sigma: 0,028$
Halka-2	21	$d_{iç}:1,84$ $\sigma: 0,005$	$d_{dış}:4,78$ $\sigma: 0,004$	$h: 4,09$ $\sigma: 0,003$
Halka-3	20	$d_{iç}:3,49$ $\sigma: 0,003$	$d_{dış}:4,90$ $\sigma: 0,002$	$h: 4,00$ $\sigma: 0$
Silindir-1	21	$d: 3,90$ $\sigma: 0,002$	$h: 3,99$ $\sigma: 0,004$	
Silindir-2	20	$d: 2,89$ $\sigma: 0,004$	$h: 5,11$ $\sigma: 0,007$	
Tablet	20	$d: 4,80$ $\sigma: 0,002$	$h: 2,98$ $\sigma: 0,004$	
Dikd.prizm.-1.	20	$a: 5,01$ $\sigma: 0,002$	$b: 5,01$ $\sigma: 0,004$	$c: 2,87$ $\sigma: 0,003$
Dikd.prizm.-2	20	$a: 2,91$ $\sigma: 0,004$	$b: 2,93$ $\sigma: 0,007$	$c: 4,98$ $\sigma: 0,006$
Küp-1	48	$a: 4,01$ $\sigma: 0,05$		
Küp-2	72	$a: 3,99$ $\sigma: 0,08$		
Üçgen prizma	21	$a: 3,46$ $\sigma: 0,04$	$h: 3,89$ $\sigma: 0,02$	

3.8.2 Eşdeğer hacim çapı

Eşdeğer hacim çapı ($d_{eş}$) düzgün şekilli olmayan malzemelerin tanımlanmasında kullanılan bir parametre olup tanecik ile aynı hacme sahip olduğu varsayılan bir kürenin çapını ifade eder.

Ölçüm, küresel olmayan bir taneciğin hacminin düzgün bir kürenin hacmine eşitlenmesi esasına dayanır (Cleasby ve Fan, 1981) (Şekil 3.28).



Şekil 3.28 : Eşdeğer hacim çapının belirlenmesi.

$d_{eş}$: Eşdeğer hacim çapı, cm

M_p : Tanecik ağırlığı, g

ρ_p : Taneciğin yoğunluğu, g/cm³

Malzemenin eşdeğer çapının belirlenebilmesi için tek bir taneciğin ağırlığının ve malzemenin yoğunluğunun bilinmesi gerekir.

Kum, perlit, garnet, kırık cam gibi düzgün şekilli olmayan malzemeler için yığın içinden temsil edici tek bir taneciğin seçilmesi mümkün değildir. Bu nedenle önce malzemenin üniform eleme işlemine tabi tutulduğundan ve temsil edici numune alındığından emin olunması gerekmektedir. Buna karşın küresel malzemeler ve küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler için böyle bir kısıtlama bulunmamaktadır.

Eşdeğer hacim çapının belirlenmesi için her bir malzeme grubundan 100 adet tanecik sayılarak bir tartım kabına konmuş ve bu şekilde 3 grup oluşturulmuştur. Sonuçların güvenilirliğini artırmak açısından diğer bir tartım kabına da malzemedan 200 adet tanecik sayılarak yerleştirilmiştir. Sayılan bu malzemeler hassasiyeti yüksek bir terazide tartılarak ortalama ağırlık değeri bulunmuş ve tek bir taneciğin ağırlığı belirlenmiştir. Malzeme yoğunluğu da Bölüm 3.7’de anlatılan yöntemle belirlenmiş ve taneciğin hacmi ağırlık/yoğunluk oranı ile hesaplanmıştır. Örnek oluşturmak üzere 1,18-1,4 mm kum fraksiyonuna ait eşdeğer hacim çapının tayini için izlenen hesap adımları Çizelge 3.6’da verilmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde bu şekilde sayma-tartma yöntemi ile hesaplanan eşdeğer hacim çapı “ $d_{eş}$ -deneysel” olarak gösterilecektir.

Çizelge 3.6 : Eşdeğer hacim çapı hesaplama örneği ($d_{eş}$ -deneysel).

Malzeme:	1,18-1,4 mm kum			
Özgül ağırlık, g/cm ³	2,630	2,630	2,630	2,630
Tanecik sayısı	100	100	100	200
Toplam ağırlık(M_p), g	0,3624	0,3777	0,3623	0,7248
1 taneciğin ağırlığı, g	0,003624	0,003777	0,003623	0,003624
Eşdeğer hacim çapı ($d_{eş}$), mm	1,381	1,400*	1,381	1,381
Ortalama $d_{eş}$, mm:	1,381			

*Bu ölçüm sonucu diğer üç sonuçtan oldukça farklı bulunduğu için ortalama değer hesaplanırken dikkate alınmamıştır.

Küresel olmayan düzgün şekilli malzemelerin hacmini yukarıda anlatılan sayma-tartma yöntemine ilave olarak bilinen geometri formülleriyle de hesaplamak mümkündür. Bu amaçla malzeme boyutları mikrometre kullanarak hassas bir şekilde ölçülmüştür.

Sonuçların tekrarlanabilirliği açısından, her bir malzeme grubundan alınan en az 5 numunenin her bir boyutu için çok sayıda ölçüm yapılmış ve ebatlar ortalama değer hesaplanarak belirlenmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde bu yöntem ile hesaplanan eşdeğer hacim çapı “ $d_{eş}$ -teorik” olarak gösterilecektir. Örnek oluşturmak üzere halka şeklindeki malzemenin eşdeğer hacim çapının tayini için izlenen hesap adımları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Halka şeklindeki malzemenin eşdeğer hacim çapının ($d_{eş}$ -teorik) belirlenmesi.

Malzeme: Halka-1	
$d_{iç}$, mm	3
$d_{dış}$, mm	4,93
h , mm	4,19
$V_{halka} : \pi * (d_{dış}^2 - d_{iç}^2) * h / 4$, mm ³	50,51
$d_{eş}$ -teorik: $((6 * V_{halka}) / \pi)^{1/3}$, mm	4,59

$$V_{halka} = V_{küre}$$

3.9 Gözeneklilik

Gözeneklilik (ϵ), boşluk hacminin toplam hacime oranı olup sabit yatakların tanımlanmasında kullanılan en önemli parametrelerden birisidir. Yük kaybını tahmin etmek üzere öne sürülen denklemlerin hepsinde gözeneklilik çok önemli bir değişkendir ve matematiksel modellerin çoğu gözeneklilik teriminin doğru kuvvetini bulmak üzerine kurulmuştur. Hatta yük kaybının tahmini için şimdiye kadar ortaya konan denklemler arasındaki farklılıkların esas sebebinin gözenekliliğin doğru hesaplanmamasından kaynaklandığı, yapılan hesaplardaki küçük bir hatanın yük kaybı tahminleri önemli ölçüde değiştireceği belirtilmiştir (Bai ve diğ., 2009; Nemeç, 2005).

Yatak gözenekliliğinin belirlenmesi için kullanılan en yaygın iki metot (a) su ile yerdeğiştirme ve (b) belirli bir hacimdeki malzemenin tartılması yöntemidir (Dixon, 1988). Su ile yerdeğiştirme yönteminde özellikle gözenekli malzeme söz konusu olduğunda boşluklardan hava kabarcıklarının uzaklaştırılması, malzemenin kolona yerleştirilmeden önce suda bekletilmesi veya bu hacmin ölçülerek çıkarılması gibi uygulama zorlukları bulunmaktadır. Tartma yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta malzeme yoğunluğunun belirlenmesidir. Bu çalışmada yatak gözenekliliği tartma metodu ile belirlenmiştir. Bunun için malzeme kolona yerleştirilmeden önce etüvde kurutulmuş, desikatörde bekletilmiş ve kuru ağırlığı tartılarak malzeme kaybı olmaksızın kolona dikkatli bir şekilde boşaltılmıştır. Gözenekliliği hesaplamak üzere kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir:

$$\varepsilon = \frac{V_{boşluk}}{V_{toplam}} = \frac{V_{toplam} - V_{malzeme}}{V_{toplam}} = 1 - \frac{V_{malzeme}}{V_{toplam}} = 1 - \frac{m_{malzeme}}{\rho_{malzeme} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L} \quad (3.3)$$

$m_{malzeme}$: Kolona konan kuru malzeme miktarı, g

$\rho_{malzeme}$: Malzeme yoğunluğu, g/cm³

D: Kolon çapı, cm

L: Yatak yüksekliği, m

Yatak gözenekliliğinin bağlı olduğu kolon çapı, yatak yüksekliği, malzeme yoğunluğu ve malzeme ağırlığı parametreleri çok hassas bir şekilde belirlenmelidir. 0,4-0,5 gözeneklilik aralığında bu parametrelerin ölçümünde meydana gelecek %3 lük bir hata küresellik katsayısında % 8 hataya neden olmaktadır (Geldart, 1990).

3.10 Küresellik Katsayısı

Farklı şekillerdeki malzemelerin birbirleriyle karşılaştırılabilmeleri için öncelikle malzeme büyüklüğünü tanımlayacak bir kritere ihtiyaç vardır. Bu amaçla eşdeğer hacim çapının kullanılması düşünülmüştür ancak farklı şekillerdeki tanecikler aynı hacme sahip olabileceğinden eşdeğer hacim çapının bu tanımlama için yeterli olmadığı ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla malzemenin şeklini de göz önüne alan bir tanım gerekmektedir. Küresel olmayan bir malzemenin şeklinin tanımlanması ile ilgili çalışmalar genellikle taneciğin küreden ne kadar farklı olduğunun ortaya konması üzerine kurulmuştur.

Küresellik katsayısı (ψ) malzeme şeklini tanımlamak için kullanılan bir parametre olup tanecik ile eşdeğer hacimdeki kürenin yüzey alanının (A_p) taneciğin yüzey alanına (S_p) oranlanması ile hesaplanır.

$$\psi = \frac{A_p}{S_p} = \frac{\pi d_{es}^2}{S_p} \quad (3.4)$$

Küre için 1 olan bu sayı diğer tüm şekiller için 0 ile 1 arasındadır. Leva (1949) sabit yataklarda yük kaybının belirlenmesi çalışmalarında şekil faktörü kullanan ilk araştırmacılardan biri olmuştur. ($d_{es} \cdot \psi$) çarpımını kullanarak yük kaybı ile Reynolds sayısı arasında oldukça tutarlı bir ilişki olduğunu göstermiştir.

Kum, perlit, garnet, kırık cam gibi düzgün şekilli olmayan taneciklerin yüzey alanının kesin ve doğru bir biçimde belirlenmesindeki güçlükler küresellik katsayısının doğrudan ölçümünü olanaksız hale getirmiş ve küresellik katsayısı dolaylı yöntemlerle belirlenmiştir. Bu amaçla sabit yatakta malzemenin oluşturduğu yük

kaybı ölçülmüş ve Ergun denkleminde yerine konarak küresellik katsayısı hesaplanmıştır. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında bu yöntemle belirlenen küresellik katsayısı “ ψ_{deneysel} ” olarak gösterilecektir.

Ergun denklemi,

$$\frac{h_L}{L} = 150 \frac{\mu}{\rho g} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \left(\frac{S_v}{6}\right)^2 V + 1,75 \frac{1}{g} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \left(\frac{S_v}{6}\right) V^2 \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilmekte olup küresellik katsayısı (ψ), özgül yüzey (S_v) parametresinin içinde yer almaktadır.

h: Yük kaybı, m

L: Malzeme yüksekliği, m

μ : Dinamik viskozite, kg/m/sn

ρ : Akışkanın yoğunluğu, kg/m³

g : Yerçekimi ivmesi, (9,81 m/sn²)

ε : Gözeneklilik (porozite)

S_v : Özgül yüzey

V: Yüzeysel hız, m/sn (Q/A)

Özgül yüzey, birim hacimde bulunan taneciklerin yüzey alanı olarak tanımlanmaktadır.

$$S_v = \frac{S_p}{V_p} \quad (3.6)$$

Tanecik yüzey alanı (S_p), küresellik katsayısının tanımından çekilerek,

$$S_p = \frac{\pi d_{e\varsigma}^2}{\psi} \quad (3.7)$$

olarak ifade edildiğinde

$$S_v = \frac{\pi d_{e\varsigma}^2 / \psi}{\pi d_{e\varsigma}^3 / 6} = \frac{6}{\psi d_{e\varsigma}} \quad (3.8)$$

şeklinde yazılabilir. Ergun denkleminde S_v için yukarıdaki gösterim kullanılırsa,

$$\frac{h_L}{L} = 150 \frac{\mu (1 - \varepsilon)^2}{\rho g \varepsilon^3} \left(\frac{1}{\psi d_{e\psi}} \right)^2 V + 1,75 \frac{1 (1 - \varepsilon)}{g \varepsilon^3} \left(\frac{1}{\psi d_{e\psi}} \right) V^2 \quad (3.9)$$

elde edilir.

Düzgün şekilli malzemelerin yüzey alanları ise geometrik formüllerle hesaplanabilir. Ancak malzeme boyutlarının mikrometre ile çok hassas bir şekilde ölçülmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Örnek oluşturmak üzere halka şeklindeki malzemenin küresellik katsayısının hesaplanması için izlenen adımlar Çizelge 3.8’de verilmiştir. Bu yöntemle hesaplanan küresellik katsayısı çalışmanın ilerleyen kısımlarında “ Ψ_{teorik} ” olarak gösterilecektir.

Düzgün şekilli olmayan ve gözenekli malzemeler için özgül yüzeyin belirlenmesi ise öncelikle taneciğin yüzey alanının belirlenmesini gerektirir. Gözenekli malzemeler söz konusu olduğunda farklı yüzey alanı tanımları (tüm boşlukların da hesaba katıldığı toplam yüzey alanı, görünen dış yüzey alanı, geometrik yüzey alanı) yapılabilmektedir. Sabit yataklarda yük kaybı tahmini konusunda en uygun tanımın geometrik yüzey alanı olduğu ifade edilmiştir (Ergun, 1952b).

Çizelge 3.8 : Halka-1 malzemesi için küresellik katsayısının hesaplanması.

Malzeme: Halka-1	
$d_{iç}$, mm	3
$d_{dış}$, mm	4,93
h , mm	4,19
$V_{halka} : \pi * (d_{dış}^2 - d_{iç}^2) * h / 4$, mm ³	50,51
	$V_{halka} = V_{küre}$
$d_{e\psi} : ((6 * V_{halka}) / \pi)^{1/3}$, mm	4,59
$S_p : 2\pi(d_{dış}/2 + d_{iç}/2) + ((d_{dış}/2)^2 - (d_{iç}/2)^2)$, mm ²	128,57
Ψ_{teorik}	0,514

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VERİLERİ

4.1 Küresel Malzemelere Ait Veriler

Deneysel çalışmalarda kullanılan küresel malzemelere ait nominal çap, mikrometre ile ölçülen çap, eşdeğer hacim çapı ($d_{eş}$ -deneysel) ve yoğunluk değerleri Bölüm 3'de anlatılan yöntemlerle belirlenmiş ve çalışılan gözeneklilik aralıkları ile birlikte Çizelge 4.1'de verilmiştir. Tüm küreler cam malzemedan imal edilmiş olup, 1-2-3-4-5-6-7-8 mm çaplı kürelerle deneyler 4 cm'lik kolonda yapılmıştır. 10 mm çaplı kürelerle ise hem 4 cm hem de 10,04 cm çapındaki kolonlarda çalışılmıştır. Nominal çap tedarikçi firma tarafından belirtilen çap değeridir.

Çizelge 4.1 : Küresel malzemelere ait özellikler.





Nominal çap,mm	Mikrometre ile ölçülen çap, mm	$d_{eş}$ -deneysel, mm	ρ , g/cm ³	ϵ
1	1,23	1,18	2,479	0,37-0,40
2	2,05	1,99	2,537	0,37-0,41
3	3,09	3,18	2,494	0,38-0,42
4	4,02	4,03	2,499	0,38-0,42
5	4,89	4,98	2,529	0,40-0,46
6	5,96	6,03	2,556	0,40-0,44
7	7,12	7,15	2,521	0,42-0,45
8	7,86	8,03	2,571	0,42-0,46
10	9,99	9,99	2,568	0,44-0,47

4.2 Küresel Olmayan Düzgün Şekilli Malzemelere Ait Veriler





Küresel olmayan düzgün şekilli malzemelere ait özellikler ve deney şartları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Yoğunluk, deneysel eşdeğer çap, teorik eşdeğer çap ve teorik küresellik katsayısı Bölüm 3'de anlatılan yöntemlerle belirlenmiştir.

Düzgün şekilli malzemeler için deneysel olarak belirlenen eşdeğer çap ile teorik olarak hesaplanan eşdeğer çap değerleri arasındaki farklar Çizelge 4.3'de belirtilmiştir. Çizelge 4.3'den görüldüğü üzere üçgen prizma dışında kalan malzemeler için sonuçlar arasındaki fark %5'in altındadır. Üçgen prizma için hatanın bu kadar yüksek olmasının üretilen malzemenin mükemmel olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.




Çizelge 4.2 : Küresel olmayan düzgün şekilli malzemelere ait özellikler ve deney şartları.

	Boyut, mm	Hammadde	ρ , g/cm ³	Kolon, cm	$d_{eş}$ -deneysel, mm	$d_{eş}$ -teorik, mm	ϵ	$\Psi_{deneysel}$	Ψ_{teorik}
Halka-1									
	$d_{iç}$: 3 $d_{dış}$: 4,93 h: 4,19	Naylon6	1,113	4-10,04	4,64	4,59	0,62-0,65	0,29-0,34	0,51
Halka-2									
	$d_{iç}$: 1,84 $d_{dış}$: 4,78 h: 4,09	Delrin	1,375	4-10,04	4,95	4,92	0,48-0,53	0,45-0,53	0,66
Halka-3									
	$d_{iç}$: 3,49 $d_{dış}$: 4,90 h: 4	Delrin	1,372	4-10,04	4,20	4,14	0,67-0,70	0,22-0,27	0,43
Silindir-1									
	d: 3,90 h: 3,99	Delrin	1,395	10,04	4,50	4,49	0,39-0,42	0,64-0,67	0,87

Çizelge 4.2 : (devam) Küresel olmayan düzgün şekilli malzemelere ait özellikler ve deney şartları.

Malzeme	Boyut, mm	Hammadde	ρ , g/cm ³	Kolon çapı, cm	d _{eş} -deneysel, mm	d _{eş} -teorik, mm	ϵ	Ψ _{deneySEL}	Ψ _{teorik}
Silindir-2									
	d: 2,89 h: 5,11	Delrin	1,360	10,04	4,04	4,00	0,39-0,43	0,69-0,72	0,84
Tablet									
	d: 4,80 h: 2,98	Delrin	1,372	10,04	4,71	4,68	0,39-0,43	0,65-0,66	0,85
Dikd.prizm.-1									
	a: 5,01 b: 5,01 c: 2,87	Delrin	1,405	10,04	5,03	5,16	0,41-0,46	0,51-0,55	0,78
Dikd.prizm.-2									
	a: 2,91 b: 2,93 c: 4,98	Delrin	1,382	10,04	4,20	4,33	0,39-0,45	0,57-0,58	0,78

Çizelge 4.2 : (devam) Küresel olmayan düzgün şekilli malzemelere ait özellikler ve deney şartları.

Malzeme	Boyut, mm	Hammadde	ρ , g/cm ³	Kolon, cm	$d_{eş}$ -deneysel, mm	$d_{eş}$ -teorik, mm	ϵ	$\Psi_{deneysel}$	Ψ_{teorik}
Üçgen prizma									
	a: 3,46 h: 3,89	Naylon6	1,113	4-10,04	3,71	3,38	0,37-0,46	0,57-0,67	0,71
Küp-1									
	a: 4,01	Naylon6	1,113	4	4,78	4,98	0,40-0,46	0,58-0,62	0,81
Küp-2									
	a: 3,99	Delrin	1,391	10,04	4,71	4,95	0,35-0,40	0,56-0,59	0,81

Çizelge 4.3 : Düzgün şekilli malzemeler için $d_{eş}$ -deneysel ve $d_{eş}$ -teorik arasındaki fark.

Malzeme	$d_{eş}$ -deneysel, mm	$d_{eş}$ -teorik, mm	Fark (%)
Halka-1	4,64	4,59	1,2
Halka-2	4,95	4,92	0,5
Halka-3	4,20	4,14	1,5
Silindir-1	4,50	4,49	0,2
Silindir-2	4,04	4,00	1,1
Tablet	4,71	4,68	0,6
Dikdörtg. prizm.-1	5,03	5,16	2,6
Dikdörtg. prizm.-2	4,20	4,33	2,9
Üçgen prizma	3,71	3,38	9,0
Küp-1	4,78	4,98	4,1
Küp-2	4,71	4,96	5,1

4.3 Düzgün Şekilli Olmayan Malzemelere (Doğal malzemeler) ait Veriler

Düzgün şekilli olmayan malzemelere ait elek aralıkları, eşdeğer çap ve yoğunluk değerleri ile bu malzemelerle yürütülen deneylerdeki gözeneklilik aralıkları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Eleme işlemi ile elek aralıklarının belirlenmesi, deneysel eşdeğer hacim çapı ($d_{eş}$ -deneysel) ve yoğunluk hesabı Bölüm 3'de anlatıldığı şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.4 : Düzgün şekilli olmayan malzemelere ait özellikler.

Malzeme	Elek aralığı, mm	$d_{eş}$ -deneysel, mm	ρ , g/cm ³	ϵ
Kum	1,40-1,70	1,631	2,644	0,38-0,41
Kum	1,18-1,40	1,381	2,630	0,38-0,42
Kum	1,00-1,18	1,108	2,620	0,41-0,45
Kum	0,85-1,00	0,948	2,619	0,41-0,46
Kum	0,85-1,00*	0,952	2,617	0,41-0,46
Kum	0,71-0,85	0,841	2,649	0,42-0,47
Kum	0,60-0,71	0,707	2,603	0,42-0,47
Perlit	2,00-2,36	2,299	2,356	0,48-0,51
Perlit	1,70-2,00	1,974	2,351	0,43-0,48
Perlit	1,40-1,70	1,702	2,360	0,44-0,48
Perlit	1,18-1,40	1,421	2,364	0,42-0,47
Perlit	1,00-1,18	1,163	2,365	0,42-0,46
Garnet	1,70-2,00	1,834	4,022	0,45-0,49
Garnet	1,40-1,70	1,662	4,020	0,46-0,50
Garnet	1,18-1,40	1,380	4,023	0,45-0,49
Garnet	1,00-1,18	1,165	4,016	0,46-0,50
Garnet	0,85-1,00	0,971	3,992	0,45-0,49
Garnet	0,71-0,85	0,817	4,017	0,46-0,50
Garnet	0,60-0,71	0,661	3,994	0,45-0,48
Garnet	0,50-0,60	0,609	4,006	0,46-0,50
Kırık cam	2,00-2,36	2,194	2,502	0,45-0,51
Kırık cam	1,70-2,00	1,871	2,504	0,48-0,52
Kırık cam	1,40-1,70	1,595	2,508	0,49-0,53

*:Bu malzemenin içinde ön yıkama işlemi ile giderilemeyen kirlilikler olduğu görülmüş ve malzeme tekrar yıkanmıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Gözenekli ortamda yük kaybının tahmini için Ergun denklemi (5.1) yaygın olarak kullanılmakla beraber, Ergun tarafından teklif edilen ampirik katsayılar ($k_1=150$ ve $k_2=1,75$) üzerindeki tartışmalar uzun yıllardan beri devam etmektedir (Jin-Sui ve diğ., 2009; Wu ve diğ., 2008; Özahi ve diğ., 2008; Choi ve diğ., 2008).

$$\frac{h_L}{L} = 150 \frac{\mu}{\rho g} \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \left(\frac{1}{\psi d_{e\varnothing}} \right)^2 V + 1,75 \frac{1}{g} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \left(\frac{1}{\psi d_{e\varnothing}} \right) V^2 \quad (5.1)$$

MacDonald ve diğ. (1979), k_1 katsayısının 180 olması gerektiğini belirtmiş, k_2 katsayısı için ise yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak 1,8-4 aralığını teklif etmiştir. Bradshaw ve Meyers (1963) silindir şeklindeki malzemeler için 150 ve 1,75 değerlerinin yarı yarıya olması gerektiğini öne sürmüştü, Handley ve Heggs (1968) ise yine silindir şeklindeki malzemeler için k_1 ve k_2 katsayılarını sırasıyla 458 ve 1,28 olarak önermiştir.

Du Plessis (1994) küresel olmayan malzemeler ile yürüttüğü deneyler sonucunda yatak gözenekliliğinin 0,35-0,5 aralığında kalması durumunda gözenekliliğinin artmasıyla k_1 katsayısının 185 değerinden 250 değerine yükseldiğini, k_2 katsayısının ise 2,25 değerinden 1,5 değerine düştüğünü belirtmiştir. Aynı çalışmada gözenekliliğinin 0,44 olduğu durumda k_1 ve k_2 katsayılarının 207 ve 1,88 olduğu ifade edilmiştir. Son yıllarda yapılan bir çalışmada (Özahi ve diğ., 2008) ise k_1 ve k_2 katsayıları için sırasıyla 160 ve 1,61 değerlerinin kullanılması durumunda Ergun denkleminin küresel ve küresel olmayan malzemelerden oluşan yataklarda $\pm\%4$ hata ile kullanılabileceği belirtilmiştir. Ergun'a (1952a) kıyasla daha düşük Re sayısı aralıklarında çalışan Coulson (1949) k_1 katsayısı için 173 ± 7 , Leva (1948) ise 200 değerini önermiştir. Yüksek Re sayılarında gelişmiş bilgisayar modelleri kullanarak kuadratik dolgulu paralel silindireler dizisi arasındaki akımı inceleyen Hellström ve Lundström (2006), geniş Re sayısı aralığında (0,001-1000) yaptıkları çalışmalar sonucunda, Re 20'ye kadar Ergun denklemi ile örtüşen veriler elde etmiş ancak Re sayısının 20'nin üzerindeki değerleri için Ergun denkleminde sapma olduğunu gözlemiş ve denklemdaki ampirik katsayıların yeniden düzenlenmesini önermişlerdir.

Önerilen katsayılar arasındaki farkların Reynolds sayısına, küresel olmayan tanecikler için malzeme şekline veya yatak gözenekliliğine bağlı olduğu düşünülmektedir.

Katsayılar üzerindeki tüm bu çelişkilere rağmen Ergun denkleminin küresel veya küreye çok benzer şekillerdeki taneciklerden oluşan yataklar için oldukça iyi tahminler verdiği kabul edilmektedir (Wu ve Yu, 2007; Akgiray ve Soyer, 2006; Nemec ve Levec, 2005; Endo ve diğ., 2002; Hill ve diğ., 2001; MacDonald ve diğ., 1979; Lakota ve diğ., 2002; Dullien, 1991). Ancak küreden farklı şekillerdeki malzemeler için Ergun denkleminin teklif ettiği katsayılar ile kullanılmasının doğru neticeler vermeyeceği iddia edilmiş (Wu ve Yu, 2007) ve şekil katsayısının teorik olarak belirlenebileceği küp, tablet, silindir gibi düzgün şekilli malzemeler ile çalışılarak k_1 ve k_2 katsayılarının tespit edilmesinin gerekliliği üzerinde önemle durulmuştur (Nemec, 2005; Trussell ve diğ., 1999; Özahi ve diğ., 2008). Gözenekli ortamda meydana gelen yük kaybını tahmin etmek üzere Ergun denkleminin alternatif olarak kullanılabilen farklı modeller de önerilmiştir (Rose, 1945; Rose ve Rizk, 1949; Hicks, 1970; Tallmadge, 1970; Lee ve Ogawa, 1974; Kürten, Raasch ve Rumpf, 1966; Montillet ve diğ., 2006; Özahi ve diğ., 2008). Bu çalışmada, Ergun denkleminin üstünlük gösterdiği iddia edilen söz konusu denklemler, küresel ve küresel olmayan malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen sabit yatak deneyleri ile elde edilen veriler ışığında kıyaslanmış ve değerlendirilmeler yapılmıştır.

DeneySEL çalışmalar 3 farklı malzeme grubu ile yürütülmüştür:

- Küresel malzemeler (1-2-3-4-5-6-7-8-10 mm çaplı küreler, 44 deney, 1419 adet deney verisi)
- Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler (1 üçgen prizma, 2 küp, 3 halka, 3 silindir, 2 dikdörtgen prizması şeklinde malzeme, 46 deney, 1960 adet deney verisi)
- Düzgün şekilli olmayan malzemeler (6 fraksiyon kum, 5 fraksiyon perlit, 8 fraksiyon garnet, 3 fraksiyon kırık cam, 79 deney, 4577 adet deney verisi)

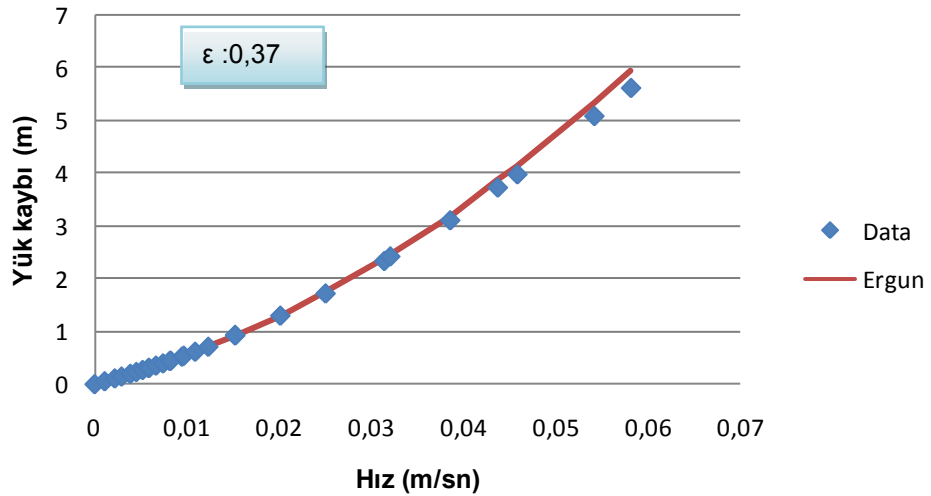
5.1 Küresel Malzemeler

Küre, şekil bakımından özellikleri tam olarak belirlenebilen bir cisim olduğu için ilk aşamada küreler ile deneyler yürütülmüştür. Ergun denkleminin küresel malzemeler için uygulanabilirliği araştırılmış ve sonuçlar farklı modeller ile karşılaştırılmıştır. Elde

edilen sonuçlar aynı zamanda deney düzeneğinin güvenilirliğini test etmeye de imkan verdiğiinden, takip eden diğer deneyler için büyük önem taşımaktadır.

1-2-3-4-5-6-7-8-10 mm boyutunda cam küreler ile çalışılmış ve deneyler 4 cm çaplı permeabilite kolonunda yürütülmüştür. 10 mm çapındaki küreler ile ayrıca 10,04 cm çaplı kolonda da çalışılmıştır. Her boyuttaki küre ile en az 3 değişik gözeneklilik değerinde deneyler yapılmıştır. Farklı gözeneklilik değerleri yatağın tamamen akışkanlaştırılmasını takiben vananın yavaşça kapatılması, istenilen malzeme yüksekliği elde edilecek şekilde kolona çevresinden yavaş hareketlerle vurulması sonucu malzemenin çökmesi/sıkışması ile elde edilmiştir. Deneylerde yüzeysel hıza karşı yük kaybı ölçülmüştür. Şekil 5.1 1,18 mm boyutundaki kürelerden oluşan yatağın tek bir gözeneklilik değeri için yürütülen deneyde elde edilen hız-yük kaybı grafiğini göstermektedir. Diğer boyutlardaki küreler için her bir gözeneklilik değerindeki grafikler EKLER –A kısmında verilmiştir.

Tüm deney setlerinde (farklı çaplarda ve farklı gözeneklilik değerlerinde yürütülen deneylerde) akış hızının (dolayısıyla yük kaybının) en az 30 farklı değerinde veri toplanmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 5.1 : 1,18 mm çaplı kürelerden oluşan 0,37 gözeneklilik değerindeki sabit yatağa ait hız-yük kaybı eğrisi.

Küreler ile elde edilen sonuçların Ergun denklemi ile uyumunu değerlendirebilmek amacıyla tüm veriler boyutsuz bir sürtünme faktörü (f_v) ve modifiye Reynolds sayısı (Re_m) yardımıyla Şekil 5.2'deki gibi toplu halde gösterilmiştir.

$$f_v = \frac{\Delta P}{L} \frac{g(\psi d_{eş})^2}{\mu V} \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \quad (5.2)$$

ΔP : Yük kaybı (kg/m^2) g : Yerçekimi ivmesi, m/s^2 ψ : Küresellik katsayısı
 $d_{eş}$: Eşdeğer hacim çapı, m ε : Yatak gözenekliliği L : Yatak yüksekliği, m
 μ : Dinamik viskozite, kg/m.s V : Hız, m/s

$$Re_m = \frac{\rho (\psi d_{eş}) V}{\mu (1 - \varepsilon)} \quad (5.3)$$

olarak tanımlanmışlardır. Şekil 5.2'de görülen sürekli eğri (siyah) Ergun'un teklif ettiği k_1 ve k_2 katsayıları kullanılarak çizilen eğri olup aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

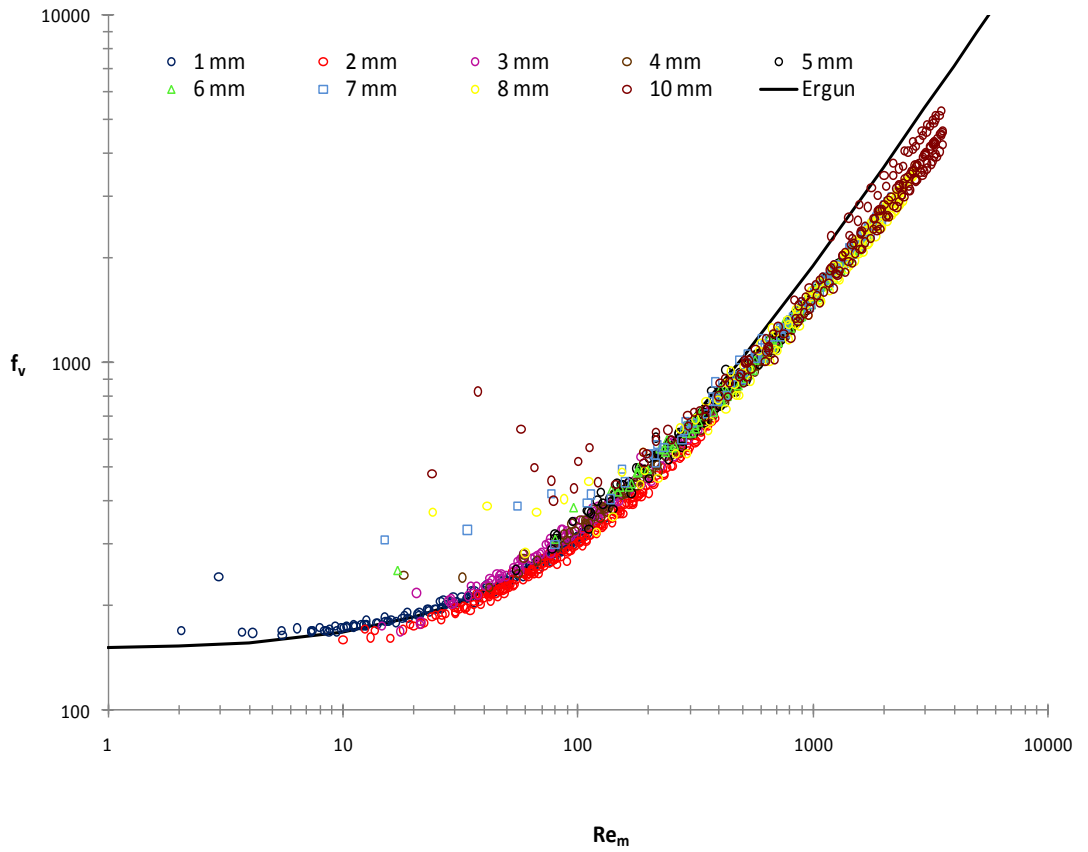
$$f_v = 150 + 1,75Re_m \quad (5.4)$$

Şekil 5.2'den görüldüğü üzere Ergun denklemi iddia edildiği şekilde küreler için oldukça iyi yük kaybı tahminleri vermektedir. Yüksek Re sayısı aralıklarında eğriden bir miktar sapma olduğu gözlenmiştir. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda bu sapmanın iki sebepten kaynaklanabileceği üzerinde durulmuştur: İlkinin, hız artışına bağlı olarak Re sayısının da artması nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Özellikle yüksek Re sayılarında yük kaybının Forchheimer tipindeki bir denklem ile ifade edilemeyeceği (Montillet ve diğ., 2007), denklemdeki V^2 teriminin üssünün 2 olmadığı (Montillet, 2004) belirtilmektedir. Diğer sebebin ise duvar etkisi olabileceği düşünülmektedir. D/d oranının ≥ 10 olması durumunda duvar etkisi olayının yük kaybı üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceği, Ergun denkleminin ortalama gözeneklilik ve yüzeyel hız değerlerinde herhangi bir düzeltme faktörüne ihtiyaç duymadan kullanılabileceği ifade edilmiştir (Mackowiak, 2009; Reddy ve diğ. 2008, Nemeç 2003; Foumeny ve diğ., 1996). Ancak D/d oranının < 10 olması halinde sapmaların gözleneceği ve sapma miktarının D/d oranına bağlı olmakla beraber Re sayısından da etkilendiği belirtilmiştir (Winterberg ve Tsotsas, 2000). Bu çalışma kapsamında küresel malzemeler için Ergun denkleminin sapmanın sebebi ile ilgili kesin bir yargıya varılamamıştır. Belirli bir yatakta hem duvar etkisini incelemek hem de geniş bir Re sayısı aralığında data elde etmek ancak farklı akışkanlar ve farklı

güçlerde pompalar kullanarak sağlanabilir. Bu çalışmanın esas amacı Ergun denkleminin küresel olmayan malzemeler için geçerliliğini araştırmak olduğundan deneysel düzenek duvar etkisi ve yüksek Re sayısı etkisi ayrımını yapabilecek şekilde tasarlanmamış, akışkan olarak yalnızca su kullanılmıştır.

4 cm çaplı kolonda gerçekleştirilen ve duvar etkisinin olmadığı düşünülen deneylerde ($D/d \geq 10$) Ergun denkleminin data ile çok uyumlu neticeler verdiği görülmüştür. Bu sonuç uygulanan deneysel metodun doğruluğunu ve güvenilirliğini de teyit etmiştir.

Literatürde D/d oranının alabileceği değerler ile ilgili farklı aralıklar ve görüşler mevcuttur (Carman, 1937; Rose ve Risk, 1949; Foumeny, 1993; Dixon, 1988; Chang ve diğ., 1999; Nemeç, 2003, Choi, 2008).

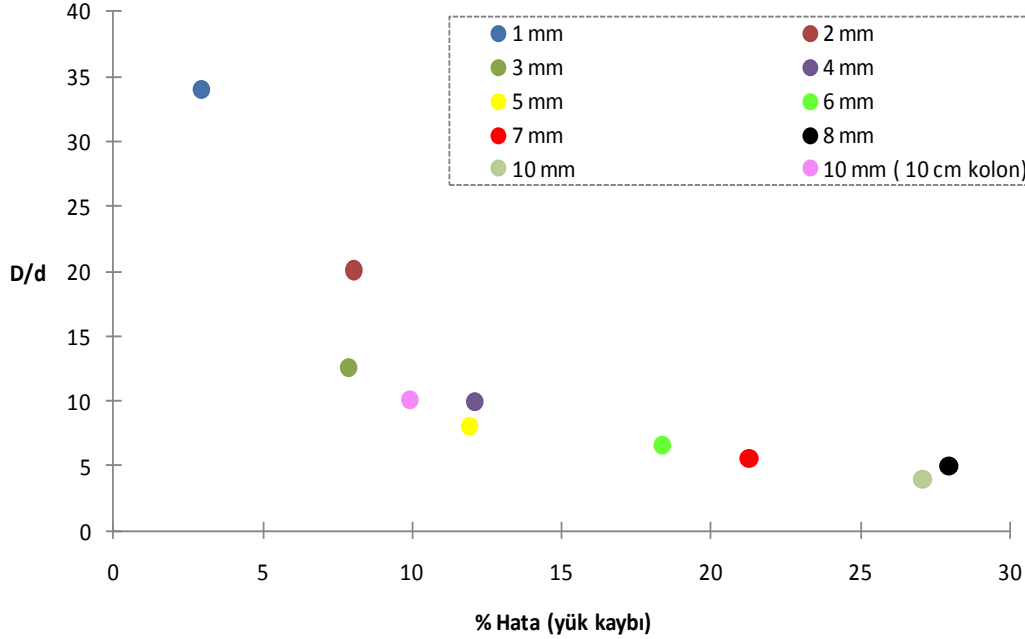


Şekil 5.2 : Farklı boyutlardaki kürelere ait deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması (1356 adet deney verisi).

Çalışmada kullanılan tüm küreler için 4 cm çaplı kolonda ölçülen deneysel yük kaybı değerleri Ergun denklemi ile tahmin edilen yük kaybı değerleri ile karşılaştırılmış ve aralarındaki fark yük kaybında oluşan % rölative hata olarak ifade edilmiştir.

Her deney için veri sayısını da dikkate alacak şekilde hesaplanan ağırlıklı ortalama % rölaf hata değerleri Şekil 5.3'de D/d oranlarına karşı gösterilmiştir.

$$\text{Ağırlıklı Ortalama \% Rölaf Hata} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \left(\frac{|h_{L_i, \text{deneysel}} - h_{L_i, \text{model}}|}{h_{L_i, \text{deneysel}}} \right)}{\sum_{i=1}^n n_i} * 100 \quad (5.5)$$



Şekil 5.3 : Farklı D/d oranlarında deneysel ölçüm sonuçları ile Ergun denklemi arasındaki rölaf yük kaybı hatası (%).

Şekil 5.3'de görüldüğü şekilde D/d oranı 4-34 arasında değişirken oluşan rölaf hata %3-%28 aralığında kalmıştır. D/d oranı azaldıkça % hata değerinin arttığı görülmektedir. Bu artışın duvar etkisinden kaynaklandığı düşünülmele beraber Re sayısının da etkisi olabileceği dikkate alınmalıdır. Cidar bölgesinde yük kaybı oluşumu incelendiğinde birbiriyle çelişen iki durum olduğu iddia edilmektedir (Nield, 1983; Einfeld ve Shnitzlein, 2001; Di Felice ve Gibilaro, 2004). Cidardaki gözenekliliğin yatak merkezindekinden daha büyük olması düşük yük kayıplarına neden olurken, cidarda meydana gelen sürtünme kuvvetleri yük kaybının artmasına sebep olmaktadır. Hangi etkinin daha baskın olduğu ise akım rejimine, yani Re sayısına bağlı olarak değişmektedir. Düşük Re sayısı aralıklarında cidardaki sürtünme etkisi daha önem kazandığından, yük kaybının arttığı ifade edilmiştir. Yüksek Re sayısı aralıklarında ise gözeneklilik etkisi daha baskın olduğundan yük kaybında azalma gözlemlendiği belirlenmiştir. Ancak daha önce de ifade edildiği gibi etkenler arasında ayırım yapmak kullanılan deneysel düzeneğin imkanları dahilinde mümkün olmamıştır.

Deney sonuçları Ergun denkleminde ek olarak farklı modeller (Çizelge 5.1) ile de karşılaştırılmıştır. Bu denklemler Ergun denkleminin karmaşık yapısını basitleştirmek ve pratik kullanımını geliştirmek amacıyla Re sayısı, ε ve D/d oranının bir fonksiyonu olan boyutsuz tanecik sürtünme faktörü (f_p) parametresine bağlı olarak tanımlanmışlardır (Montillet, 2007).

Çizelge 5.1 : Sabit yataklarda yük kaybının tahmini için kullanılan alternatif modeller.

Referans	Denklemler ($f_p = \frac{\Delta P \cdot d}{\rho L V^2}$), $d = \psi d_{e\varnothing}$	$Re = \frac{\rho (\psi d_{e\varnothing}) V}{\mu (1 - \varepsilon)}$
Rose (1945)	$f_p = [1000Re^{-1} + 60Re^{-0,5} + 12]$	belirtilmemiş
Rose ve Rizk (1949)	$f_p = [1000Re^{-1} + 125Re^{-0,5} + 14]$	belirtilmemiş
Ergun (1952a)	$f_p = \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}\right) (1,75 + 150 \frac{1 - \varepsilon}{Re})$	
Kürten, ve diğ. (1966)	$f_p = \left[\frac{25}{4\varepsilon^3} (1 - \varepsilon)^2\right] [21Re^{-1} + 6Re^{-0,5} + 0,28]$	0,1-4000
Hicks (1970)	$f_p = \left[6,8 \frac{(1 - \varepsilon)^{1,2}}{\varepsilon^3} Re^{-0,2}\right]$	500-60000
Tallmadge (1970)	$f_p = \left[\frac{150 (1 - \varepsilon)^2}{Re \varepsilon^3}\right] + \left[\frac{4,2 (1 - \varepsilon)^{1,166}}{\varepsilon^3} Re^{-1/6}\right]$	0,1-100000
Lee ve Ogawa (1974)	$f_p = \frac{1}{2} \left[\frac{12,5}{\varepsilon^3} (1 - \varepsilon)^2\right] [29,32Re^{-1} + 1,56Re^{-n} + 0,1]$ $n = 0,352 + 0,1\varepsilon + 0,275\varepsilon^2$	1-100000
Montillet ve diğ. (2007)	$f_p = \alpha [1000Re^{-1} + 60Re^{-0,5} + 12]$ $\alpha = 0,061 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}\right) \left(\frac{D}{d}\right)^{0,2}$, $\varepsilon: 0,36 - 0,39$ $\alpha = 0,05 \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}\right) \left(\frac{D}{d}\right)^{0,2}$, $\varepsilon: 0,40 - 0,45$	10-2500
Özahi (2008)	$f_p = \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}\right) (1,61 + 160 \frac{1 - \varepsilon}{Re})$	300-5000

Modellerin her biri için yük kaybında hesaplanan ağırlıklı ortalama % rölaf hata değerleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Duvar etkisinin ihmal edilebilir olduğu iddia edilen $D/d \geq 10$ değerleri için (1-2-3-4 mm küreler) Ergun denklemi ortalama % 8,6 hata ile yük kaybı tahmini yapabilmektedir. Ancak küre çapı büyüdükçe hata yüzdesinin arttığı ve bu durumun diğer denklemler için de geçerli olduğu görülmüştür. Küre çapı arttıkça Re sayısının da artıyor olması hatadaki artışın hangi etki ile meydana geldiğinin anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. Yüksek Re sayısı aralıklarında Ergun denkleminde daha üstün olduğu iddia edilen Tallmadge denklemi Ergun denklemi ile karşılaştırıldığında $D/d \geq 10$ değerleri için Ergun denklemi ile yakın tahminler yaptığı (% 8,1) görülmüştür. Ancak $D/d < 10$ aralığında Ergun denklemi ile hata yüzdesi artarken (% 21,3), Tallmadge denklemi

ile bu değer azalmakta (% 6,9), hatta tüm denklemler arasında en düşük değer olmaktadır. Tallmadge denkleminin Re sayısının yüksek değerlerinden kaynaklanabilecek hataları başarı ile tahmin ettiği kabul edilirse, Ergun denkleminde ve diğer modellerde küre çapı ile artan hata yüzdesinin duvar etkisi olayından çok Re sayısından kaynaklanmış olabileceği düşünülebilir. Yine yüksek Re sayısı aralıkları için Ergun denkleminde daha üstün olduğu iddia edilen Hicks denklemi ile de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bununla beraber bu çalışmada farklı akışkanlar ve farklı pompalar ile geniş Re sayısı aralıkları elde etmek planlanmadığından, hatanın kaynağını net olarak belirtmek mümkün değildir.

Çizelge 5.2'deki denklemler arasında duvar etkisini göz önüne alan tek model olan Montillet denklemi (2007) ile Ergun denklemi kıyaslandığında, önerilen denklemin Ergun denklemi ile yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu durum mühendislik açısından değerlendirildiğinde yapısında duvar etkisi düzeltmesi için ilave bir terim içermeyen Ergun denkleminin bu bakımdan dezavantaj sağlamadığını düşündürmektedir.

zahi ve diğ. (2008) tarafından Ergun denklemindeki k_1 ve k_2 katsayılarının yalnızca sayısal değerlerinin değiştirilmesi şeklinde önerilen denklem ile Ergun denkleminde % 1-% 6,2 daha düşük hata yüzdesi ile tahmin yapılabilir. Bu durum katsayılar için yapılacak düzeltmenin yük kaybı tahminindeki doğruluk yüzdesini artıracadığını düşündürmektedir.

5.2 Küresel Olmayan Düzgün şekli Malzemeler

Ergun (1952a) denkleminin küresel olmayan malzemeler için geçerliliğinin araştırıldığı bu çalışma kapsamında 5 farklı şekilde ve çeşitli ebatlarda toplam 11 tür düzgün geometrik malzeme ile deneyler yrtlmştir. Düzgün geometriye sahip taneciklerin alan ve hacim gibi özellikleri matematiksel formüller ile hesaplanabildiğinden her bir malzemenin teorik küresellik (Ψ_{teorik}) değeri belirlenebilmiştir. Bu sayede Ergun denkleminin teorik küresellik ve çap değerleri bilinen malzemeler için k_1 : 150 ve k_2 : 1,75 katsayıları ile kabul edilebilir sınırlar içinde yük kaybı tahmini yapıp yapamadığı araştırılmıştır.

Kimya endüstrisi başta olmak üzere proseslerde kullanılan katalistlerin şekli reaksiyon hızı ve üretim verimi açısından çok önemlidir. Küre, birim hacim başına en düşük yüzey alanına sahip şekil olduğundan bu proseslerde küresel katalistlerin kullanımı yaygın değildir. Diğer taraftan küresel malzemelerden oluşan sabit yataklarda nispeten düşük sayılabilecek gözeneklilik değerleri nedeniyle yük kaybı

Çizelge 5.2 : Küreler için yük kaybında ağırlıklı ortalama % rölatif hata değerleri.

d, mm	Re _m $\rho(d_{eş\psi})V/\mu(1-\epsilon)$	Ağırlıklı ortalama % rölatif hata								
		Rose	Rose ve Rizk	Kürten ve diğ.	Hicks	Tallmadge	Lee ve Ogawa	Montillet ve diğ.	Ergun	Özahi ve diğ.
1*	2-130	11,2	29,9	56,4	-***	8,0	16,0	34,9	3,0	2,5
2*	10-380	13,5	42,6	64,5	-	13,8	16,2	25,2	10,2	9,6
3*	15-896	17,4	49,0	50,1	16,7	3,2	20,0	11,0	7,9	5,3
4*	18-1019	17,7	51,0	48,1	11,6	2,6	25,1	10,2	12,1	7,6
5*	54-1450	39,4	81,1	38,4	9,0	4,6	32,3	21,2	11,9	8,0
6*	17-2305	43,5	85,5	35,0	10,2	4,2	37,6	18,9	18,4	12,5
7*	15-2979	55,1	99,6	28,8	11,2	6,8	41,7	26,8	21,3	15,1
8*	24-2767	70,4	118,4	30,7	13,2	7,4	42,3	25,5	27,9	20,3
10*	23-3570	76,0	123,9	20,5	11,7	11,5	49,6	29,1	27,1	19,6
10**	37-576	12,6	46,0	30,2	-	13	30,7	26,2	9,9	13,2
Ortalama, (D/d≥10) için:		14,5	43,7	49,9	14,1	8,1	21,6	21,5	8,6	7,6
Ortalama, (D/d<10) için:		56,9	101,7	30,7	11,1	6,9	40,7	24,3	21,3	15,1

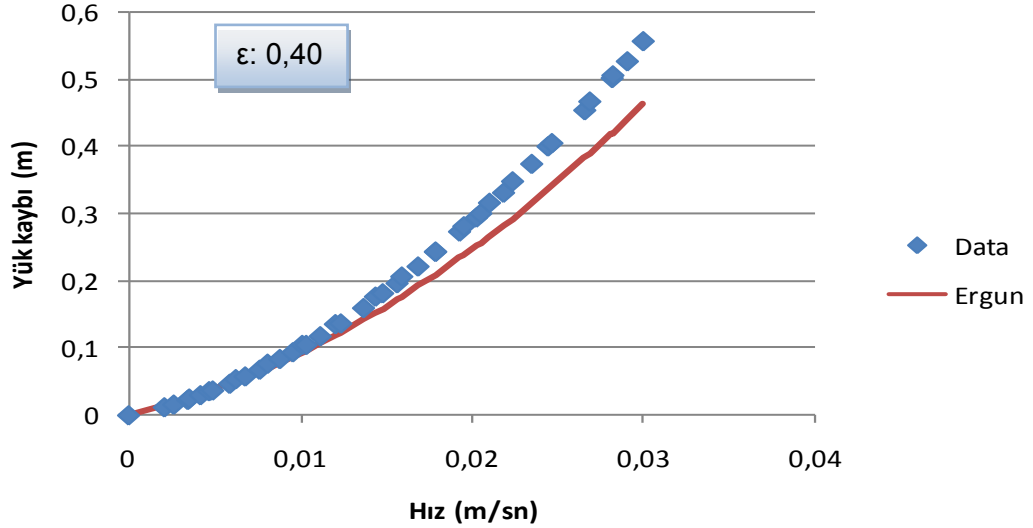
*: 4 cm. çaplı kolonda yapılan deney, **: 10,04 cm.çaplı kolonda yapılan deney

***: Hicks denkleminin Re_m>300 sayılarında geçerli olduğu belirtildiğinden, 1 mm, 2 mm ve 10 mm (10,04 cm kolonda) çaplı kürelere ait hata değerleri hesaba katılmamıştır.

hacimdeki küre ile kıyaslandığında %14,5 daha fazla yüzey alanına sahip olduklarından kullanımı tercih edilmektedir.

Halka şeklindeki malzemeler, aynı dış çap ve yüksekliğe sahip silindirler ile karşılaştırıldığında yatak içindeki dizilişleri nedeniyle daha büyük gözeneklilik oluşturmakta ve bunun sonucunda daha düşük yük kaybı oluşumu sağlamaktadır (Nemec, 2003).

Küresel olmayan malzemeler için Ergun (1952a) denkleminin gerçek değerlerinden daha düşük yük kaybı tahminleri vermesinin muhtemel sebebi bu malzemelerin yatak içinde çok farklı diziliş şekilleri göstermeleridir (Nemec ve Levec, 2005; Wu ve Yu, 2007). Küre ve silindir şeklindeki taneciklerden meydana gelen sabit yataklar için gözeneklilik (ϵ) gibi yatak özelliklerinin incelendiği bir çok deneysel çalışma (Di Felice ve Gibilaro, 2004; Zou ve Yu, 1996; McGreavy ve diğ., 1986) ve ampirik denklemlerin önerildiği çeşitli araştırmalar (Cohen ve Metzner, 1991; Foumeny ve diğ., 1993; Dixon, 1988) mevcuttur. Ancak silindir dışındaki şekillerden oluşan yataklar için çok az sayıda çalışma bulunmaktadır (Caulkin, 2009). Bu çalışma gerek şekil gerek boyut çeşitliliği açısından oldukça kapsamlı bir deneysel çalışma niteliğindedir. Her bir malzeme ile sabit yatağın en sıkı hali, en gevşek hali ve aradaki bir gözeneklilik durumu için olmak üzere en az 3 farklı gözeneklilik değerinde deneyler yürütülmüştür. Üçgen prizma, küp-1, küp-2, halka-1 ve halka-3 malzemeleri ile hem 4 cm çaplı kolonda hem de 10,04 cm çaplı kolonda çalışılmıştır. Deneylerde hıza karşı yük kaybı ölçülmüştür. Şekil 5.4 üçgen prizma şeklindeki malzemedan oluşan yatağın tek bir gözeneklilik değeri için 10,04 cm çaplı permeabilite kolonunda yürütülen deneyine ait hız-yük kaybı grafiğini göstermektedir. Bu ve diğer malzemelere ait farklı kolon çapı ve gözeneklilik değerindeki tüm grafikler EKLER –C kısmında verilmiştir. Tüm deney setlerinde (farklı malzeme ve farklı gözeneklilik değerlerinde yürütülen deneylerde) akış hızının (dolayısıyla yük kaybının) en az 30 farklı değerinde veri toplanmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 5.4 : Üçgen prizma şeklinde malzemeden oluşan sabit yatakta hız-yük kaybı eğrisi.

Küresel malzemeler ile ilgili değerlendirmelerin yapıldığı Bölüm 5.1'de duvar etkisinin yük kaybı üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilmesi için D/d oranının ≥ 10 olması gerektiği belirtilmiş ve elde edilen deney sonuçları ile bu etkinin kullanılan sistem için geçerli olmadığı desteklenmiştir. Çizelge 5.3'de çalışmada kullanılan düzgün şekilli malzemeler için D/d oranları gösterilmiştir. 4 cm çaplı kolonda yürütülen deneylerin D/d oranlarının 10'a çok yakın değerlerde olduğu, 10,04 cm çaplı kolonda ise bu oranın 19-30 arasında kaldığı görülmektedir. Bu nedenle düzgün malzemeler ile yürütülen deneylerde yük kaybı oluşumunun duvar etkisinden bağımsız olduğu düşünülmektedir.

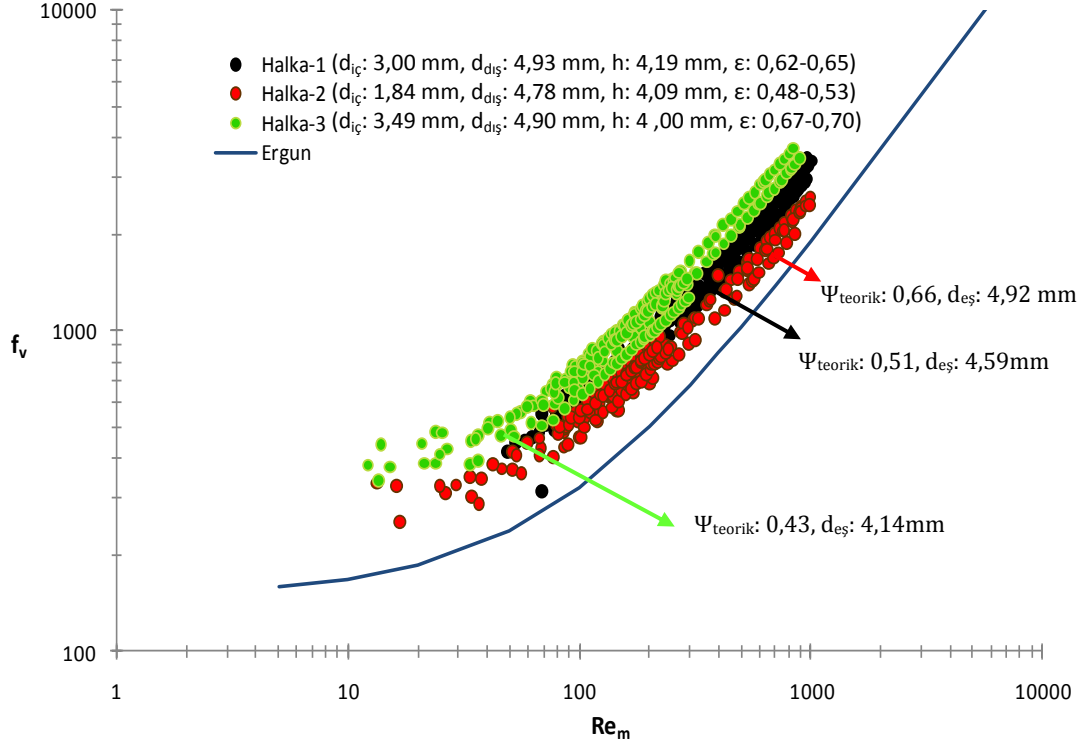
Çizelge 5.3 : Düzgün şekilli malzemeler için D/d oranları.

	$d_{eş-teorik}$, mm	$D/d_{eş-teorik}$	
		D: 4 cm	D: 10,04 cm
Halka-1	4,59	9	22
Halka-2	4,92	8	20
Halka-3	4,14	10	24
Silindir- 1	4,49	-	22
Silindir-2	4,00	-	25
Tablet	4,68	-	21
Dikd. Prizması-1	5,16	-	19
Dikd. Prizması.-2	4,33	-	23
Üçgen prizma	3,78	12	30
Küp-1	4,98	8	-
Küp-2	4,95	-	20

Her farklı şekil grubu için elde edilen sonuçlar küresel malzemelerin değerlendirilmesinde olduğu gibi boyutsuz sürtünme faktörü (f_v) ve modifiye

Reynolds sayısı (Re_m) kullanılarak toplu bir şekilde gösterilmiş ve Ergun denklemi ile kıyaslanmıştır.

Halka şeklindeki malzeme için 18 deney setinde farklı gözeneklilik aralıklarında elde edilen 681 adet deney verisi Şekil 5.5’de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : Halka şeklinde malzemeye ait deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.

Endüstriyel uygulamalarda kullanımına yaygın olarak rastlanan halka şeklindeki malzemelerin $d_{iç}/d_{dış}$ oranı ile h/D oranı gerek kolon tasarımı gerek yük kaybı oluşumu açısından çok önemlidir (Afandizadeh ve Foumeny, 2001).

Bu oranların $0,4 < d_{iç}/d_{dış} < 0,8$ ve $0,75 \leq h/D < 1,5$ aralıklarında bulunması halinde aynı dış çap ve yükseklik değerine sahip silindir şeklindeki taneciklere kıyasla %20-30 daha fazla yüzey alanı elde edilebileceği belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan halkalara ait ilgili oranlar belirtilen aralıklar içinde kalmaktadır (Çizelge 5.4).

Halkalar ampirik yük kaybı denklemleri ile tahmin edilen değerlerden daha fazla yük kaybı oluşturmaktadır (Nemec, 2003). Bu denklemlerde malzemenin şekil etkisi özgül yüzey kavramı içinde yer alsa da, halkanın farklı hidrodinamik yapısından dolayı şekil faktörünün yük kaybı üzerinde ilave bir etkisi olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.4 : Halka şeklindeki malzemelere ait geometrik oranlar.

Malzeme	$d_{iç}/d_{dış}$ ($0,4 < d_{iç}/d_{dış} < 0,8$)	h/D ($0,75 \leq h/D < 1,5$)
Halka-1	0,61	0,85
Halka-2	0,38	0,86
Halka-3	0,71	0,82

Carman (1937) halkanın içindeki boşlukların özellikle yüksek akış hızlarında ölü bölge oluşturabileceğini düşünerek Ergun tarafından önerilen katsayıların yaklaşık 2,5 kat artırılması gerektiğini ifade etmiştir. Sonntag (1960) yaptığı çalışmalar sonucu halka şeklindeki bir taneciğin iç bölgesinin sadece % 20'lik kısmından akış geçtiğini tespit etmiş ve halka içinde oluşması muhtemel ölü bölgeleri göz önüne alarak düzeltme faktörü kullanılmasını önermiştir. Bu çalışmada iç çapı en küçük (1,84 mm) olan halka-2 malzemesinden oluşan yatak için elde edilen yük kayıpları, diğer iki halkayla karşılaştırıldığında Ergun denklemi ile tahmin edilen yük kayıplarına en yakın değerleri oluşturmuştur. Bu halkanın iç çapının küçük olması nedeniyle boşluktaki su hacminin durağan olması ve bu sebeple şeklin aslında kapalı bir şekil olarak davranması neticesinde Ergun denkleminin daha yakın tahmin verdiği düşünülmektedir. Bununla beraber f_v - Re_m grafiğinin eksenlerinin logaritmik olduğu ve gerçek farkların çok daha büyük olduğu gözden kaçırılmamalıdır.

Nemec ve Levec (2005), etkin gözenekliliğin azalması sonucu yük kaybının artacağı bilgisinden yola çıkarak yalnızca halka şeklindeki malzemeler için kullanılmak üzere Sonntag (1960) tarafından gözeneklilik için önerilen düzeltmeleri de dikkate almış ve Ergun tarafından teklif edilen k_1 ve k_2 katsayılarının aşağıdaki şekilde değiştirilmesini teklif etmiştir.

$$A = 150 \left[\frac{\varepsilon^3}{\left(1 - \frac{(1 - \varepsilon)(V_{fc} - mV_i)}{V_p}\right)^3} \right] \left(\frac{(S_{fc} + mS_i) d_{eş}}{V_p} \frac{d_{eş}}{6} \right) \quad (5.6)$$

$$B = 1,75 \left[\frac{\varepsilon^3}{\left(1 - \frac{(1 - \varepsilon)(V_{fc} - mV_i)}{V_p}\right)^3} \right] \left(\frac{(S_{fc} + mS_i) d_{eş}}{V_p} \frac{d_{eş}}{6} \right) \quad (5.7)$$

V_{fc} : Halka ile aynı dış çap ve yüksekliğe sahip silindirin hacmi

V_i : Halkanın iç hacmi

V_p : Halkanın hacmi

S_{fc} : Halka ile aynı dış çap ve yüksekliğe sahip silindirin yüzey alanı

S_i : Halkanın iç kısmının yüzey alanı

m: Akışın geçtiği iç bölgenin oranı (0,2)

m katsayısının Sonntag (1960) tarafından önerildiği şekilde 0,2 olarak alınabileceği belirtilmiştir (Nemec ve Levec, 2005).

Nemec ve Levec (2005) bu katsayıları $d_{iç}$: 1,3 mm, $d_{dış}$: 3,2 mm ve h: 5 mm olan ($d_{iç}/d_{dış}$: 0,41) tek bir halka boyutu ile çalışarak önermişlerdir. Teklif edilen katsayılar gözenekliliğe bağlı olarak değiştiğinden bu çalışma kapsamında kullanılan halkalar için hesaplanan katsayılar yatağın gözeneklilik değerleri ile birlikte Çizelge 5.5'de verilmiştir.

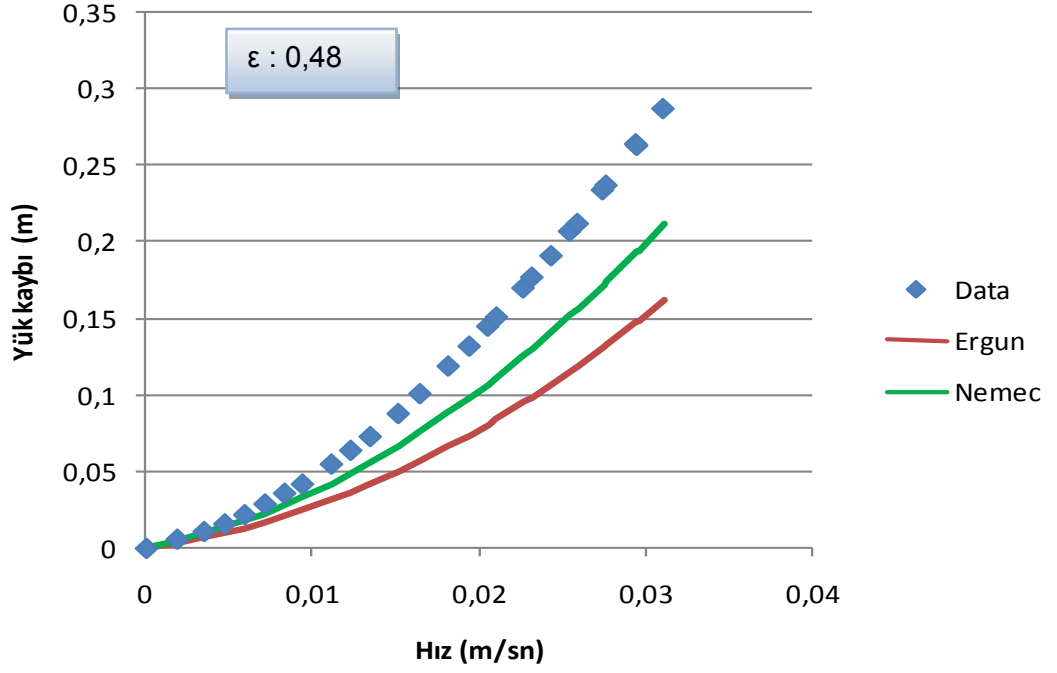
$d_{iç}/d_{dış}$ oranı arttıkça A ve B katsayılarının da artış gösterdiği görülmektedir. Nemec ve Levec (2005) in çalışmalarında kullandığı halka ile çok yakın $d_{iç}/d_{dış}$ oranına sahip halka-2 şeklindeki malzeme için hız-yük kaybı grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.5 : Halka şeklindeki malzemeler için Nemec ve Levec tarafından önerildiği şekilde belirlenmiş A ve B katsayıları.

Malzeme	ϵ	A	B
Halka -1 ($d_{iç}/d_{dış}$: 0,61)	0.62	367	3.71
	0.65	308	3.11
	0.64	324	3.28
	0.63	344	3.47
	0.62	368	3.71
	0.65	309	3.12
	0.63	348	3.52
Halka - 2 ($d_{iç}/d_{dış}$: 0,38)	0.53	196	2.01
	0.49	211	2.17
	0.50	206	2.11
	0.52	199	2.05
	0.48	215	2.21
Halka - 3 ($d_{iç}/d_{dış}$: 0,71)	0.50	208	2.13
	0.69	531	5.39
	0.67	610	6.19
	0.67	598	6.07
	0.69	527	5.35
	0.70	478	4.85

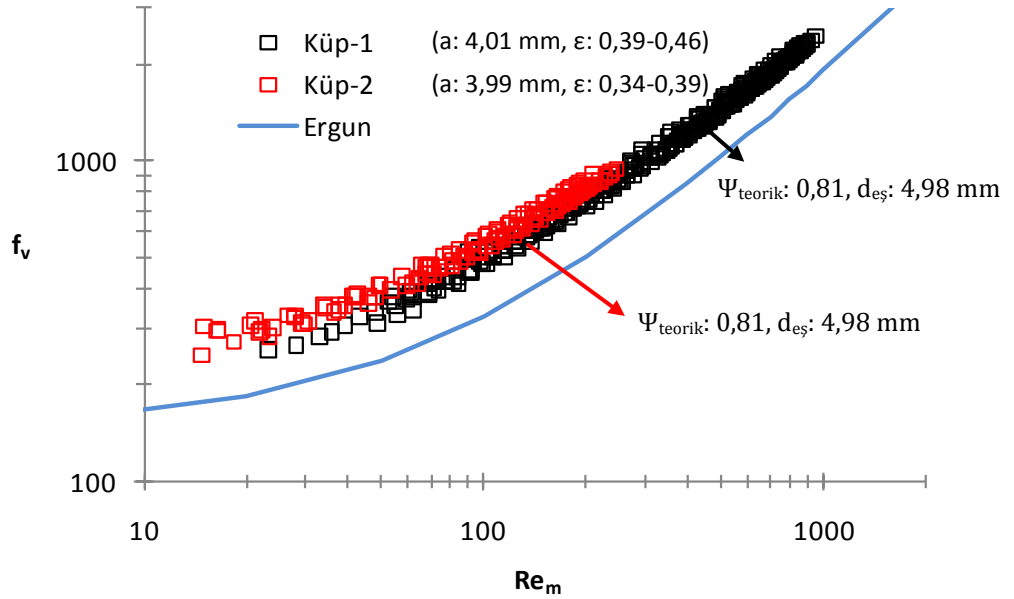
Nemec ve Levec (2005) tarafından önerilen katsayılar ile hesaplanan yük kayıpları Ergun (1952) denkleminde kıyasla daha yüksek tahminler vermiş ancak yine de gerçek yük kaybını öngörmekte başarılı olmamıştır. Bu bulgu halka şeklindeki malzemelerden oluşan sabit yataklarda yalnızca gözeneklilik için düzeltme yapmanın yeterli olmadığını düşündürmektedir.

Şekil 5.7 küp şeklindeki malzeme için 8 deney setinde farklı gözeneklilik aralıklarında elde edilen 447 adet deney verisini göstermektedir.



Şekil 5.6 : Halka-2 malzemesine ait hız-yük kaybı değişimi.

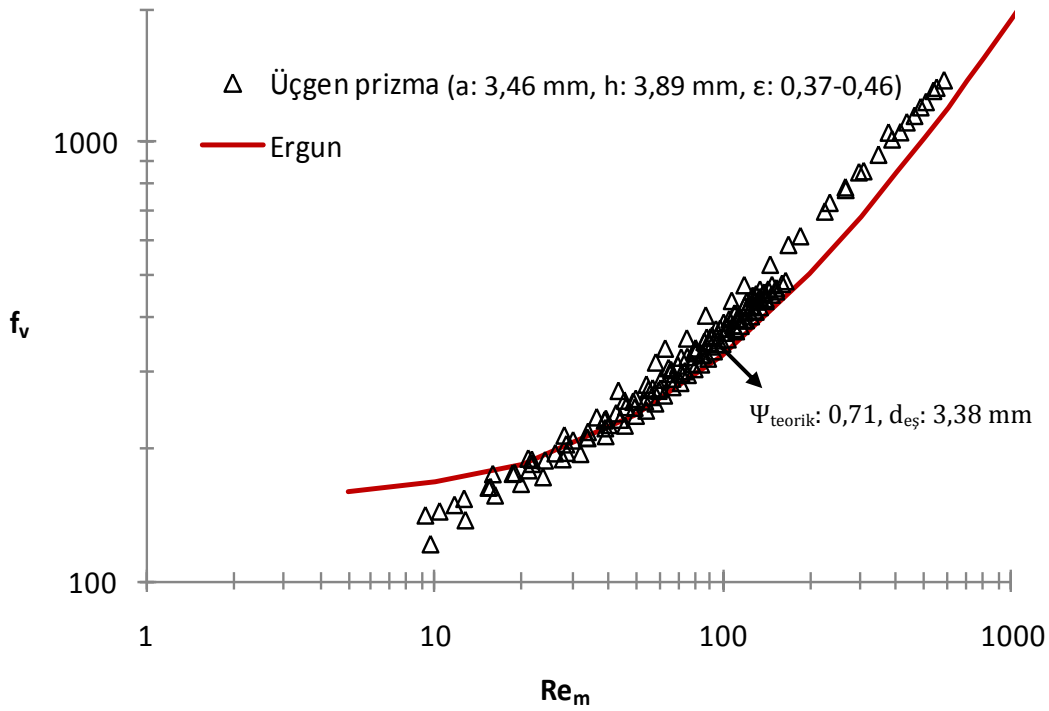
Re sayısı aralığındaki farklılık, deneylerin küp-1 malzemeleri ile 4 cm çaplı kolonda, küp-2 malzemeleri ile ise 10,04 cm çaplı kolonda yürütülmesinden kaynaklanmaktadır. Her iki durum için de Ergun (1952a) denkleminin $10 < Re_m < 1000$ aralığında deneysel olarak elde edilen yük kayıplarından daha düşük tahminler verdiği görülmektedir.



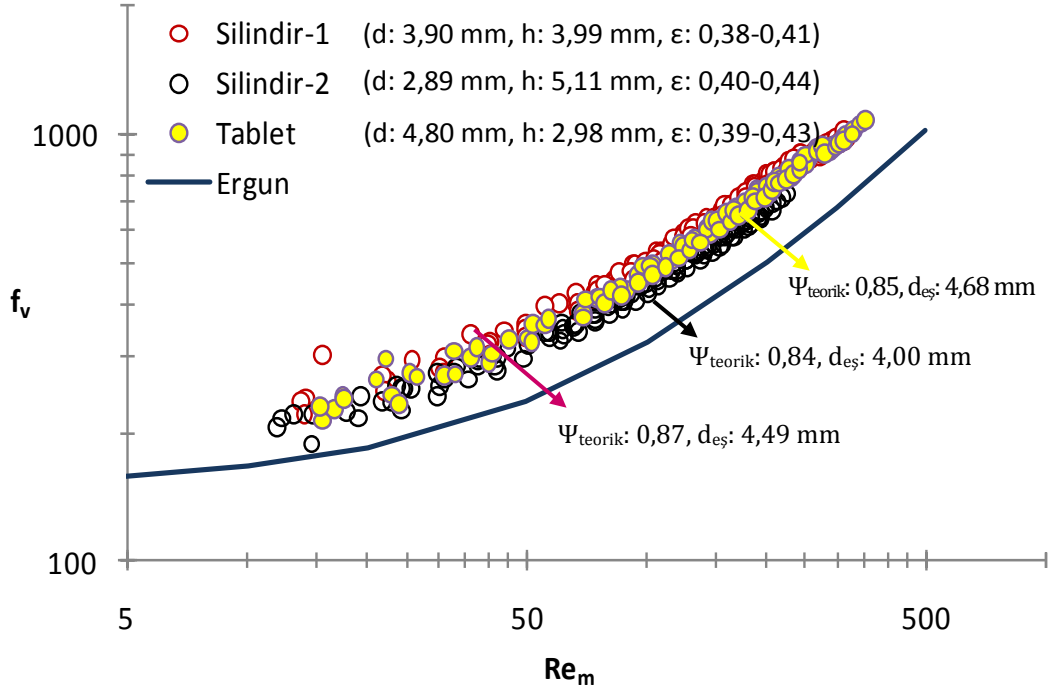
Şekil 5.7 : Küp şeklinde malzemeye ait deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.

Üçgen prizma şeklindeki malzeme için 4 deney setinde farklı gözeneklilik aralıklarında elde edilen 159 adet deney verisi Şekil 5.8’de göstermektedir.

Üçgen prizma çalışılan diğer malzeme grupları ile karşılaştırıldığında Ergun denklemine en yakın uyum gösteren şekil olmuştur. Buna karşın $10 < Re_m < 30$ ve $200 < Re_m < 1000$ aralığında eğriden bir sapma olduğu da gözlenmektedir. Yük kaybı oluşumu açısından genel olarak değerlendirildiğinde, üçgen prizma şeklindeki malzemelerin Ergun denklemine yakın fakat farklı bir eğimi olan bir yol izlediği görülmüştür.



Şekil 5.8 : Üçgen prizma şeklinde malzemeye ait deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.



Şekil 5.9 : Silindir şeklinde malzemeye ait deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.

Şekil 5.9'da silindir şeklindeki malzeme için 9 deney setinde farklı gözeneklilik aralıklarında elde edilen 338 adet deney verisi gösterilmiştir. Tüm silindirler için yük kaybı oluşumunun paralel bir gidişat gösterdiği ve Ergun (1952a) denklemi ile tahmin edilen değerlerin üstünde olduğu görülmektedir.

Gerçek şartlarda yatağın ortalama gözeneklilik değeri tek başına yatak özelliklerini tanımlamak için yeterli bir parametre değildir. Akışkanın izlediği yolun kıvrımlılığı gibi ilave parametrelere de ihtiyaç vardır. Fomeny ve diğ. (1996) silindir şeklindeki taneciklerden oluşan bir yatağın küresel taneciklerden oluşan yatakla kıyaslandığında daha kıvrımlı bir yapı oluşturduğunu belirtmiştir. Yatak özelliklerini tanımlamak için ayrıca dinamik özgül yüzey, şekil faktörü gibi parametrelerin de kullanılabileceği çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir. Ancak bu parametreler deneysel olarak belirlenmesi oldukça zor fiziksel kavramlardır. Bu açıdan değerlendirildiğinde Ergun (1952a) denklemi bünyesindeki parametrelerin kolay tespit edilebilir olması nedeniyle diğer denklemlere avantaj sağlamaktadır. Fakat küresel olmayan malzemeler için modifiye edilerek kullanılması gerekliliği, bu çalışma neticesinden elde edilen sonuçlarla da doğrulanmaktadır.

Nemec ve Levec (2005) literatürdeki geçmiş çalışmalar ile kendi deneysel çalışmalarına ait datayı değerlendirmiş ve silindirler için h/d oranının 1 den uzaklaştıkça A ve B katsayılarının arttığını tespit etmişlerdir. Bunun sonucu olarak

da Ergun (1952a) denklemi için gerekli olduğu düşünölen düzeltmenin katsayılar üzerinde, ve tespit edilmesi kolay olan küresellik katsayısı ile ilişkilendirilerek yapılmasını teklif etmişlerdir. Silindir şeklindeki malzemeler için kullanılmak üzere önerilen katsayılar aşağıda verilmiştir.

$$A = 150/\psi^{(\frac{3}{2})} \quad (5.8)$$

$$B = 1,75/\psi^{(\frac{4}{3})} \quad (5.9)$$

Çizelge 5.6'da bu çalışmada kullanılan silindirlere ait geometrik oranlar ile Nemec ve Levec (2005) tarafından önerildiği şekilde hesaplanmış A ve B katsayıları verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Silindir şeklindeki malzemeler için h/d oranları ile Nemec ve Levec tarafından uyarlanmış A ve B katsayıları.

Malzeme	h/d	A	B
Silindir-1	1,02	172	2,00
Silindir-2	1,77	178	2,07
Tablet	0,62	176	2,06

h/d oranının 1'e çok yakın olduğu silindir-1 ile karşılaştırıldığında h/d oranı 1,02'den eşit sayılabilecek uzaklıkta bulunan silindir-2 ve tablet için A ve B değerlerinin birbirine yakın ve silindir-1 için tahmin edilen değerlerden yüksek olduğu görölmektedir.

Yine de Nemec ve Levec (2005) tarafından öngörölen bu düzeltme ile halkalarda olduğu gibi Ergun denklemine kıyasla deneysel verilere daha yakın ancak gerçek yük kaybından daha düşük değerler elde edilebilmiştir.

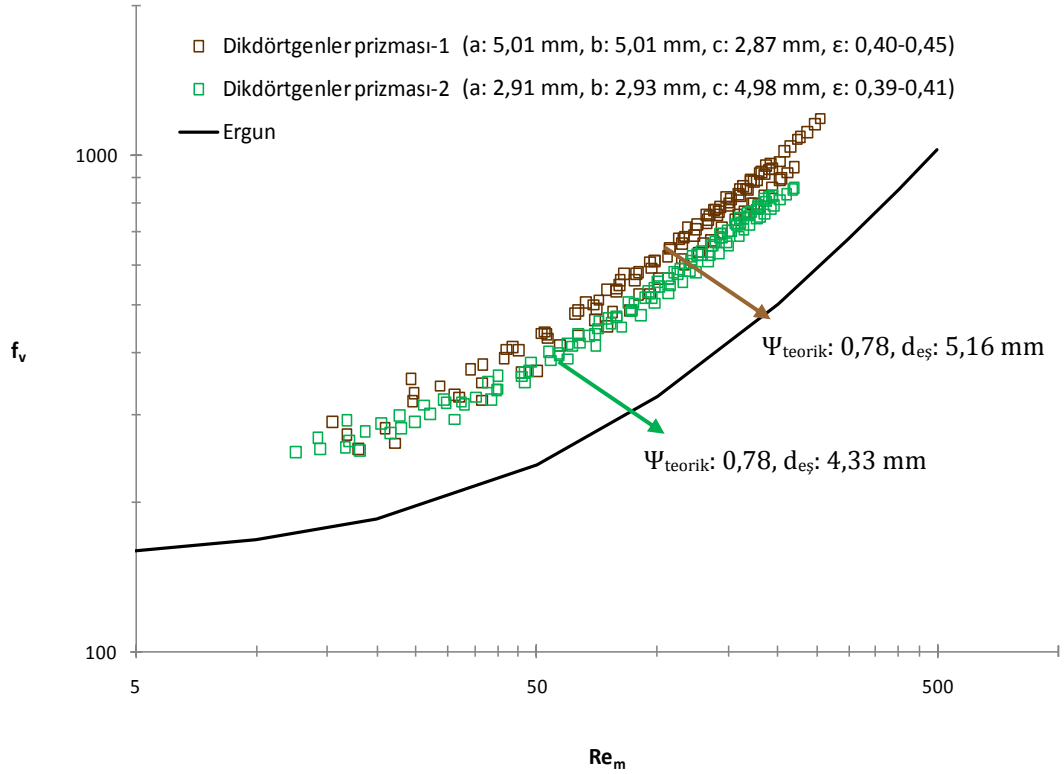
Endüstrilerde yaygın olarak kullanılan bir şekil olması nedeniyle Foumeny ve diğ. (1996) silindirler için farklı D/d oranlarında ve geniş Re_m sayısı aralıklarında (70-3700) kullanılabilecek bir denklem önermişlerdir. Bu denklemde k_1 katsayısının hemen hemen tüm koşullarda sabit kaldığı, fakat k_2 katsayısının D/d oranına bağılı olarak değiştiği kabul edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan silindirler için k_2 katsayısı Foumeny ve diğ. (1996) tarafından önerildiği şekilde hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5.7'de verilmiştir.

$$f_v = 211 + (3,81 - \frac{5,265}{(\frac{D}{\psi d_{es}})} - \frac{7,047}{(\frac{D}{\psi d_{es}})^2})Re_m \quad (5.10)$$

Çizelge 5.7 : Silindir şeklindeki malzemeler için Foumeny ve diğ. (1996) tarafından uyarlanmış katsayılar.

Malzeme	$D/(\psi d_{eş})$	k_1	k_2
Silindir-1	25,57	211	3,59
Silindir-2	29,74	211	3,62
Tablet	25,20	211	3,59

Bu yeni katsayılar ile deneysel çalışma sonucu elde edilen yük kaybı verileri arasındaki farklar % ağırlıklı ortalama hata olarak Çizelge 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 : Dikdörtgenler prizması şeklinde malzemeye ait deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.

Şekil 5.10’da dikdörtgenler prizması şeklindeki malzeme için 9 deney setinde farklı gözeneklilik aralıklarında elde edilen 246 adet deney verisi gösterilmiştir. Her iki malzeme için de yük kaybı oluşumunun Ergun (1952a) denklemi ile tahmin edilen değerlerin üstünde olduğu görülmektedir. Ancak teorik küresellik değeri aynı olan bu iki malzeme için yük kaybı oluşumundaki farklılık küreselliğe ilaveten farklı faktörlerin de rol oynadığını düşündürmektedir.

Tüm düzgün şekilli malzemeler için elde edilen değerler Ergun denklemi ile karşılaştırmalı olarak Şekil 5.11’de verilmiştir. Üçgen prizma haricindeki diğer malzemeler için teorik küresellik değeri azaldıkça eğriden sapma miktarının arttığı

görülmektedir. Bu durum Ergun denkleminin teorik küresellik ve eşdeğer çap değeri bilinen malzemeler için mevcut katsayılar (150 ve 1,75) ile kullanıldığında kabul edilebilir hata yüzdesi ile yük kaybı tahmini yapamadığını göstermektedir. Bu katsayıların küreselliğe bağlı bir fonksiyon olacak şekilde yeniden düzenlenmesi halinde denklemin düzgün şekilli malzemeler için de başarılı sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Teorik küresellik değeri Bölüm 3.10'da anlatıldığı şekilde hesaplanan düzgün şekilli malzemeler için Ergun (1952a) denklemi ile tahmin edilen yük kaybı değerlerinde hesaplanan ağırlıklı ortalama % rölatif hata Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Ergun (1952a) denkleminin üçgen prizma haricindeki diğer şekillerdeki malzemeler için % 25 ile % 55 arasında değişen hatalar ile yük kaybı tahmini verdiği görülmektedir. Teorik küresellik değeri 1'e, yani denklemin doğrulukla tahmin verdiği kabul edilen sınırlarına yaklaştıkça % hata değeri azalmaktadır. En yüksek hatanın halka şeklindeki malzemeler için olduğu tespit edilmiştir.

Benzer bir değerlendirme teorik küresellik katsayısı ile Ergun (1952a) denklemi kullanılarak tespit edilen deneysel küresellik katsayısı arasında yapılmıştır (Şekil 5.13).

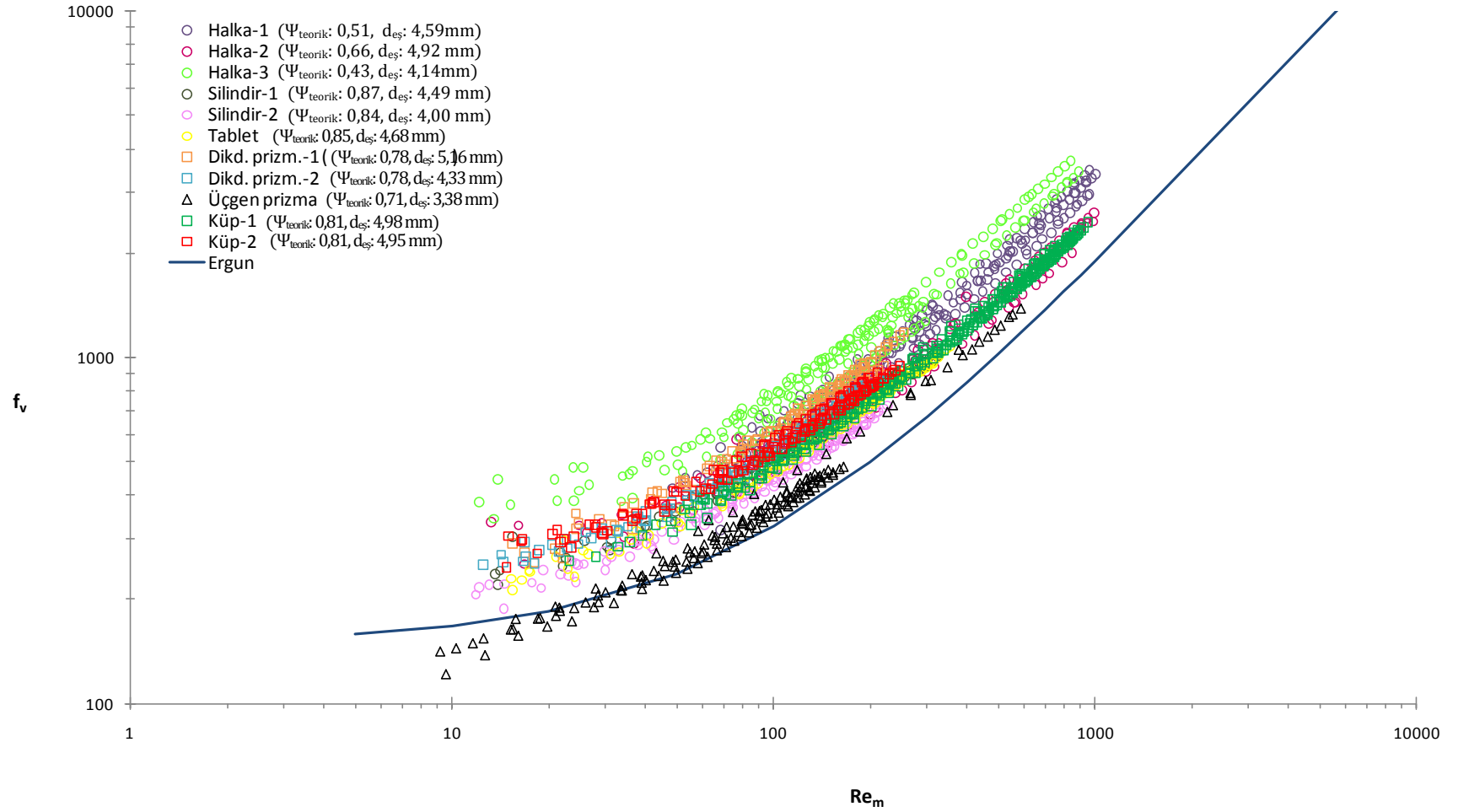
Her malzeme şekli için Ergun denklemi ile bulunan küresellik katsayısının teorik küresellik katsayısından düşük kaldığı görülmüştür. Bu iki küresellik katsayısı arasındaki ilişkiyi tahmin etmek üzere değerlendirmeler yapılmış ve teorik küresellik değeri bilinen bir malzeme için aşağıdaki denklem yardımıyla düzeltilmiş bir küresellik değerinin hesaplanabileceği dolayısıyla Ergun denklemini kullanarak daha yüksek doğrulukla yük kaybı tahmini yapılabileceği ortaya konmuştur.

$$\psi_{deneysel} = 0,96 (\psi_{teorik}) - 0,16 \quad (5.11)$$

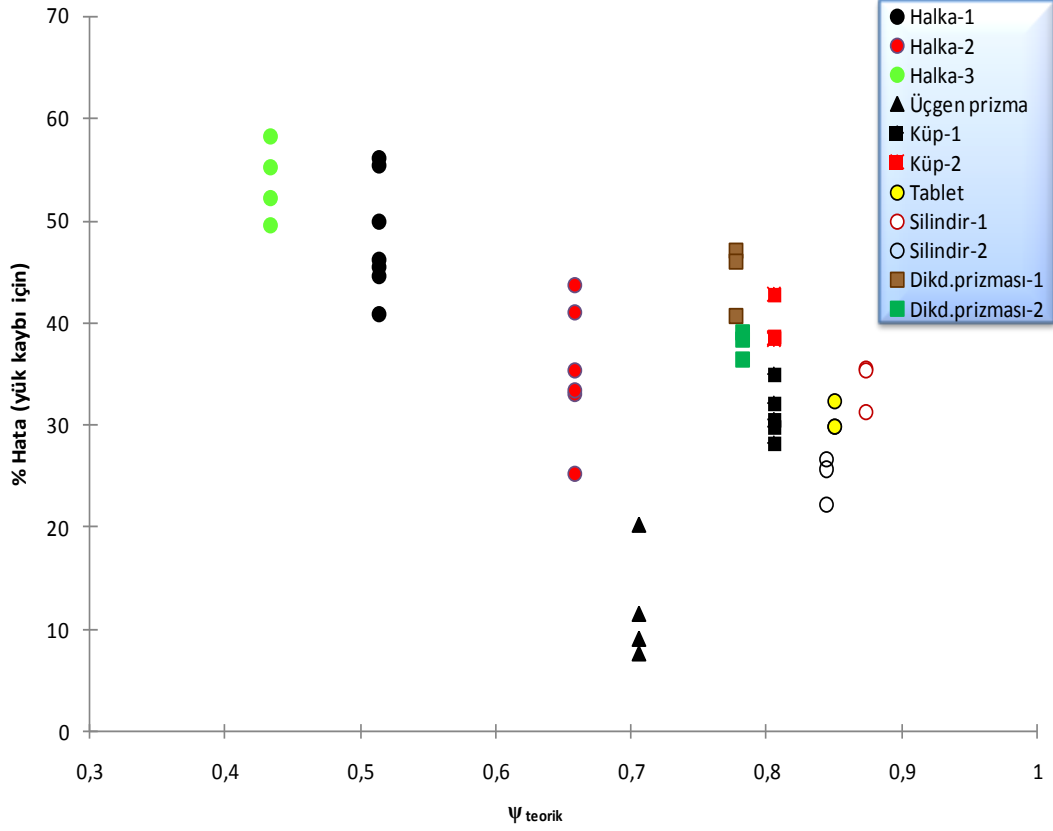
Üçgen prizma şeklindeki malzemenin teorik küresellik değeri Ergun denklemi ile bulunan değere oldukça yakındır. Bu nedenle, teorik küresellik ve deneysel küresellik arasındaki ilişkiyi tahmin etmek üzere önerilen denklem üçgen prizma şeklindeki malzemeleri hariç bırakarak şekilde yeniden düzenlerek;

$$\psi_{deneysel} = 0,96 (\psi_{teorik}) - 0,17, \quad R^2:0,9621 \quad (5.12)$$

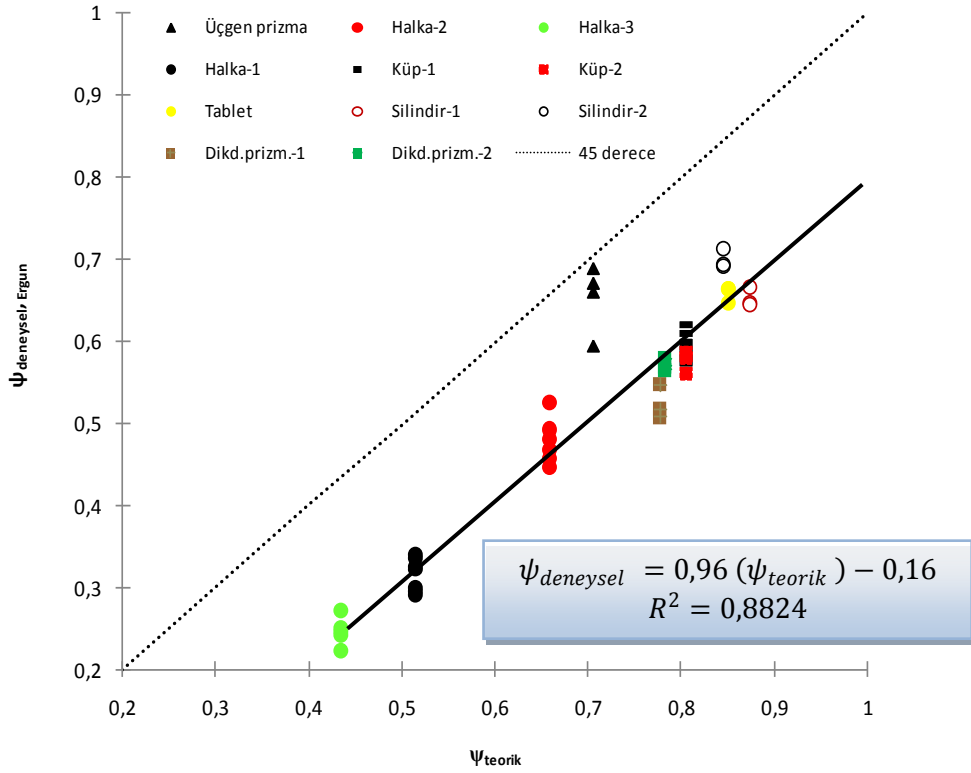
denklemini elde edilmiştir. Bu denklem halka, silindir, küp, dikdörtgen prizma gibi farklı şekillerden oluşan yataklarda düzeltilmiş küresellik katsayısının tahmini için kullanılabilecek pratik bir yaklaşımdır.



Şekil 5.11 : Tüm düzgün şekilli malzemeler için deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması.

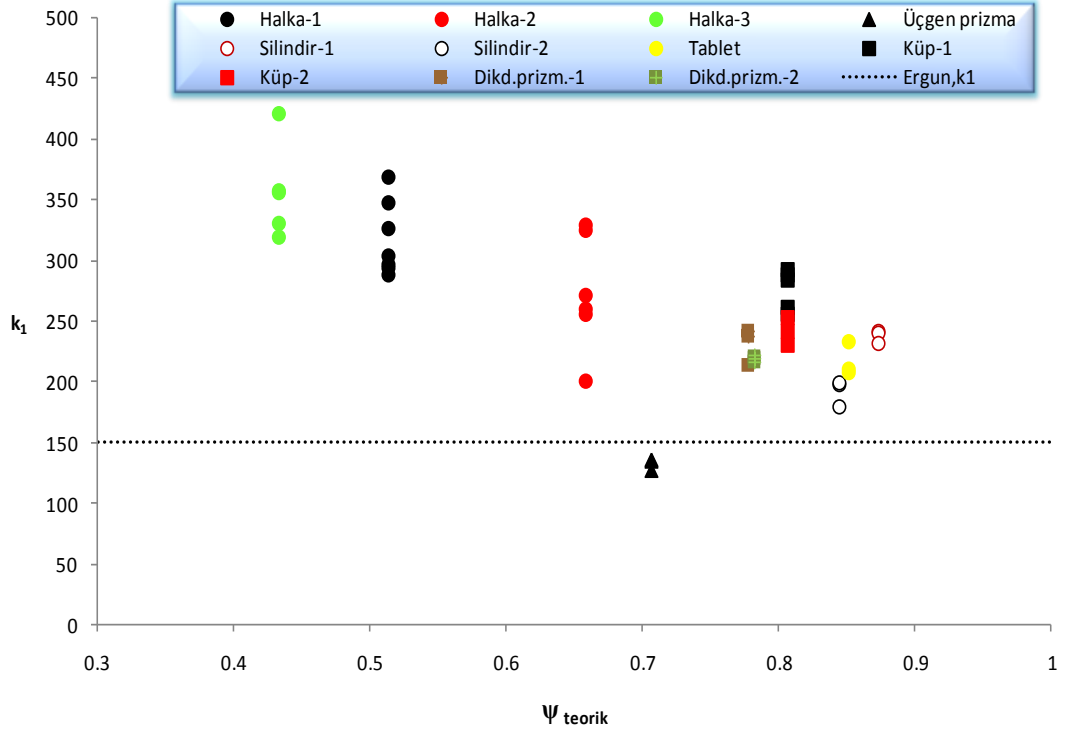


Şekil 5.12 : Yük kaybı tahminlerindeki rölative hatanın teorik küresellik değişimi.



Şekil 5.13 : Deneysel ve teorik küresellik katsayısı arasındaki ilişki.

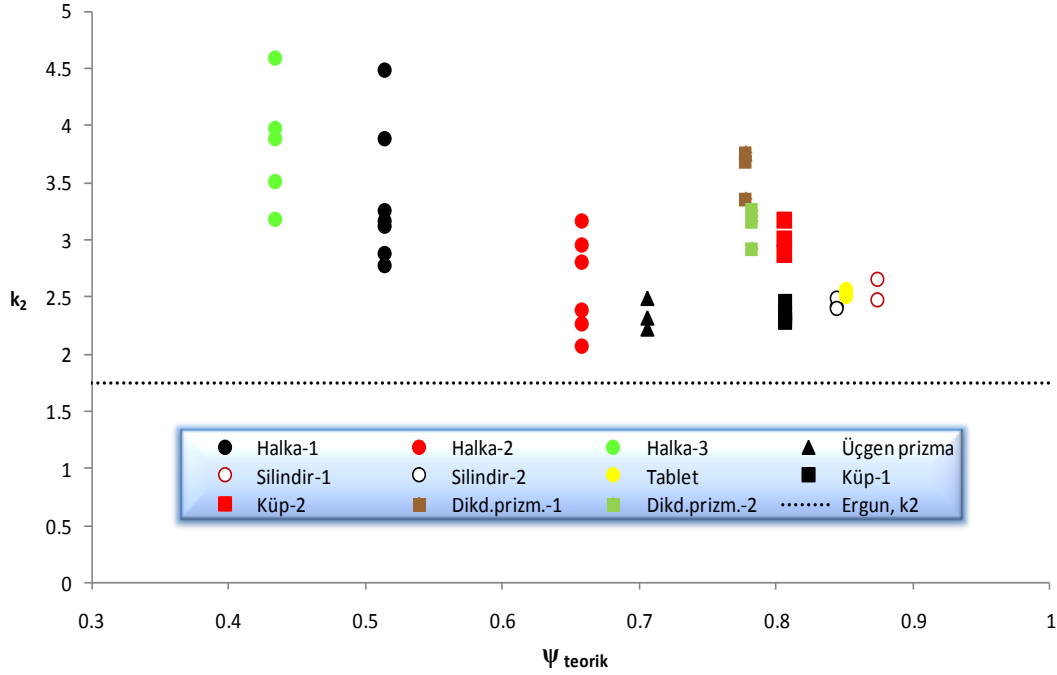
Düzgün şekilli malzemelerin küresellik katsayısı ve eşdeğer çapı teorik olarak hesaplanabildiğinden, bu değerler ve deneysel olarak elde edilen yük kaybı ölçümleri yardımıyla Ergun denkleminde yer alan k_1 ve k_2 katsayıları belirlenmiştir (Şekil 5.14-5.15). Her iki katsayı da Ergun'un önerdiği değerlerin üstünde kalmıştır. Özellikle halka şeklindeki malzemeler için k_1 katsayısı Ergun tarafından önerilen 150 değerinin çok üstünde bulunmuştur.



Şekil 5.14 : Farklı küresellik katsayısına sahip malzemeler için belirlenen k_1 katsayısı.

Aynı zamanda tek bir halka şekli için k_1 katsayısının geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir. Bu durum halkalar için gözenekliliğin de önemli bir faktör olduğunu, küresellik katsayısının yanında gözenekliliği de içerecek ilave bir düzeltmenin gerektiğini düşündürmektedir. Teorik küresellik değeri 1'e yaklaştıkça katsayının da 150'ye yaklaştığı görülmektedir.

Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler için elde edilen yük kaybı değerleri Ergun denkleminde ilave olarak sabit yataklarda yük kaybı tahmini için önerilen alternatif modeller (Çizelge 5.1) ile de karşılaştırılmıştır. Ağırlıklı ortalama % rölatif hata cinsinden ifade edilen sonuçlar Çizelge 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.15 : Farklı küresellik katsayısına sahip malzemeler için belirlenen k_2 katsayısı.

Nemec (2003) kendi deneysel çalışmasında kullandığı halka şeklindeki malzemenin eşdeğer çapının ($d_{eş}$) hesaplanması adımlarında iç hacmin göz önüne alınmadığını belirtmiştir. Bunun sebebi muhtemelen halkanın iç çapının oldukça küçük olması ($d_{iç}:1,3 \text{ mm}$, $d_{dış}:3,2 \text{ mm}$) ve bu hacimde su akışının olmayacağını düşünülmesidir. Bu çalışmada kullanılan halkalar için Nemec'in önerdiği katsayılar ile yük kaybı hesaplanırken bu yaklaşım kullanılmış ve halkalara ait eşdeğer çap hesapları iç hacim dikkate alınmadan yapılmıştır. Dolayısıyla Çizelge 5.9'da halkalar için Nemec tarafından öngörülen yük kayıplarındaki % rölatif hata değerleri de bu varsayımlarla bulunan değerlerdir. Ancak, halka şeklindeki tüm malzemeler için iç hacmin ölçü bölge sayılmasının genelleştirilebilir bir kavram olmadığı düşünülmektedir. Bu amaçla çalışma kapsamında kullanılan ve farklı iç çap değerlerine sahip halkalar için eşdeğer çap hesapları hem Nemec'in önerdiği şekilde iç hacim dikkate alınmadan hem de diğer malzemelere uygulanan şekilde (malzemenin tüm boyutları dikkate alınarak) hesaplanmıştır. İki farklı yöntemle hesaplanan eşdeğer çap ve bu çaplar kullanılarak öngörülen yük kaybındaki % rölatif hata değerleri Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 : Farklı yöntemlerle hesaplanan eşdeğer çap ve buna bağlı yük kaybında tahmini % rölatif hata değerlerinin karşılaştırılması.

	d_{es} , mm	d_{es}^* , mm	% Hata	% Hata*
Halka-1 $d_{iç}$: 3 mm, $d_{dış}$: 4,93 mm, h: 4,19 mm	4,59	5,35	8,0	22,0
Halka-2 $d_{iç}$: 1,84 mm, $d_{dış}$:4,78 mm, h: 4,09 mm	4,92	5,19	18,6	14,1
Halka-3 $d_{iç}$: 3,49 mm, $d_{dış}$:4,90 mm, h: 4 mm	4,14	5,24	51,6	91,9

*: Nemec tarafından öngörülen şekilde iç hacim dikkate alınmadan yapılan hesaplar

Çizelge 5.8'den görüldüğü üzere halkanın iç hacminin ölü bölge olarak varsayılması $d_{iç}/d_{dış}$ oranı sırayla 0,61 ve 0,71 olan halka-1 ve halka-3 için daha yüksek yük kaybı tahminlerine neden olmuştur. $d_{iç}/d_{dış}$ oranı 0,38 olan halka-2 için ise öngörülen yük kaybında % 7'lik bir azalma sağlamıştır. Nemec'in yaklaşımının $d_{iç}/d_{dış} \leq 0,40$ olan halkalar için uygulanabilir olduğu düşünülmektedir, ancak bu oranın sınırlarının güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi için farklı $d_{iç}/d_{dış}$ oranına sahip halkalarla deneyler yapılması faydalı olacaktır.

Ergun denklemi teorik küresellik ve d_{es} -teorik değerleri ile kullanıldığında üçgen prizma dışında kalan tüm düzgün şekilli malzemeler için % 24,8 ile % 54,8 arasında hata ile yük kaybı tahmini yapılabilmektedir.

Teorik küresellik değeri 0,71 olan üçgen prizma şeklindeki malzeme için Ergun denkleminin oldukça düşük bir hata (% 11,3) ile tahmin vermesi herhangi bir faktör ile ilişkilendirilememiştir. Hicks, Tallmadge, Lee ve Ogawa ve Montillet denklemleri de Ergun denklemi ile benzer şekilde diğer malzemeler ile kıyaslandığında üçgen prizma şeklindeki malzeme için en düşük hata yüzdesi ile tahmin yapmaktadır.

Alternatif olarak önerilen diğer denklemlerin hiç birisi tek başına farklı şekillerdeki tüm malzemeler için en uygun olarak nitelendirilebilecek denklem özelliği taşımamaktadır. Halkalar için kullanılmak üzere yeni katsayılar öneren Nemec (2005) bu malzemeler için yük kaybını % 14,1-% 91,9 hata ile tahmin etmektedir. Aralığın bu kadar geniş olmasının nedeninin Nemec'in teorik eşdeğer çap değerini halkanın iç hacmini göz önüne katmadan hesaplaması olduğu tahmin edilmektedir. Oysa ki bu çalışmada olduğu gibi iç çapı göz ardı edilemeyecek kadar geniş halkalar söz konusu olduğunda denklem Ergun denkleminden çok daha yüksek hatalar vermektedir. Önerilen yeni katsayıların iç hacmin dikkate alınmayabileceği $d_{iç}/d_{dış}$ oranları belirtilmeden tüm halkalar için kullanılamayacağı düşünülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde yalnızca halkalar için geçerli olduğu iddia edilen bir denklemin yük kaybını % 10'nun üzerinde hata ile tahmin etmesi denklemin geliştirilmesi gerektiğini düşündürmektedir.

Çizelge 5.9 : Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler için yük kaybında ağırlıklı ortalama % rölatif hata değerleri.

	Ağırlıklı ortalama (%) rölatif hata										
	*Re _m	Rose	Rose ve Rizk	Hicks	Tallmadge	Sug Lee ve Ogawa	Kürten ve diğ.	Ergun	Özahi ve diğ.	Nemec ve Levec	Foumeny ve diğ.
Halka - 1	6-1004	370,2	499,8	55,0	50,1	68,1	42,3	49,0	50,7	22,0	
Halka - 2	13-993	90,1	144,4	43,4	37,0	53,2	15,2	35,5	37,5	14,1	
Halka - 3	12-890	580,0	757,6	60,8	55,4	72,1	51,5	54,8	56,1	91,9	
Silindir - 1	13-323	20,3	15,9	-**	32,4	40,4	4,6	33,9	35,3	24,4	18,4
Silindir -2	12-225	17,9	31,1	-	20,7	25,3	17,6	24,8	25,2	11,2	30,0
Tablet	15-353	16,4	21,9	-	28,9	37,0	7,1	30,6	31,9	18,4	23,5
Dikd. prizm.- 1	15-254	21,1	27,0	56,2	42,1	47,6	15,7	44,8	45,4		
Dikd. prizm.-2	12-220	22,9	26,3	53,2	34,5	38,2	5,2	37,9	38,2		
Küp -1	23-951	13,4	28,2	38,8	38,4	55,2	14,7	32,4	35,5		
Küp - 2	15-247	49,6	34,9	-	42,5	46,1	11,7	44,5	45,3		
Üçgen prizma	9-586	49,7	86,9	34,1	10,6	21,2	40,1	11,3	12,7		

*: $Re_m = \rho(d_{e\psi})V/\mu(1-\epsilon)$

** : Hicks denkleminin $Re_m > 300$ sayılarında geçerli olduğu belirtildiğinden, Silindir-1, Silindir-2, Tablet, ve Küp-2 malzemelerine ait hata değerleri hesaba katılmamıştır.

Ergun denklemindeki katsayıların şekil gruplarına göre yeniden düzenlenmesini öneren Nemec (2005) silindirler için de küresellik katsayısına bağlı olan yeni katsayılar teklif etmiştir. Bu yeni katsayılar ile kullanıldığında yük kaybı tahminlerinin Ergun'un orijinal katsayıları ile hesaplanan yük kayıplarından daha düşük olduğu, ancak yine de % 11,2-24,4 aralığında kaldığı görülmüştür. Katsayıların küresellik ile ilişkilendirildikten sonra daha düşük tahminler vermesi yaklaşımın doğru olduğunu fakat önerilen katsayıların küreselliğin doğru bir fonksiyonu şeklinde ifade edilmediğini düşündürmektedir.

Silindirler için kullanılmak üzere önerilen bir diğer denklem de Foumeny ve diğ. (1996) tarafından ortaya konmuştur. Ergun denkleminden farkı k_2 katsayısının D/d ye bağlı olarak değişen bir fonksiyon olarak tanımlanması ve k_1 katsayısının sabit fakat 211 olarak önerilmesidir. Bu denklemin de Ergun denkleminden daha düşük, ancak kabul edilebilir hata sınırlarının üstünde bir oranla tahmin yaptığı görülmektedir.

Son yıllarda ortaya atılan ve Ergun denkleminin k_1 ve k_2 katsayılarının 160 ve 1,61 olarak değiştirilmesi gerektiğini iddia eden bir denklem (Özahi ve diğ., 2008) küresel malzemeler için hatayı azaltıcı bir yönde etki oluştururken, küresel olmayan malzemeler için çok düşük bir yüzde ile de olsa hatayı artırıcı yönde sonuç vermiştir. Bu durum katsayıların yalnızca sayısal değerlerinin değiştirilmesinin yeterli olmadığını, ancak küresellik ve/veya ilave şekil faktörleri ile ilişkilendirilmesi halinde doğruluk payı yüksek tahminlerin yapılabileceğini düşündürmektedir.

Şekil olarak birbirinden farklı bu malzeme grupları için Ergun denkleminin teorik küresellik ve çap değeri ile kullanıldığında yük kaybını kabul edilebilir doğrulukla tahmin edemediği görülmüştür. Denklemün gözeneklilik ve hız parametreleri ile ilişkisinin doğru bir şekilde ortaya konduğu kabulüyle, denklemin modifikasyonu için en uygun parametrenin k_1 ve k_2 katsayıları olduğu, pratik açıdan uygulanabilir olması bakımından da katsayılar için öngörülen bu değişikliğin küresellik katsayısı ile ilişkilendirilerek yapılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

5.3 Düzgün Şekilli Olmayan Malzemeler

Silika kumu, garnet ve perlit su filtrasyonunda yaygın olarak kullanılan malzemeler arasındadır. Son yıllarda su ve atıksu filtrasyonunda kırık cam kullanımına dair araştırmalar artış göstermiş, bu malzemenin doğal malzemelere alternatif olarak kullanımı ve bazı durumlarda çift tabakalı filtre yataklarında doğal malzemeler ile birlikte kullanımına dair çalışmalar ilgi çekmeye başlamıştır.

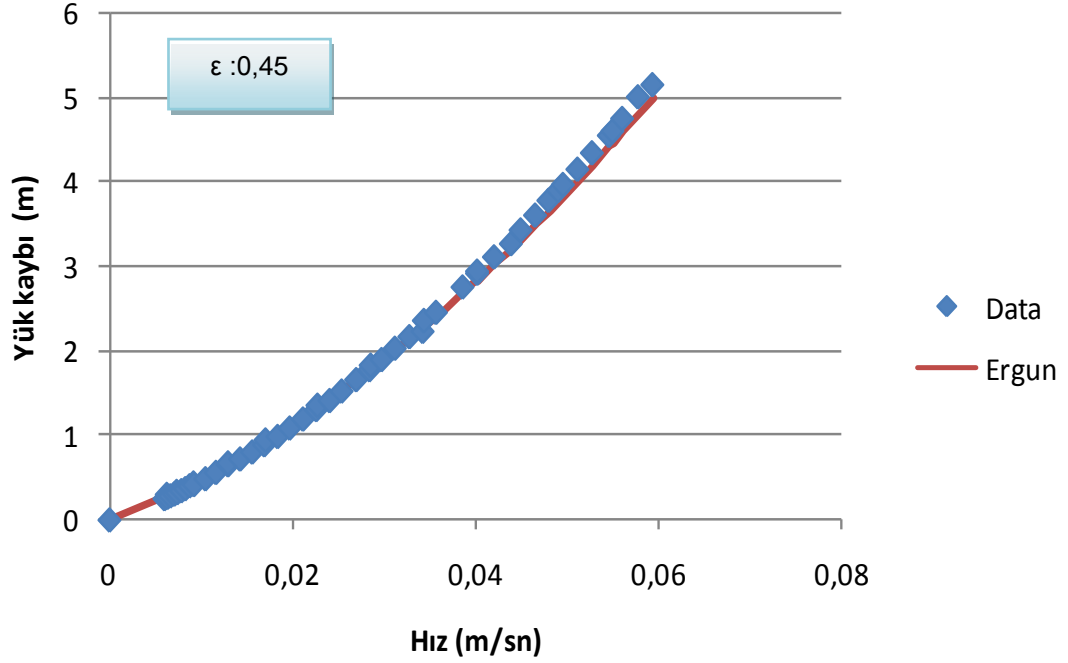
Bu bölümde; silika kumu, garnet ve perlit gibi doğal malzemelerin yanı sıra kırılarak ve elenerek oluşturulmuş kırık cam malzemeden oluşan filtre yataklarında yük kayıplarının tahmini için Ergun (1952a) denkleminin kullanımının geçerliliği araştırılmış ve sonuçlar kapsamlı bir biçimde değerlendirilmiştir.

Akışkan olarak, kaba parçacıkların deney sonuçlarını etkilemesi ihtimaline karşı filtre edilmiş şebeke suyu kullanılmış, değişik boyutlarda ve değişik kaynaklardan elde edilmiş malzemelerden oluşan sabit yataklarda yürütülen filtrasyon deneylerinde, Ergun'un teklif ettiği k_1 ve k_2 değerlerini değiştirmeden yük kaybı verilerinin ne kadar iyi temsil edilebildiği incelenmiştir.

Kum, antrasit, garnet, perlit, granüler aktif karbon gibi malzemelerin belirli bir şekilleri olmadığından özgül yüzeylerinin belirlenmesi güçtür. Özgül yüzeyi belirlemek üzere en çok kullanılan yöntem gözenekli ortamda yük kaybının ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Fakat bu şekilde belirlenen özgül yüzeyin gerçekten yüzey özelliklerini mi tanımladığı yoksa modele uydurulmuş bir parametre mi olduğu halen güncelliğini koruyan bir tartışma konusudur.

Trussell ve Chang (1999) kum ve antrasit gibi malzemeler için farklı katsayılar kullanılması gerektiğini iddia etmiş ve her değişik malzeme için bu katsayıların ayrı ayrı belirlenmesini önermiştir. Çevre Mühendisliği alanında el kitabı niteliği taşıyan bir kaynak olan '*Water Treatment: Principles and Design*' (MWH, 2005) isimli kitabın '*Granüler Filtrasyon*' bölümünde de yer bulan bu iddianın doğruluğu kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır.

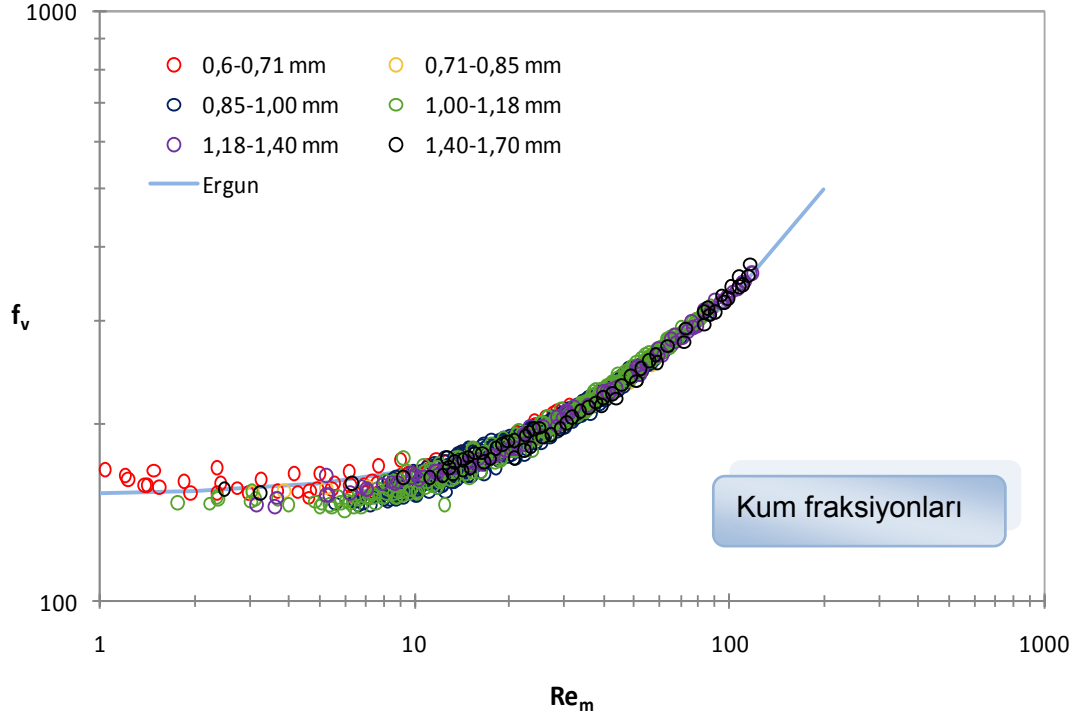
Bölüm 4.3'de özellikleri belirtilen 6 kum, 5 perlit, 8 garnet ve 3 kırık cam fraksiyonu ile sabit yatak deneyleri 4 cm çaplı kolonda yürütülmüştür. Her bir deney en az 3 farklı gözeneklilik değerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde hıza karşı yük kaybı ölçülmüştür. Şekil 5.16 1,00-1,18 mm kum fraksiyonundan oluşan yatağın tek bir gözeneklilik değeri için hız-yük kaybı eğrisini göstermektedir. Bu ve diğer düzgün şekilli olmayan malzemelere ait farklı gözeneklilik değerindeki tüm hız-yük kaybı grafikleri EKLER –B kısmında verilmiştir. Tüm deney setlerinde akış hızının (dolayısıyla yük kaybının) en az 30 farklı değerinde veri toplanmasına özen gösterilmiştir.



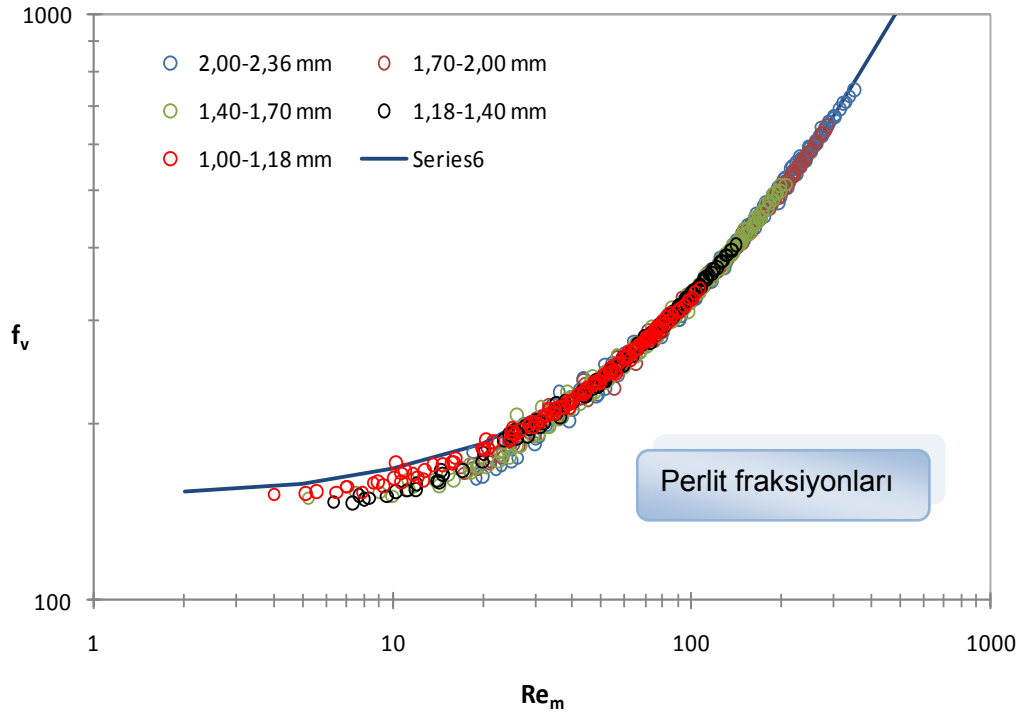
Şekil 5.16 : 1,00-1,18 mm kum fraksiyonundan oluşan 0,45 gözeneklilik değerindeki sabit yatağa ait hız-yük kaybı eğrisi.

Her farklı malzeme grubu için (farklı fraksiyonların tamamıyla) elde edilen sonuçlar boyutsuz sürtünme faktörü (f_v) ve modifiye Reynolds sayısı (Re_m) kullanılarak toplu bir şekilde gösterilmiş ve Ergun denklemi ile kıyaslanmıştır. Elenerek hazırlanmış 6 farklı kum fraksiyonu için 28 deney setinde elde edilen 1044; 6 perlit fraksiyonu için 18 deney setinde elde edilen 745; 8 garnet fraksiyonu için 25 deney setinde elde edilen 930 ve 3 farklı kırık cam fraksiyonu için 9 deney setinde elde edilen toplam 400 deney verisi, sırasıyla Şekil 5.17 – 5.20’de gösterilmiştir.

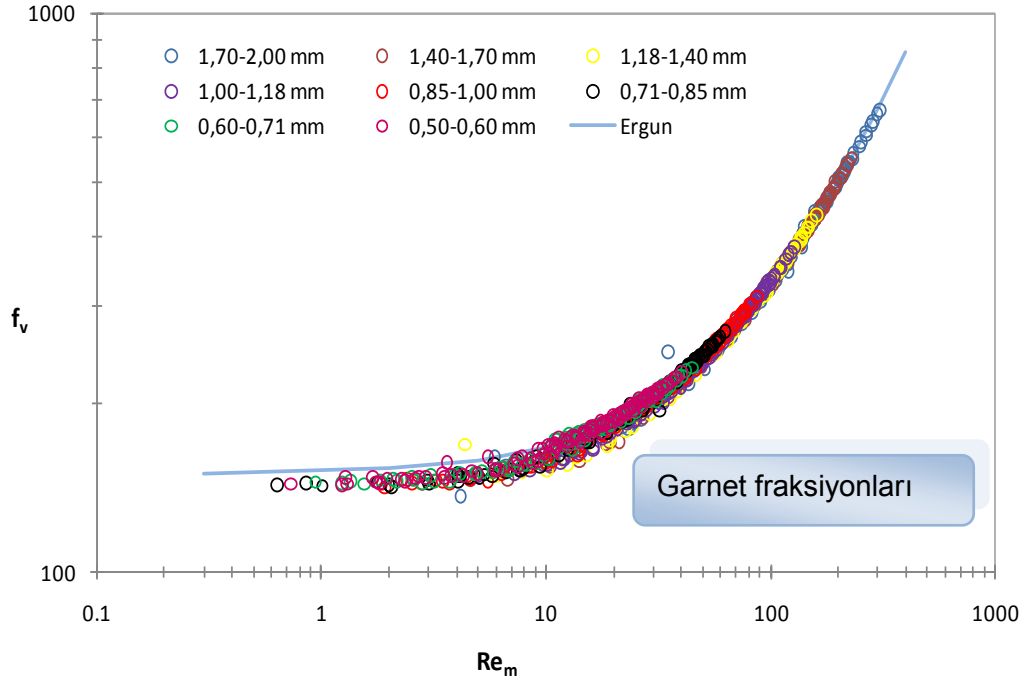
Kum, perlit ve garnet fraksiyonları için $1 < Re_m < 400$ aralığında Ergun denkleminin data ile oldukça uyumlu neticeler verdiği görülmektedir. Kırık cam malzeme için ise her 3 fraksiyonda da $1 < Re_m < 50$ aralığında Ergun denkleminin daha yüksek yük kaybı tahminleri verdiği görülmüştür.



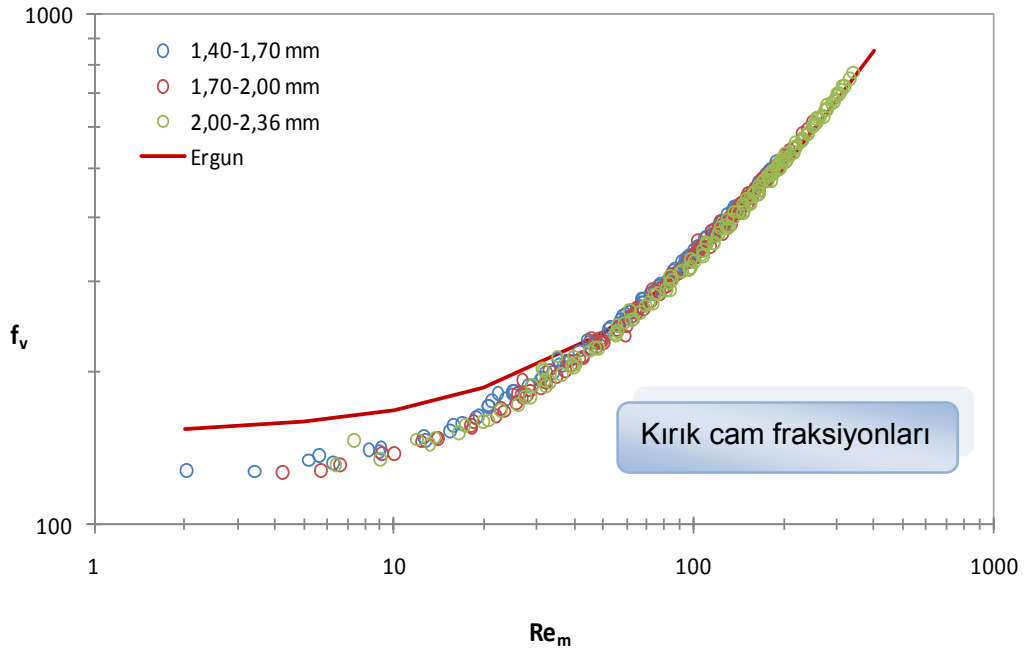
Şekil 5.17 : 6 farklı kum fraksiyonu için deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması ($\epsilon: 0,38-0,47$).



Şekil 5.18 : 5 farklı perlit fraksiyonu için deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması ($\epsilon: 0,42-0,51$).



Şekil 5.19 : 8 farklı garnet fraksiyonu için deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması (ϵ : 0,45-0,50).



Şekil 5.20 : 3 farklı kırık cam fraksiyonu için deneysel verilerin Ergun denklemi ile karşılaştırılması (ϵ : 0,45-0,53).

Her malzeme grubu ve fraksiyon için ayrı ayrı belirlenmiş olan küresellik katsayısı değerleri Çizelge 5.10'da gösterilmiştir. Pratik uygulamalar açısından karışık tane boyutundaki malzemelerden oluşan yataklar söz konusu olduğunda fraksiyonlar için belirlenmiş olan değerlerin ortalaması kullanılabilir.

Ergun denkleminde yer alan katsayılar (k_1' ve k_2') deneysel çalışma verileri kullanılarak tüm fraksiyonlar için en küçük kareler yöntemiyle hesaplanmış ve Çizelge 5.11'de verilmiştir. Bu katsayılar bulunurken malzeme çapı olarak sayma-tartma yöntemi ile hesaplanan eşdeğer deneysel çap kullanılmıştır.

Trussell ve Chang (1999) antrasit ve kum için Çizelge 5.12' deki değerlerin kullanılmasını teklif etmişlerdir. Ancak a ve b değerleri için kesin değerler belirtmemiş, özellikle b katsayısı için oldukça geniş aralıklar önermişlerdir. Yük kaybının tahminine yönelik ön çalışmaların yapılmasının mümkün olmadığı durumlarda ise aralıktaki değerlerin ortalamasının kullanılabileceği belirtilmiştir.

Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12'de kum için belirtilen veriler karşılaştırıldığında deneysel olarak bulunan sonuçların Trussell ve Chang (1999) tarafından önerilen aralıklar ile uyum sağlamadığı görülmüştür.

Çizelge 5.10 : Farklı filtre malzemeleri ve fraksiyonlar için küresellik katsayısı.

Malzeme	Fraksiyon	Küresellik katsayısı, ψ
Kum	1,40-1,70 mm	0,72
Kum	1,18-1,40 mm	0,76
Kum	1,00-1,18 mm	0,69
Kum	0,85-1,00 mm	0,70
Kum	0,71-0,85 mm	0,69
Kum	0,60-0,71 mm	0,67
Perlit	2,00-2,36 mm	0,59
Perlit	1,70-2,00 mm	0,65
Perlit	1,40-1,70 mm	0,63
Perlit	1,18-1,40 mm	0,65
Perlit	1,00-1,18 mm	0,70
Garnet	1,70-2,00 mm	0,65
Garnet	1,40-1,70 mm	0,60
Garnet	1,18-1,40 mm	0,62
Garnet	1,00-1,18 mm	0,63
Garnet	0,85-1,00 mm	0,65
Garnet	0,71-0,85 mm	0,65
Garnet	0,60-0,71 mm	0,69
Garnet	0,50-0,60 mm	0,64
Kırık cam	2,00-2,36 mm	0,52
Kırık cam	1,70-2,00 mm	0,52
Kırık cam	1,40-1,70 mm	0,54

Çizelge 5.11 : Kum, perlit, garnet ve kırık cam fraksiyonları için hesaplanan k_1' ve k_2' katsayıları.

Malzeme	Fraksiyon	Katsayılar		ϵ
		k_1'	k_2'	
Kum	1,40-1,70 mm	141	1,99	0,38-0,41
Kum	1,18-1,40 mm	144	1,93	0,38-0,42
Kum	1,00-1,18 mm	139	2,15	0,41-0,45
Kum	0,85-1,00 mm	138	2,20	0,40-0,46
Kum	0,71-0,85 mm	146	1,91	0,42-0,47
Kum	0,60-0,71 mm	153	1,68	0,42-0,47
Perlit	2,00-2,36 mm	148	1,78	0,46-0,51
Perlit	1,70-2,00 mm	148	1,78	0,43-0,48
Perlit	1,40-1,70 mm	142	1,86	0,43-0,48
Perlit	1,18-1,40 mm	139	1,95	0,42-0,47
Perlit	1,00-1,18 mm	143	1,91	0,42-0,46
Garnet	1,70-2,00 mm	150	1,76	0,45-0,49
Garnet	1,40-1,70 mm	145	1,81	0,46-0,50
Garnet	1,18-1,40 mm	142	1,87	0,45-0,49
Garnet	1,00-1,18 mm	140	1,95	0,46-0,50
Garnet	0,85-1,00 mm	141	2,04	0,45-0,49
Garnet	0,71-0,85 mm	141	2,12	0,46-0,50
Garnet	0,60-0,71 mm	142	2,18	0,45-0,48
Garnet	0,50-0,60 mm	142	2,26	0,46-0,50
Kırık cam	2,00-2,36 mm	126	2,11	0,45-0,51
Kırık cam	1,70-2,00 mm	127	2,02	0,48-0,52
Kırık cam	1,40-1,70 mm	132	1,92	0,49-0,53

Çizelge 5.12 : Farklı filtre malzemeleri için önerilen a ve b katsayıları (Trussell ve Chang, 1999).

Malzeme	Katsayı		ϵ	Kaynak
	a	b		
Kırılmış antrasit	210-245	3,5-5,3	0,47-0,52	Chang ve diğ. (1999), Trussell ve Chang (1999)
Kırılmış kum	110-115	2,0-2,5	0,40-0,43	Chang ve diğ. (1999)
Cam boncuk	130-150	1,3-1,8	0,38-0,40	Rumpf ve Gupte (1971)

Gözlenen bu uyumsuzlukları daha detaylı bir şekilde irdelemek üzere önerilen yeni deklemler ile Ergun denklemi karşılaştırılarak incelenmiştir. Trussell ve Chang (1999) tarafından gözenekli ortamda akışı en iyi temsil ettiği öne sürülen Denklem (5.13) aslında Ergun (1952a) tarafından ortaya konan denklem ile aynı formdadır.

$$\frac{\Delta h}{L} = a \left[\frac{\mu}{\rho g} \right] \left[\frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \right] \left[\frac{1}{d} \right]^2 V + b \left[\frac{1}{g} \right] \left[\frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \right] \left[\frac{1}{d} \right] V^2 \quad (5.13)$$

Bu denklemin Ergun denkleminde tek farkı d ile gösterilen çapın ($\psi^* d_{e\psi}$) şeklinde hesaplanan çap değil, ölçülebilen çap olarak tanımlanmasıdır. Ancak söz konusu çalışmada ölçülebilen çap ile ne kast edildiği açıkça ifade edilmemiştir.

Karışık boyutta taneler içeren numuneler için ölçülebilen çapın efektif çap (d_{10}) olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi ayrı fraksiyonlar şeklinde hazırlanmış numuneler için efektif çapın belirlenmesi söz konusu değildir. Ancak bunun yerine malzemenin elekten geçtiği çap ($d_{geçen}$), elek üzerinde tutulduğu çap ($d_{tutulan}$), malzemenin geçtiği ve üzerinde kaldığı elek çaplarının aritmetik ortalaması ($d_{ort-arit.}$) ile geometrik ortalaması ($d_{ort-geo.}$) kullanılabileceği düşünülmüştür. Her malzeme grubuna ait fraksiyonlar için tanımlanan bu çap değerleri Çizelge 5.13'de gösterilmiştir.

Bu farklı çap tanımları kullanılarak k_1' ve k_2' katsayıları her fraksiyon için ağırlıklı ortalama değerler alınarak hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5.14'de verilmiştir.

Çizelge 5.13 : Kum, perlit, garnet ve kırık cam fraksiyonlarına ait farklı çap gösterimleri.

	$d_{tutulan}$, mm	$d_{geçen}$, mm	$d_{ort-arit.}$, mm	$d_{ort-geo.}$, mm
Kum	1,40	1,70	1,55	1,54
Kum	1,18	1,40	1,29	1,29
Kum	1,00	1,18	1,09	1,09
Kum	0,85	1,00	0,93	0,92
Kum	0,71	0,85	0,78	0,78
Kum	0,60	0,71	0,66	0,65
Perlit	2,00	2,36	2,18	2,17
Perlit	1,70	2,00	1,85	1,84
Perlit	1,40	1,70	1,55	1,54
Perlit	1,18	1,40	1,29	1,29
Perlit	1,00	1,18	1,09	1,09
Garnet	1,70	2,00	1,85	1,84
Garnet	1,40	1,70	1,55	1,54
Garnet	1,18	1,40	1,29	1,29
Garnet	1,00	1,18	1,09	1,09
Garnet	0,85	1,00	0,93	0,92
Garnet	0,71	0,85	0,78	0,78
Garnet	0,60	0,71	0,66	0,65
Garnet	0,50	0,60	0,55	0,55
Kırık cam	2,00	2,36	2,18	2,17
Kırık cam	1,70	2,00	1,85	1,84
Kırık cam	1,40	1,70	1,55	1,54

Çizelge 5.14'deki değerler incelendiğinde kum için hesaplanan k_1' katsayısının hangi çap tanımı kullanılırsa kullanılsın Trussell ve Chang tarafından önerilen aralığın (110-115) çok üstünde olduğu görülmüştür. Benzer şekilde k_2' katsayısı için önerilen aralık da (2,0-2,5) deneysel olarak hesaplanan değerler ile uyum göstermemiştir.

Çizelge 5.14 : Filtre malzemeleri için farklı çap tanımları ile bulunan k_1' ve k_2' katsayıları.

Malzeme	Fraksiyon	k_1'				k_2'			
		$d_{tutulan}$	$d_{geçen}$	$d_{ort-arit}$	$d_{ort-geo}$	$d_{tutulan}$	$d_{geçen}$	$d_{ort-arit}$	$d_{ort-geo}$
Kum	1,40-1,70 mm	202	297	247	245	2,38	2,89	2,64	2,63
Kum	1,18-1,40 mm	181	255	217	215	2,17	2,57	2,37	2,36
Kum	1,00-1,18 mm	234	326	279	277	2,80	3,31	3,06	3,05
Kum	0,85-1,00 mm	227	314	269	267	2,82	3,32	3,07	3,06
Kum	0,71-0,85 mm	220	315	265	263	2,34	2,80	2,57	2,56
Kum	0,60-0,71 mm	246	345	294	292	2,12	2,51	2,32	2,31
Perlit	2,00-2,36 mm	326	454	387	385	2,65	3,12	2,88	2,87
Perlit	1,70-2,00 mm	261	362	309	307	2,37	2,79	2,58	2,57
Perlit	1,40-1,70 mm	241	356	296	293	2,43	2,95	2,69	2,68
Perlit	1,18-1,40 mm	229	322	273	271	2,51	2,98	2,74	2,73
Perlit	1,00-1,18 mm	218	304	259	258	2,36	2,79	2,58	2,57
Garnet	1,70-2,00 mm	306	423	362	360	2,51	2,95	2,73	2,72
Garnet	1,40-1,70 mm	283	417	347	344	2,53	3,07	2,80	2,79
Garnet	1,18-1,40 mm	272	383	326	323	2,59	3,07	2,83	2,82
Garnet	1,00-1,18 mm	258	359	306	304	2,64	3,12	2,88	2,87
Garnet	0,85-1,00 mm	253	350	300	298	2,74	3,22	2,98	2,97
Garnet	0,71-0,85 mm	255	365	307	305	2,85	3,41	3,13	3,12
Garnet	0,60-0,71 mm	243	340	290	288	2,85	3,38	3,12	3,10
Garnet	0,50-0,60 mm	232	334	281	278	2,88	3,46	3,17	3,16
Kırık cam	2,00-2,36 mm	367	541	450	446	3,60	3,84	3,54	3,53
Kırık cam	1,70-2,00 mm	387	536	458	455	3,54	4,16	3,85	3,83
Kırık cam	1,40-1,70 mm	377	525	448	445	3,25	4,38	3,99	3,97

Bahsedilen çalışmada yaygın olarak kullanılan diğer filtrasyon malzemeleri için de a ve b katsayılarının deneysel olarak belirlenmesi önerilmiştir. Garnet, perlit ve kırık cam için fraksiyon bazında yürütülen deneylerde elde edilen k_1' ve k_2' katsayılarının (Çizelge 5.14), Trussell ve Chang (1999) tarafından önerilen denklemde farklı çap tanımları kullanarak bulunan değerlerden oldukça düşük olduğu görülmüştür. Hendricks (2005), Trussell ve Chang denkleminin d_{10} çapı ile kullanılması halinde kum ve küreler için geçerli bir yaklaşım olduğunu ancak antrasit söz konusu olduğunda denklem ile hesaplanan katsayıların deneysel olarak elde edilen değerlerden çok daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Önerilen bu yeni denklemde malzemeyi tanımlamak için kullanılan “ölçülebilen çap” ifadesinin net olmadığı düşünülmektedir. Bu belirsizliği gidermek üzere elek çapının farklı gösterim şekillerine dayanan çap tanımları ile elde edilen katsayıların Ergun denklemi ile bulunan katsayılara kıyasla çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu katsayılar ile yapılacak yük kaybı tahminlerinin doğru neticeler vermeyeceği düşünülmektedir.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Küresel ve küresel olmayan (düzgün şekilli, doğal) malzemelerden oluşan sabit yataklarda yük kaybı oluşumunun deneysel olarak incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Küresel malzemeler için Ergun denkleminin duvar etkisinin ihmal edilebilir olduğu düşünülen $D/d \geq 10$ değerlerinde % 3-% 12,1 arasında değişen rölatif hata ile tahmin yapabildiği görülmüştür. Dolayısıyla denklemin Ergun tarafından teklif edilen $k_1:150$ ve $k_2: 1,75$ katsayıları ile küresel malzemeler için kabul edilebilir doğrulukla kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Küreselliği bilinmeyen malzemeler için Ergun denklemi ile yük kaybı tahmini iki şekilde yapılabilmektedir: a) Benzer şekil ve boyutlardaki malzemeler için mevcutsa geçmişte yapılan çalışmalardan faydalanmak ve küresellik katsayısı bilgisini edinmek, b) Laboratuvar ölçekli sabit yatak deneyleri yürüterek yük kaybı ölçümlerinden küresellik katsayısını belirlemek. Ancak laboratuvar ölçekli deneylerin yürütülmesi ve doğrulukla gerçekleştirilmesi tecrübe gerektiren zahmetli bir işlem olması nedeniyle bu yöntem çok tercih edilmemektedir. Düzgün şekilli malzemeler söz konusu olduğunda ise küresellik ve çap değerini teorik olarak belirlemek, bu sayede de yük kaybı tahmini yapmak kolaylıkla mümkün olmaktadır. Ergun denkleminin küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler için geçerliliğinin araştırılması maksadıyla 5 farklı şekilde (üçgen prizma, halka, silindir, küp, dikdörtgenler prizması) ve çeşitli ebatlarda toplam 11 tür düzgün geometrik malzeme ile sabit yatak deneyleri yürütülmüştür. Malzeme şekil ve boyutları belirlenirken üretim imkanları dahilinde mümkün olduğu kadar geniş bir aralıkta teorik küresellik değeri elde edilmeye çalışılmıştır ($\psi_{\text{teorik}}: 0,43-0,87$).
- Teorik küresellik ve teorik çap değeri bilinen düzgün şekilli malzemelerden oluşan sabit yataklar için Ergun denkleminin yük kayıplarını % 11 - 55 aralığında değişen hatalar ile tahmin edebildiği neticesine ulaşılmıştır. Ergun denkleminin küresel olmayan malzemeler için mevcut k_1 ve k_2 katsayıları ile kullanılması durumunda oldukça düşük doğruluk yüzdesi ile yük kaybı tahmini yapabileceği ortaya konmuştur.

- Teorik küresellik katsayısı ve Ergun denklemi ile bulunan deneysel küresellik katsayısı arasındaki ilişkiyi tahmin etmek üzere değerlendirmeler yapılmış ve teorik küresellik değeri bilinen bir malzeme için

$$\psi_{deneysel} = 0,96(\psi_{teorik}) - 0,16 \quad R^2: 0,8824$$

denklemleri yardımıyla düzeltilmiş bir deneysel küresellik değerinin hesaplanabileceği, dolayısıyla Ergun denklemi ile hata yüzdesi daha düşük yük kaybı tahmini yapılabileceği ortaya konmuştur. Teorik küresellik değeri 0,71 olan üçgen prizma şeklindeki malzeme için Ergun denkleminin oldukça düşük bir hata (%11,3) ile tahmin vermesi nedeniyle bu denklem üçgen prizma şeklindeki malzemeleri hariç bırakacak şekilde yeniden düzenlenmiş ve korelasyon katsayısı daha yüksek olan yeni bir denklem elde edilmiştir:

$$\psi_{deneysel} = 0,96(\psi_{teorik}) - 0,17 \quad R^2: 0,9621$$

Bu yeni denklem küp, halka, silindir, dikdörtgen prizma gibi farklı şekil gruplarının tamamı için kullanılabilir pratik bir yaklaşım olarak kabul edilebilir.

- Şekil olarak birbirinden farklı bu malzeme grupları için Ergun denkleminin teorik küresellik ve çap değeri ile kullanıldığında yük kaybını kabul edilebilir doğrulukla tahmin edemediği görülmüştür. Denklem küresel olmayan malzemeler için de kullanılabilmesi için modifiye edilmesi gerektiği, bu işlem için en uygun parametrenin k_1 ve k_2 katsayıları olduğu, pratik açıdan uygulanabilir olması da göz önüne alındığında katsayılar için öngörülen bu değişikliğin küresellik katsayısı ile ilişkilendirilerek yapılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.
- Farklı kaynaklardan elde edilmiş ve çok iyi elenerek hazırlanmış 6 fraksiyon kum, 5 fraksiyon perlit, 8 fraksiyon garnet ve 3 fraksiyon kırık cam ile yürütülen deneylerde Ergun'un teklif ettiği k_1 ve k_2 değerlerini kullanarak yük kaybı verilerinin ne kadar iyi temsil edilebildiği araştırılmıştır.
- Kum, perlit ve garnet fraksiyonları için $1 < Re_m < 400$ aralığında Ergun denkleminin data ile oldukça uyumlu neticeler verdiği görülmüştür. Kırık cam fraksiyonları için ise $1 < Re_m < 50$ aralığında Ergun denkleminin daha yüksek yük kaybı tahminleri yaptığı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Afandizadeh, S. and Foumeny, E.A.**, 2001. Design of packed bed reactors: guides to catalyst shape, size and loading selection, *Applied Thermal Engineering*, **21**, 669-682.
- Akgiray, Ö. and Saatçi, A.**, 2001. A new look at filter backwash hydraulics, *Water Science and Technology: Water Supply*, **1**, 65-72.
- Akgiray, Ö., Soyer, E. and Yüksel, E.**, 2004. Prediction of filter expansion during backwashing, *Water Science and Technology: Water Supply*, **4**, 131-138.
- Akgiray, Ö. and Soyer, E.**, 2006. An evaluation of expansion equations for fluidized solid-liquid systems, *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, **55**, 7-8, 517-526.
- Akkoyunlu, A.**, 2003. Expansion of granular water filters during backwash, *Environmental Engineering Science*, **20**, 655-665.
- Andersson, K. E. B.**, 1963. Pressure drop in packed beds, *Transactions of the Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden*, No. 201.
- 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 C136-06**, 2004. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM, PA, USA.
- Bai, H., Theuerkauf, J., Gillis, P.A. and Witt, P.**, 2009. A coupled DEM and CFD simulation of flow field and pressure drop in fixed bed reactor with randomly packed catalyst particles, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 8, 4060-4074.
- Benyahia, F.**, 1996. On the global and local structural properties of packed beds of nonequilateral cylindrical particles, *Particulate Science and Technology*, **14**, 221-237.
- Blake, F.C.**, 1922. The resistance of packing to fluid flow, *Trans. Amer. Inst. Chem. Eng.*, **14**, 415-421.
- Bradshaw, R.D. and Myers, J.E.**, 1963. Heat and mass transfer in fixed and fluidized beds of large particles, *AIChE. J.*, **9**, 590-598.
- Brown, G.G.**, 1966. *Unit operations*, New York, John Wiley.
- Brownell, L.E. and Katz, D.L.**, 1947. Flow of fluids through porous media I. Single homogeneous fluids, *Chem. Eng. Prog.*, **43**, 537-548.
- Burke, S.P. and Plummer, W.B.**, 1928. Gas flow through packed columns, *Ind. Eng. Chem.*, **20**, 1196-1200.
- Carman, P.C.**, 1937. Fluid flow through granular beds, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **15**, 150-166.

- Caulkin, R., Ahmad, A., Fairweather, M., Jia, X., and Williams, R.A.**, 2009. Digital predictions of complex cylinder packed columns, *Computers and Chemical Engineering*, **33**, 10-21.
- Chang, M., Trussell, R.R., Guzman, V., Martinez, J. and Delaney, C.K.**, 1999. Laboratory studies on the clean bed headloss of filter media, *J. Water SRT-AQUA*, **48**, 137-145.
- Choi, Y.S. and Kim, J.S.**, 2008. A Semi-empirical correlation for pressure drop in packed beds of spherical particles, *Transp. Porous Med.*, **75**, 2, 133-149.
- Cleasby, J.L. and Fan, K.S.**, 1981. Predicting fluidization and expansion of filter media, *J. Environ. Engng. Div. ASCE.*, **107**, 455-471.
- Clift, R., Grace, J.R. and Weber, M.E.**, 1978. *Bubbles, Drops, and Particles*, New York: Academic Press. p.114
- Cohen, Y. and Metzner, A.B.**, 1981. Wall effects in laminar flow of fluids through packed beds, *AIChE J.*, **27**, 705-715.
- Coulson, J.M.**, 1949. The flow of fluids through granular beds: effect of particle shape and voids in streamline flow, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **27**, 237-257.
- Cumberland, D. J. and Crawford, R. J.** 1987. *The packing of particles*, Elsevier, Amsterdam.
- Darcy, H.P.G.**, 1856. Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Victor Dalmont, Paris
- Di Felice, R. and Gibilaro, L.G.**, 2004. Wall effects for the pressure drop in fixed beds, *Chemical Engineering Science*, **59**, 3037 – 3040.
- Dixon, A.G.**, 1988. Correlations for wall and particle shape effects on fixed bed bulk voidage, *Can. J. Chem. Eng.*, **66**, 705-708.
- Dullien, F.A.L.**, 1992. *Porous media: Fluid transport and pore structure-2nd edition*, Academic Press.
- Du Plessis, J.P.**, 1994. Analytical quantification of coefficients in the Ergun equation for fluid friction in a packed bed, *Transport in Porous Media*, **16**, 189-207.
- Eisfeld, B. and Schnitzlein, K.**, 2001. The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds, *Chemical Engineering Science*, **56**, 4321-4329.
- Elliot, R.W.**, 2001. Evaluation of the use of crushed recycled glass as a filter medium: Part 1, *Water Eng. and Management*, **148**, 13-18.
- Endo, Y., Chen, D-R, Pui, D.Y.H.**, 2002. Theoretical consideration of permeation resistance of fluid through a particle packed layer, *Powder Technology*, **124**, 119-126.
- Ergun, S., and Orning, A.A.**, 1949. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds, *Industrial and Engineering Chemistry*, **41**, 6, 1179-1184.
- Ergun, S.**, 1951. Determination of particle density of crushed porous solids, *Analytical Chemistry*, **23**, 1, 151-156.
- Ergun, S.**, 1952a. Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, **48**, 2, 89-94.

- Ergun, S.**, 1952b. Determination of geometric surface area of crushed porous solids, *Analytical Chemistry*, **24**, 2, 388-393.
- Evans, G., Dennis, P. Cousins, M. and 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**, 9-16.
- Fair, G., Geyer, J., and Okun, D.**, 1968. *Water and wastewater engineering, Vol. 2, Water purification and wastewater treatment and disposal*, Wiley, New York.
- Forchheimer, P.**, 1901. Wasserbewegung durch Boden, *Forschrlft ver. D. Ing.*, **45**, 1782–1788 (in German).
- Foumeny, E. A., Benyahia, F., Castro, J. A. A., Moallemi, H. A., and Roshani, S.**, 1993. Correlations of pressure drop in packed beds taking into account the effect of confining wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **36**, 536-540.
- Foumeny, E.A., Kulkarni, A., Roshani, S. and Vatani, A.**, 1996. Elucidation of pressure drop in packed-bed systems, *Applied Thermal Engineering*, **16**, 195-202.
- Galloway, T.R. and Sage, B.H.**, 1970. A model of the mechanism of transport in packed, distended and fluidized beds, *Chem. Eng. Sci.*, **25**, 495-516.
- Gauvin, W.H. and Katta, S.**, 1973. Momentum transfer through packed beds of various particles in the turbulent flow regime, *AIChE J.*, **19**, 775-783.
- Geldart, D.**, 1986. *Gas Fluidization Technology*, Chichester: Wiley.
- Geldart, D.**, 1990. Estimation of basic particle properties for use in fluid-particle process calculations, *Powder Technology*, **60**, 1-13.
- German, R.M.**, 1989. *Particle packing characteristics*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ
- Gibilaro, L.G., Di Felice, R., Waldram, P.**, 1985. Generalized friction factor and drag coefficient correlations for fluid-particle interactions, *Chemical Engineering Science*, **40**, 10, 1817-1823.
- Handley, D. and Heggs, P.J.**, 1968. Momentum and heat transfer mechanisms in regular shaped packings, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **46**, T251-T264.
- Happel, J.**, 1958. Viscous flow in multiparticle systems: slow motion of fluids relative to beds of spherical particles, *AIChE J.*, **4**, 197-201.
- Haughey, D.P. and Beveridge, G.G.**, 1969. Structural properties of packed beds-a review, *Can. J. Chem. Eng.*, **47**, 130-140.
- Hazen, A.**, 1893. Some physical properties of sand and gravels with special reference to their use in filtration, Massachusetts State Board of Health, Twenty-fourth Annual Report, p.541.
- Hellström J. G. I. and Lundström, T. S.**, 2006. Flow through porous media at moderate Reynolds number, *International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing*, Riga, June 8-9.
- Hendricks, D.**, 2005. *Water Treatment Unit Processes*, Taylor and Francis, New York.
- Hicks, R.E.**, 1970. Pressure drop in packed beds of spheres, *Ind. Eng. Chem. Fund.*, **9**, 3, 500–502.

- Hill, R.J., Koch, D.L., Ladd, A.J.C.**, 2001. The first effects of fluid inertia on flows in ordered and random arrays of spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, **448**, 213-241.
- Hubbert, M.**, 1956. Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids, *AIME Petr. Trans.*, **207**, 222–239.
- Irmay, S.**, 1958. On the theoretical derivation of Darcy and Forchheimer formulas, *Trans. Am. Geophys. Union*, **39**, 4, 702–707.
- Jiang, Y., Khadilkar, M.R., Al-Dahhan, M.H. and Duduković, M.P.**, 2000. Single phase flow modeling in packed beds: discrete cell approach revisited, *Chemical Engineering Science*, **55**, 1829-1844
- Kürten, H., Raasch, J. and Rumpf, H.**, 1966. Beschleunigung eines kugelförmigen Feststoffteilchens im Strömungsfall konstanter Geschwindigkeit, *Chem. Ing. Tech.*, **38**, 12, 941-948.
- Lakota, A., Levec, J., Carbonell, R.G.**, 2002. Hydrodynamics of trickling flow in packed beds: relative permeability concept, *AIChE Journal*, **48**, 731-738.
- Lee, J., and Ogawa, K.**, 1974. Pressure drop through packed bed, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **27**, 5, 691–693.
- Leva M. and Grummer, M.**, 1947. Pressure drop through packed tubes, Part III, prediction of voids in packed tubes, *Chemical Engineering Progress*, **43**, 713-718.
- Leva M. and Grummer, M., Weintraus, M. and Pollchik, M.**, 1948. Introduction to fluidization, *Chem. Eng. Progr.*, **44**, 511.
- Leva, M.**, 1959. *Fluidization*, New York: McGraw-Hill
- Liu, G. and Thompson, K.E.**, 2000. Influence of computational domain boundaries on internal structure in low-porosity sphere packings, *Powder Technology*, **113**, 185-196.
- Lywood, W.J.**, 1996. *Process design, rating and performance, in Catalyst Handbook, 2nd edition*, M. V. Twigg - editor, Manson Publishing London, 85-139.
- Kozeny, J.**, 1927. About capillaries conducting water in the earth. *Committee Report of the Viennese Academy*, **136**, 271-306.
- MacDonald, I.F., El-Sayed, M.S., Mow, K. and Dullien, F.A.L.**, 1979. Flow through porous media - the Ergun equation revisited, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **18**, 199-208.
- Maćkowiak, J.**, 2009. Extended channel model for prediction of the pressure drop in single-phase flow in packed columns, *Chemical Engineering Research and Design*, **87**, 123-134.
- McGreavy, C., Foumeny, E. A. and Javed, K. H.**, 1986. Characterisation of transport properties for fixed beds in terms of local bed structure and flow distribution, *Chemical Engineering Science*, **41**, 787–797.
- Mehta, D. and Hawley, M.C.**, 1969. Wall effects in packed columns, *Ind. Eng. Chem. Proc. Design Dev.*, **8**, 280-282.
- Montillet, A.**, 2004. Flow through a finite packed bed of spheres: A note on the limit of applicability of the Forchheimer- type equation, *Journal of Fluids Engineering*, **126**, 139-143.

- Montillet, A., Akkari, E., Comiti, J.**, 2007. About a correlating equation for predicting pressure drops through packed beds of spheres in a large range of Reynolds numbers, *Chemical Engineering and Processing*, **46**, 329–333.
- Molerus, O.**, 1993. *Principles of flow in disperse systems*, London: Chapman and Hall.
- Nemec, D.**, 2003. Pressure drop and liquid holdup in packed beds with cocurrent two-phase flow at high pressures, *Ph.D. Thesis, University of Ljubljana*.
- Nemec, D. and Levec, J.**, 2005. Flow through packed bed reactors: 1. Single-phase flow, *Chemical Engineering Science*, **60**, 6947-6957.
- Nield, D. A.**, 1983. Alternative model for wall effect in laminar flow of a fluid through a packed column, *A.I.Ch.E. Journal*, **29**, 688-689.
- Nutting, P.**, 1930. Physical analysis of oil sands, *Bull. Am. Assn. Petr. Geol.*, **14**, 1337.
- Oakeshott, R.B.S. and Edwards, S.F.**, 1994. Perturbative theory of the packing of mixtures and of non-spherical particles, *Physica A*, **202**, 482-498.
- Oman, A.O. and Watson, K.M.**, 1944. Pressure drops in granular beds, *National Petroleum News*, **36**, R-795-801.
- Özahi, E., Gündoğdu, M.Y. and Çarpınlioğlu, M.O.**, 2008. A modification on Ergun's correlation for use in cylindrical packed beds with non-spherical particles, *Advanced Powder Technology*, **19**, 369–381.
- Perry, R.H. and Green, D.W.**, 1997. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 7th Edition, McGraw-Hill.
- Piccirillo, J.B. and 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.
- Ranz, W.E.**, 1952. Friction and transfer coefficients for single particles and packed beds, *Chem. Eng. Prog.*, **48**, 247-253.
- Rase, H.F.**, 1990. *Fixed-Bed Reactor Design and Diagnostics*. Boston: Butterworths
- Reddy, K. R. and Joshi, J.**, 2008. CFD modeling of pressure drop and drag coefficient in fixed and expanded beds, *Chemical Engineering Research and Design*, **86**, 444-453.
- Reichel, W.**, 1972. Zur Berechnung des Druckverlustes einphasig durchströmter Kugel- und Zylinderschüttungen, *Chemie-Ingenieur-Technik*, **44**, 1068-1071.
- Reyes, S.C. and Iglesia, E.**, 1991. Monte Carlo simulation of structural properties of packed beds, *Chemical Engineering Science*, **46**, 1089-1099.
- Roblee, L.H.S., Baird, R.M., and Tierney, J.W.**, 1958. Radial porosity variations in packed beds, *AIChE Journal*, **4**, 460-464.
- Rose, H.E.**, 1945. On the resistance coefficient-Reynolds number relationship for fluid flow through a bed of granular material, *Proc. Instn. Mechanical Engineers*, **153**, 154-161.
- Rose, H.E. and Rizk, M.A.**, 1949. Further researches in fluid flow through beds of granular material, *Proc. Inst. Mech. Eng. London*, **160**, 493-503.

- Rutledge, S.O. and Gagnon, G.A.**, 2002. Assessment of crushed-recycled glass as filter media for small-scale water treatment applications, *J. Env. Eng. Sci.*, **1**, 349-358.
- Scheidegger, A.**, 1960. *The physics of flow through porous media*, Macmillan, New York.
- Scheidegger, A.E.**, 1974. *The physics of flow through porous media*, University of Toronto Press.
- Scott, G.D.**, 1960. Packing of spheres, *Nature*, **188**, 908-911.
- Scott, G.D. and Kilgour, D.M.**, 1969. The density of random close packing of spheres, *Journal of Physics D*, **2**, 863-866.
- Sederman, A.J., Alexander, P. and Gladden, L.F.**, 2001. Structure of packed beds by magnetic resonance imaging, *Powder Technology*, **117**, 255-269.
- Sonntag, G.**, 1960. Einfluß des lückenvolumens auf den druckverlust in gasdurchströmten füllkörpersäulen, *Chemie Ingenieur Technik*, **32**, 317-329.
- Subramanian, P. and Arunachalam, Vr.**, 1980. A simple device for the determination of sphericity factor, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **19**, 436-437.
- Sunada, D.**, 1965. Turbulent flow through porous media, Contribution No. 103, Water Resour. Center, University of California, Berkeley.
- Tallmadge, T.A.**, 1970. Packed bed pressure drop—an extension to higher Reynolds numbers, *AIChE J.*, **16**, 6, 1092–1093.
- Todd, D.**, 1960. Hydrogeology. McGraw-Hill, New York.
- Turan, M.**, 1992. Velocity gradient in filter backwashing, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, **118**, 776-790.
- Trussell, R. and Chang, M.**, 1999. Review of flow through porous media as applied to head loss in water filters, *Journal of Environmental Engineering*, **125**, 11, 998-1006.
- Wadell, H.**, 1933. Sphericity and roundness of rock particles, *J. Geol.*, **41**, 310-331.
- Wadell, H.**, 1934. The coefficient of resistance as a function of Reynolds number for solids of various shapes, *J. Franklin Inst.*, **217**, 459-490.
- Wadell, H.**, 1935. Volume, shape, and roundness of quartz particles, *J. Geol.*, **43**, 250-280.
- Whitaker, S.**, 1996. The Forchheimer equation: a theoretical development, *Transport in Porous Media*, **25**, 27-61.
- Winterberg, M. and Tsotsas, E.**, 2000. Correlations for effective heat transport coefficients in beds packed with cylindrical particles, *Chemical Engineering Science*, **55**, 5937-5943.
- Wu, J. and Yu, B.**, 2007. A fractal resistance model for flow through porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**, 3925–3932.
- Wu, J., Yu, B. and Yun, M.**, 2008. A resistance model for flow through porous media, *Trans. Porous Media*, **71**, 331–343.
- Wu, J.S., Yin, S.X. and Zhao, D.Y.**, 2009. A particle resistance model for flow through porous media, *Chin. Phys. Lett.*, **26**, 6, 064701.

- Yang, W.C.**, 2003. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*, Marcel Dekker, Inc. New York.
- Yu, A.B. and Standish, N.**, 1993. Characterisation of non-spherical particles from their packing behaviour, *Powder Technology*, **74**, 205-213.
- Yu, B.M. and Li, J.H.**, 2004. A geometry model for tortuous of flow path in porous media, *Chin. Phys. Lett.*, **21**, 1569-1571.
- Zhao, F., Landis, H.R. and Skerlos, S. J.**, 2005. Modeling of porous filter permeability via image-based stochastic reconstruction of spatial porosity correlation, *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 239-247.
- Zou, R.P. and Yu, A.B.**, 1996. Evaluation of the packing characteristics of monosized nonspherical particles, *Powder Technology*, **88**, 71-79.

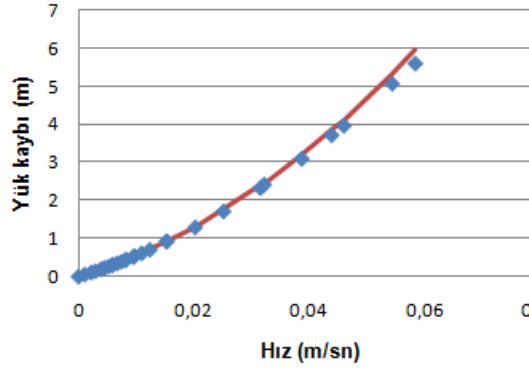
EKLER

EK A: Küresel malzemeler için hız-yk kaybı grafikleri

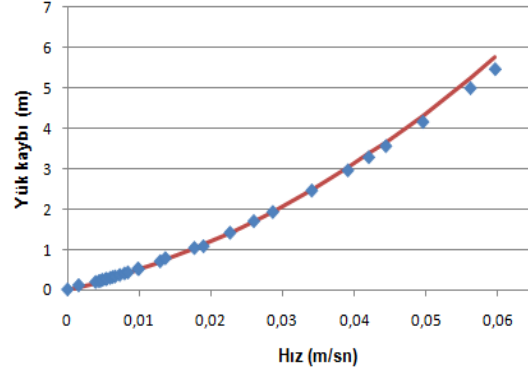
EK B: Düzgün Şekilli olmayan malzemeler için hız-yük kaybı grafikleri

EK C: Küresel olmayan düzgün Şekilli malzemeler için hız-yük kaybı grafikleri

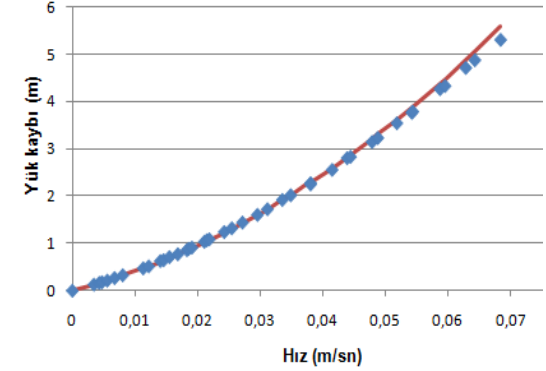
EK A: Küresel malzemeler için hız-yük kaybı grafikleri



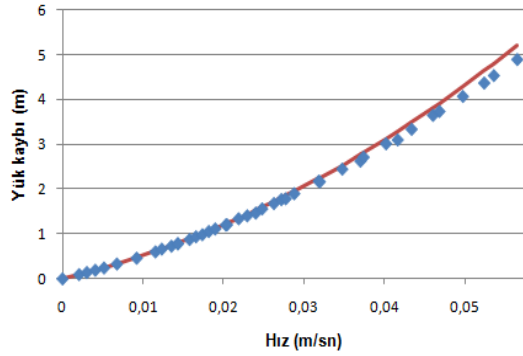
Şekil A.1 : 1 mm küre-1 (ε: 0,37)*
(T,°C: 20,5-20,7)



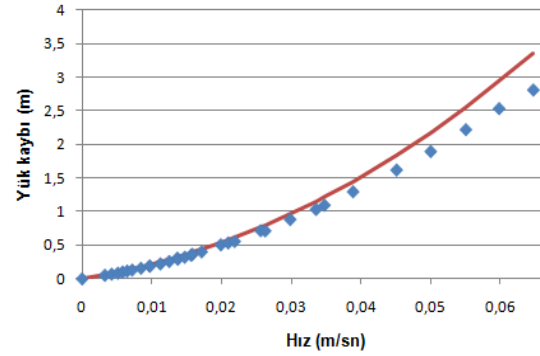
Şekil A.2 : 1 mm küre-2 (ε: 0,38)*
(T,°C: 19,7-20,4)



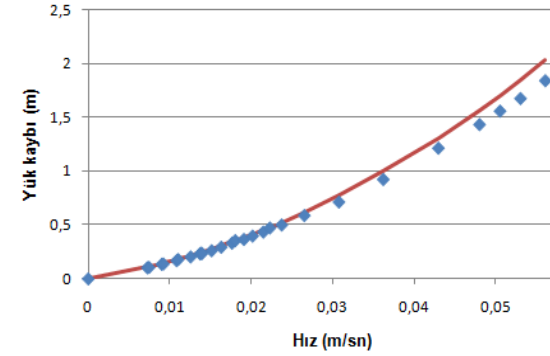
Şekil A.3 : 1 mm küre-3 (ε: 0,40)*
(T,°C: 17,8-18,8)



Şekil A.4 : 1 mm küre-4 (ε: 0,37)*
(T,°C: 18,9-19,6)

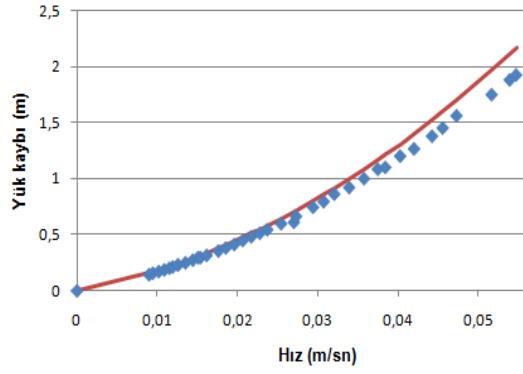


Şekil A.5 : 2 mm küre-1 (ε: 0,37)*
(T,°C: 18,9-19,4)

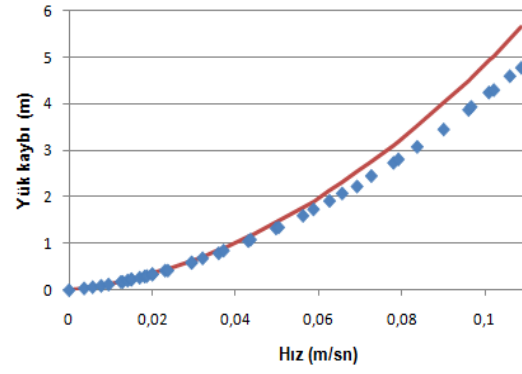


Şekil A.6 : 2 mm küre-2 (ε: 0,40)*
(T,°C: 19,8-20,5)

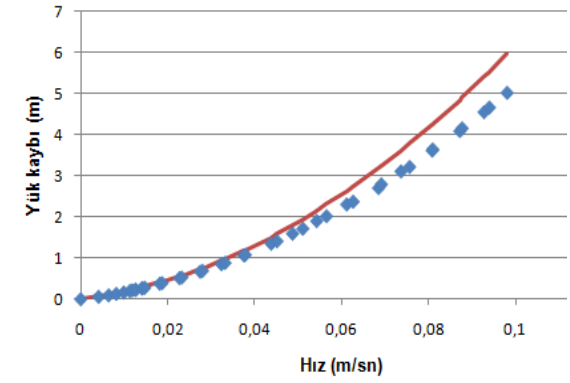
- : Ergun denklemi (1952a)
◆ : Data
* : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



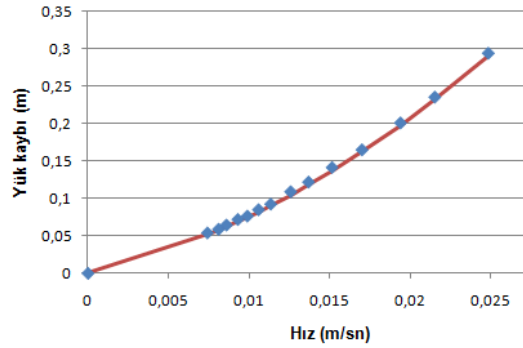
Şekil A.7 : 2 mm küre-3 (ϵ : 0,39)*
(T,°C: 20,7-21,2)



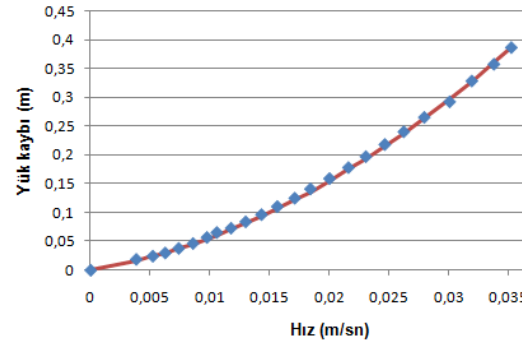
Şekil A.8 : 2 mm küre-4 (ϵ : 0,41)*
(T,°C: 21 -21,9)



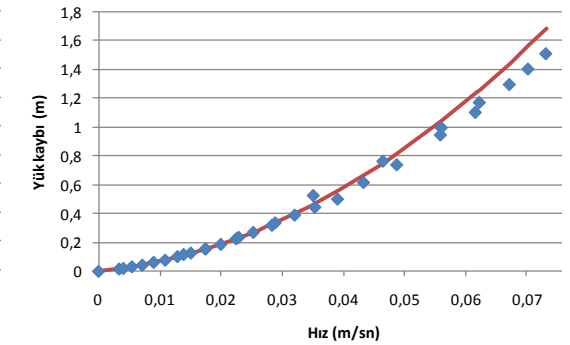
Şekil A.9 : 2 mm küre-5 (ϵ : 0,38)*
(T,°C: 22,1 -22,8)



Şekil A.10 : 3 mm küre-1 (ϵ : 0,38)*
(T,°C: 19,1 -19,4)

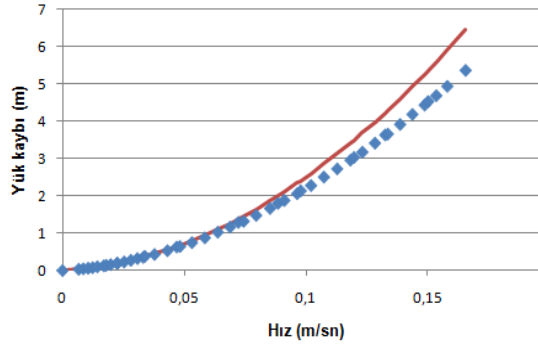


Şekil A.11 : 3 mm küre-2 (ϵ : 0,42)*
(T,°C: 19,7 -20,1)

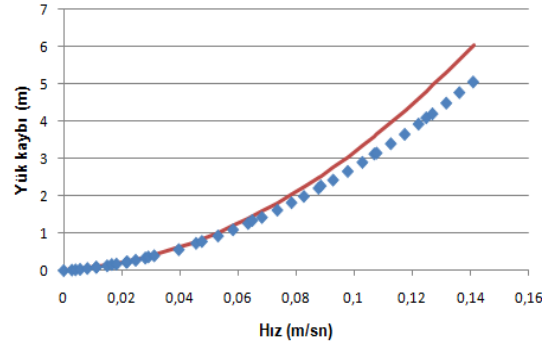


Şekil A.12 : 3 mm küre-3 (ϵ : 0,39)*
(T,°C: 20,1-20,6)

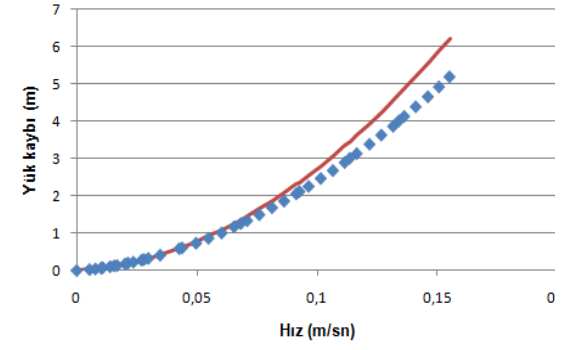
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



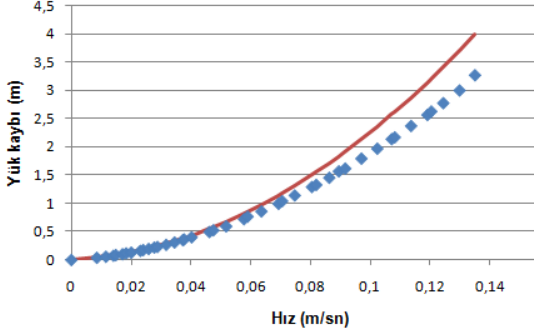
Şekil A.13 : 3 mm küre-4 (ϵ : 0,42)*
(T, °C: 19-20)



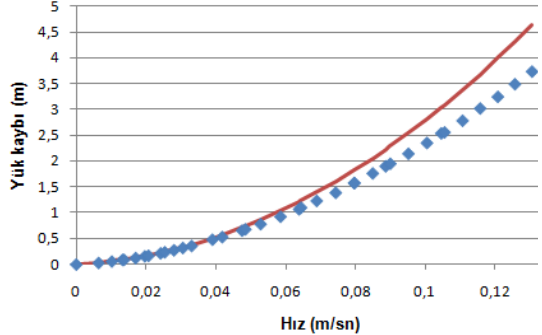
Şekil A.14 : 3 mm küre-5 (ϵ : 0,38)*
(T, °C: 19,7-20,5)



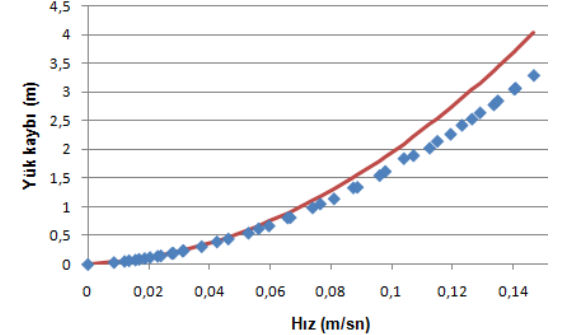
Şekil A.15 : 3 mm küre-6 (ϵ : 0,40)*
(T, °C: 20,5-21)



Şekil A.16 : 4 mm küre-1 (ϵ : 0,41)*
(T, °C: 20,4-20,6)

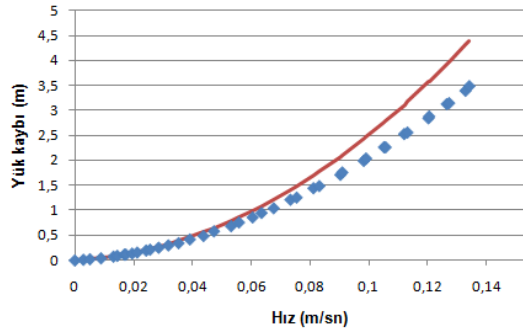


Şekil A.17 : 4 mm küre-2 (ϵ : 0,38)*
(T, °C: 20,5-20,7)

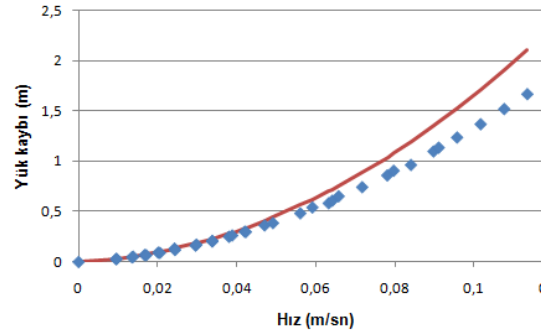


Şekil A.18 : 4 mm küre-3 (ϵ : 0,42)*
(T, °C: 19,7-20,3)

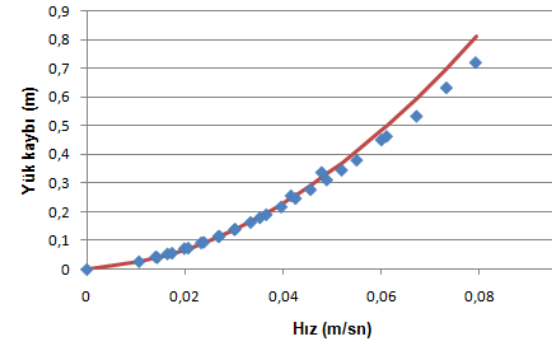
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



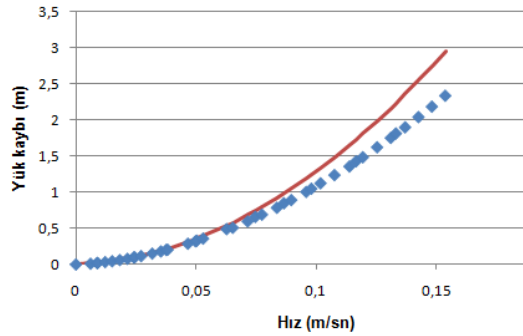
Şekil A.19 : 4 mm küre-4 (ϵ : 0,39)*
(T,°C: 18,1-19,1)



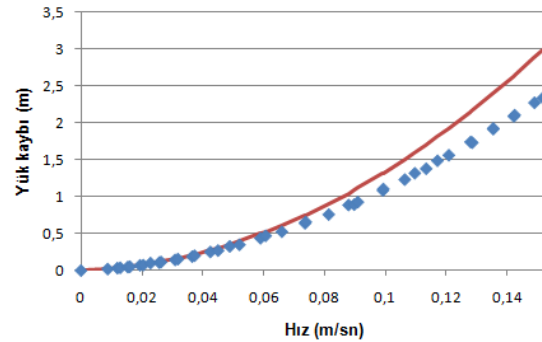
Şekil A.20 : 5 mm küre-1 (ϵ : 0,40)*
(T,°C: 20-20,4)



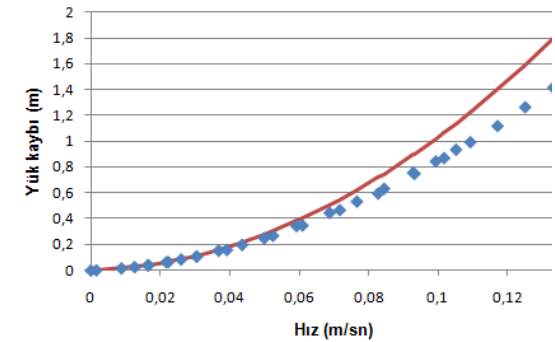
Şekil A.21 : 5 mm küre-2 (ϵ : 0,43)*
(T,°C: 20,8-20,9)



Şekil A.22 : 5 mm küre-3 (ϵ : 0,43)*
(T,°C: 21,3-21,5)

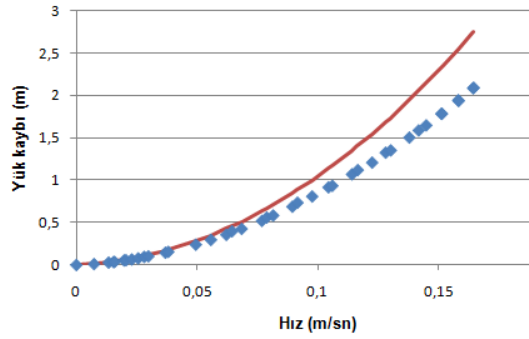


Şekil A.23 : 5 mm küre-4 (ϵ : 0,44)*
(T,°C: 22,6-23,6)

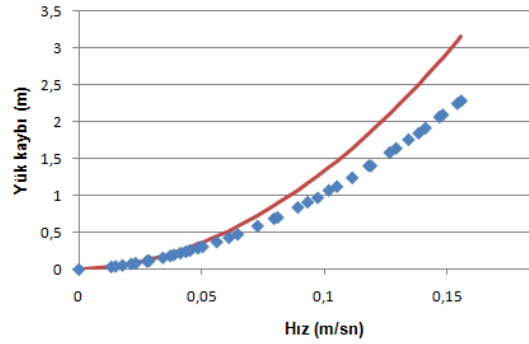


Şekil A.24 : 6 mm küre-1 (ϵ : 0,44)*
(T,°C: 20,5-21,1)

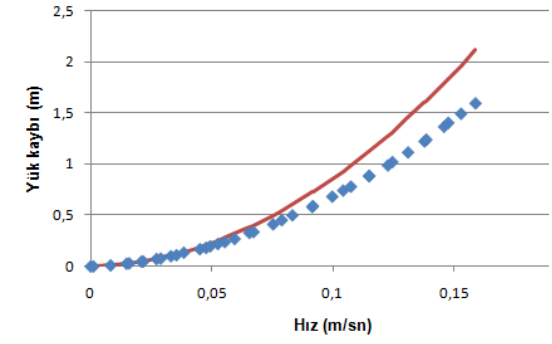
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



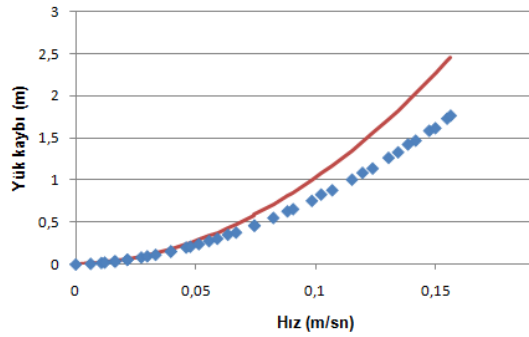
Şekil A.25 : 6 mm küre-2 (ϵ : 0,44)*
(T, °C: 21,1-22,3)



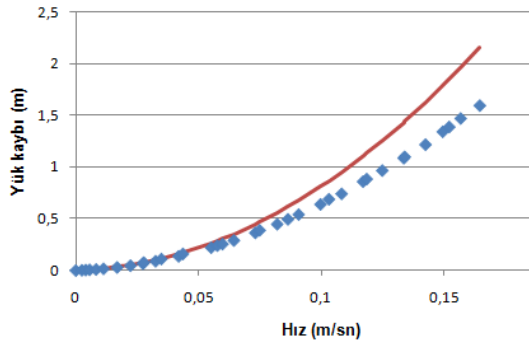
Şekil A.26 : 6 mm küre-3 (ϵ : 0,40)*
(T, °C: 23,9-24,7)



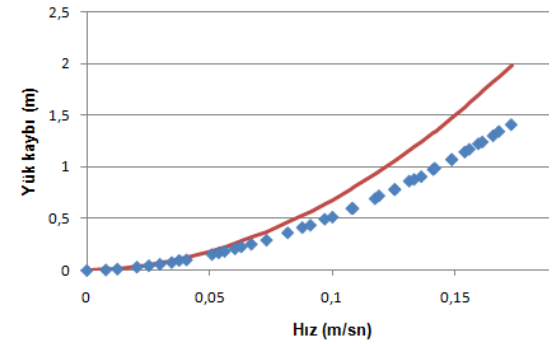
Şekil A.27 : 7 mm küre-1 (ϵ : 0,44)*
(T, °C: 21,9-22,9)



Şekil A.28 : 7 mm küre-2 (ϵ : 0,42)*
(T, °C: 22,2-23,2)

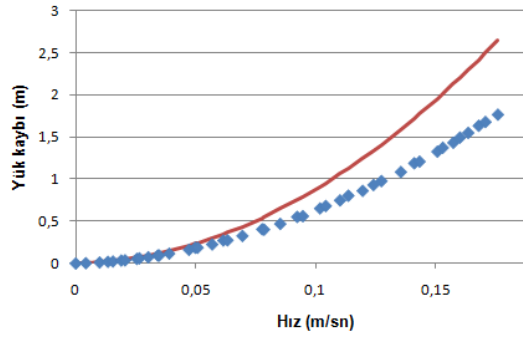


Şekil A.29 : 7 mm küre-3 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 22,4-23,1)

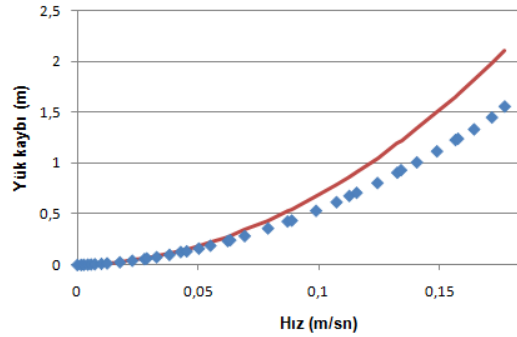


Şekil A.30 : 8 mm küre-1 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 22,2-23,5)

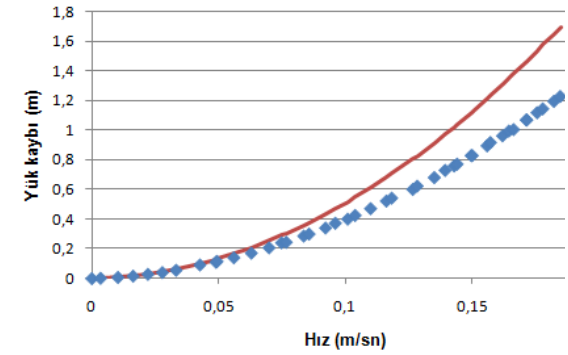
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



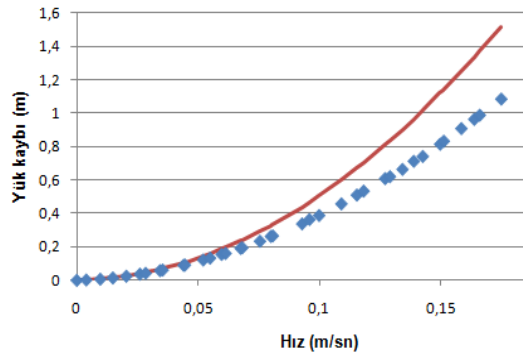
Şekil A.31 : 8 mm küre-2 (ϵ : 0,42)*
(T, °C: 19,7-21,1)



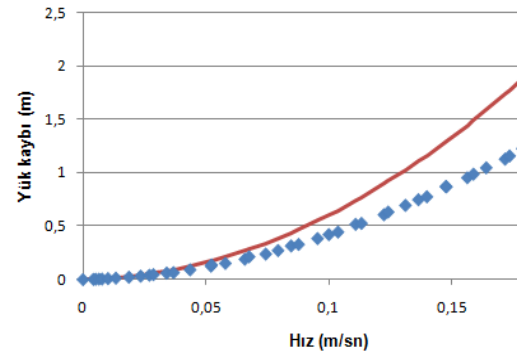
Şekil A.32 : 8 mm küre-3 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 22,1-22,7)



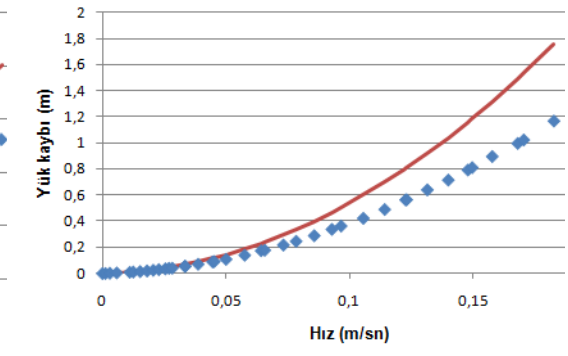
Şekil A.33 : 10 mm küre-1 (ϵ : 0,47)*
(T, °C: 21-22,2)



Şekil A.34 : 10 mm küre-2 (ϵ : 0,47)*
(T, °C: 22,6-23,3)

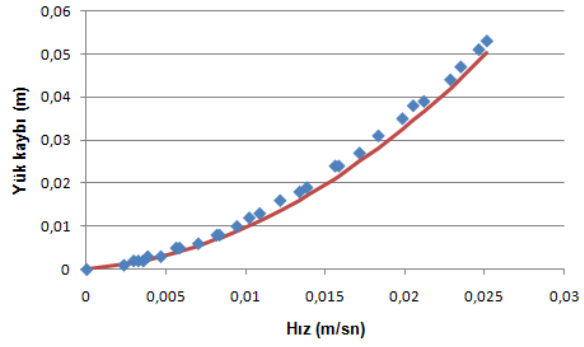


Şekil A.35 : 10 mm küre-3 (ϵ : 0,44)*
(T, °C: 21,8-22,3)

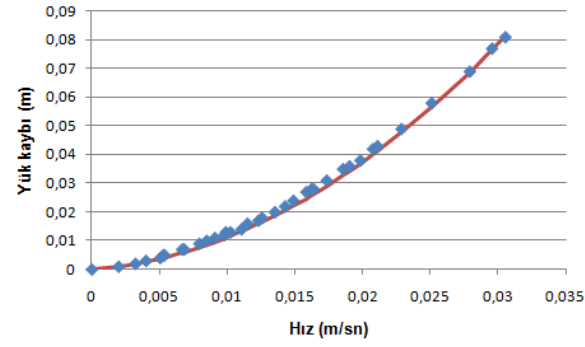


Şekil A.36 : 10 mm küre-4 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 22,5-22,9)

— : Ergun denklemi (1952a)
◆ : Data
* : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



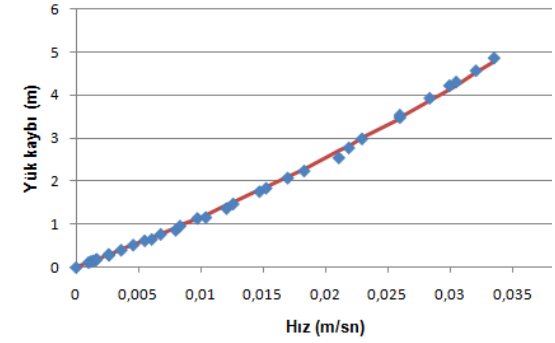
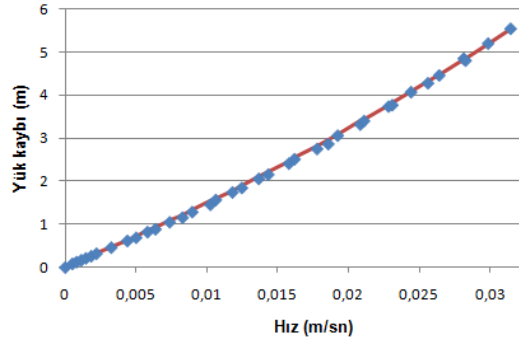
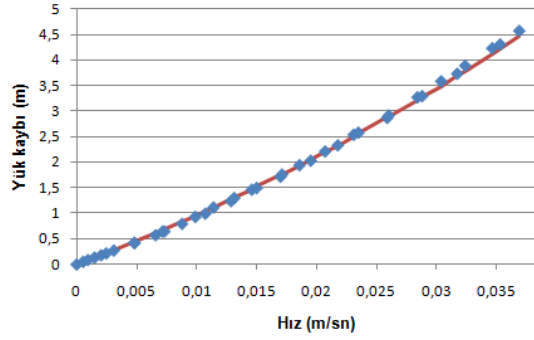
Şekil A.37 : 10 mm küre-5 (ϵ : 0,42)**
(T,°C: 25,8-25,9)



Şekil A.38 : 10 mm küre- 6 (ϵ : 0,41)**
(T,°C: 25,1-25,2)

- : Ergun denklemi (1952a)
- ◆ : Data
- * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney
- ** : 10,04 cm çaplı kolonda yapılan deney

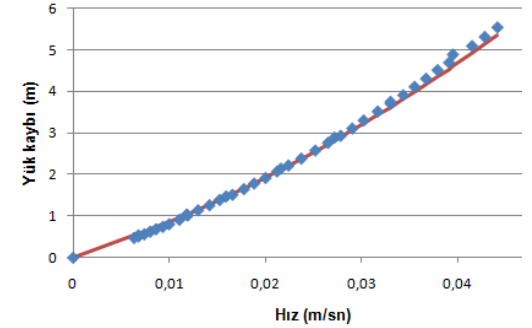
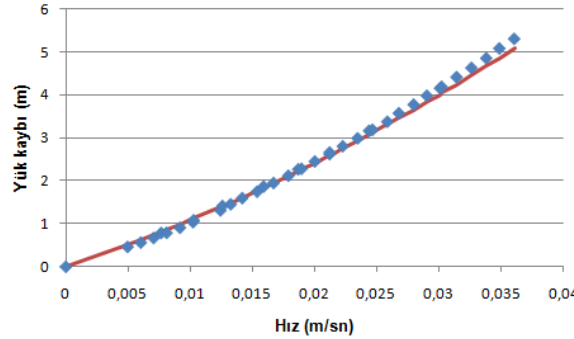
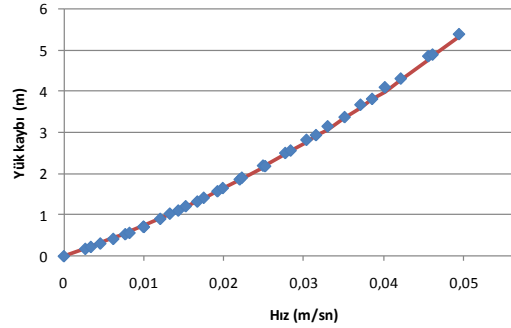
EK B: Düzgün şekilli olmayan malzemeler için hız-yük kaybı grafikleri



Şekil B.1 : 0,6-0,71 mm kum-1 (ϵ : 0,47)*
(T, °C: 22,7-23,8)

Şekil B.2 : 0,6-0,71 mm kum-2 (ϵ : 0,42)*
(T, °C: 22-23,3)

Şekil B.3 : 0,6-0,71 mm kum-3 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 22,1-23,8)

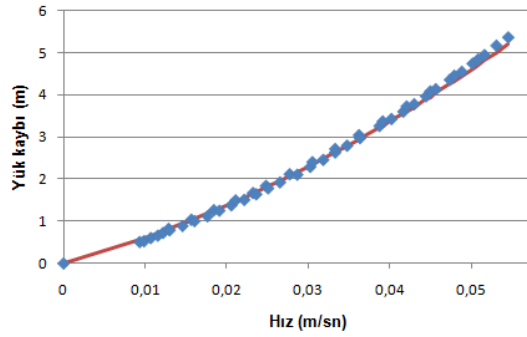


Şekil B.4 : 0,71-0,85 mm kum (ϵ : 0,46)
(T, °C: 21,1-21,4)

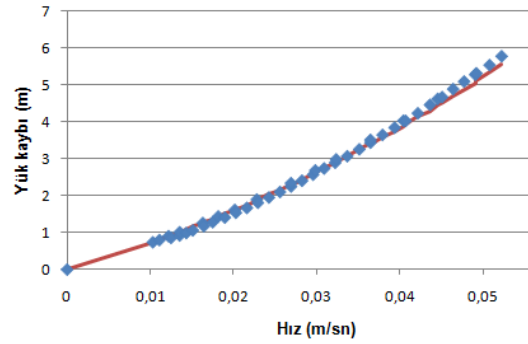
Şekil B.5 : 0,85-1,00 mm kum-1 (ϵ : 0,41)*
(T, °C: 21,8-22)

Şekil B.6 : 0,85-1,00 mm kum-2 (ϵ : 0,43)*
(T, °C: 22-22,2)

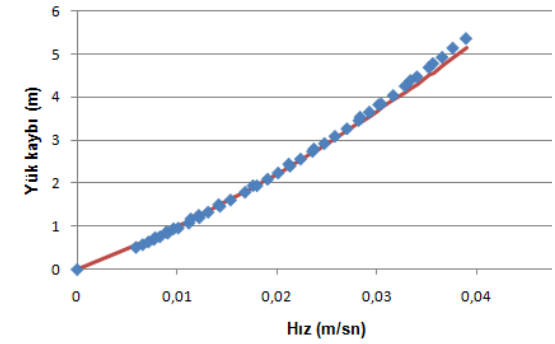
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



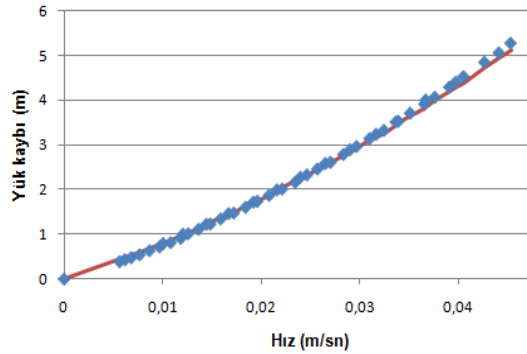
Şekil B.7 : 0,85-1,00 mm kum-3 (ϵ : 0,45)*
(T,°C: 21,5-21,8)



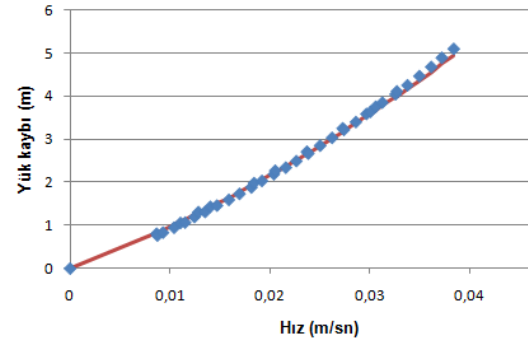
Şekil B.8 : 0,85-1,00 mm kum-4 (ϵ : 0,46)*
(T,°C: 17,9-18,6)



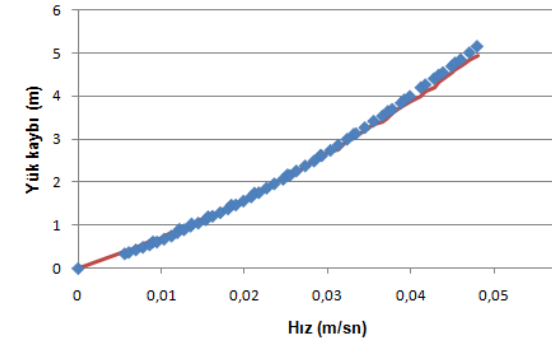
Şekil B.9 : 0,85-1,00 mm kum-5 (ϵ : 0,40)*
(T,°C: 19,1-19,5)



Şekil B.10 : 0,85-1,00 mm kum-6 (ϵ : 0,43)*
(T,°C: 19,8-20,3)

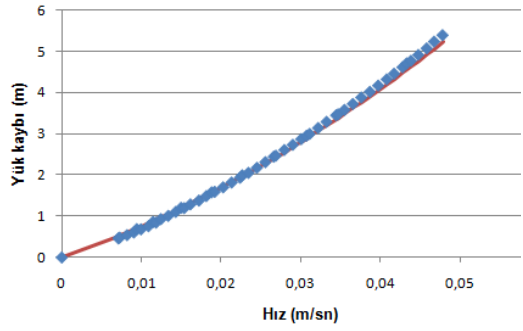


Şekil B.11 : 0,85-1,00 mm kum-7 (ϵ : 0,40)*
(T,°C: 20,7-20,9)

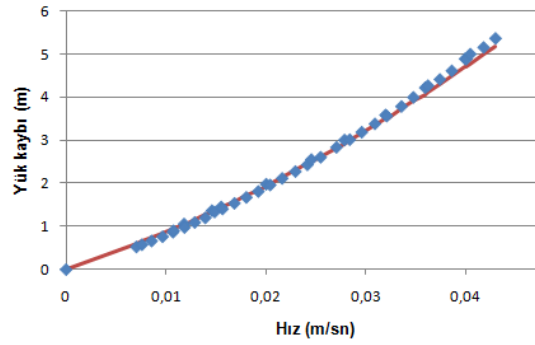


Şekil B.12 : 0,85-1,00 mm kum-8 (ϵ : 0,44)*
(T,°C: 20,4-21,9)

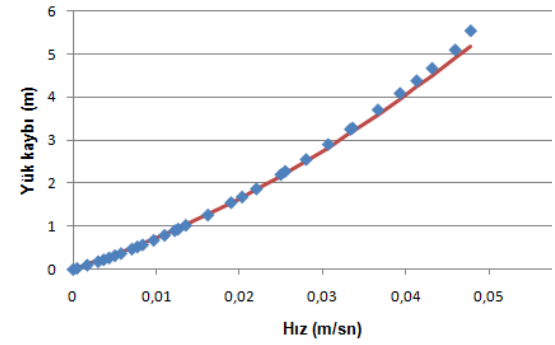
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



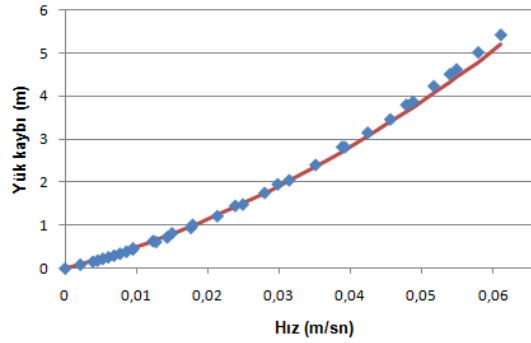
Şekil B.13 : 0,85-1,00 mm kum-9 (ϵ : 0,43)*
(T, °C: 22-22,9)



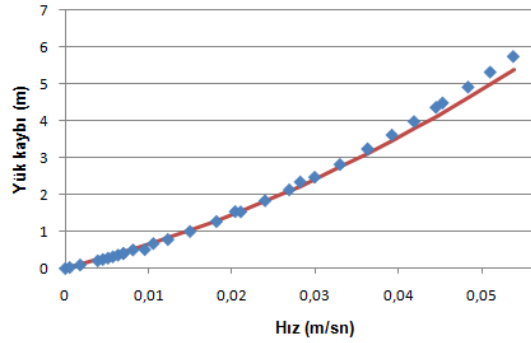
Şekil B.14 : 0,85-1,00 mm kum-10 (ϵ : 0,41)*
(T, °C: 22,4-22,8)



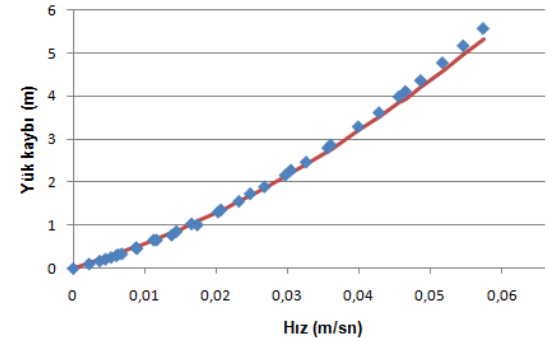
Şekil B.15 : 1,00-1,18 mm kum-1 (ϵ : 0,41)*
(T, °C: 20,8-21,1)



Şekil B.16 : 1,00-1,18 mm kum-2 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 19,6-20,2)

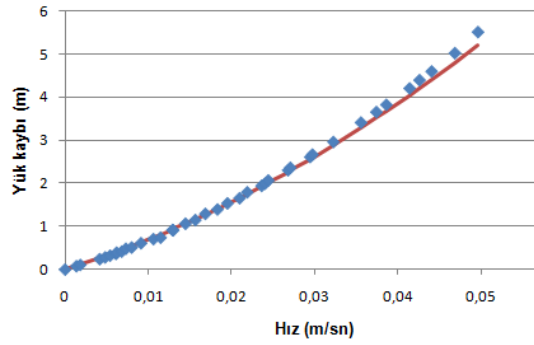


Şekil B.17 : 1,00-1,18 mm kum-3 (ϵ : 0,43)*
(T, °C: 18,8-19,3)

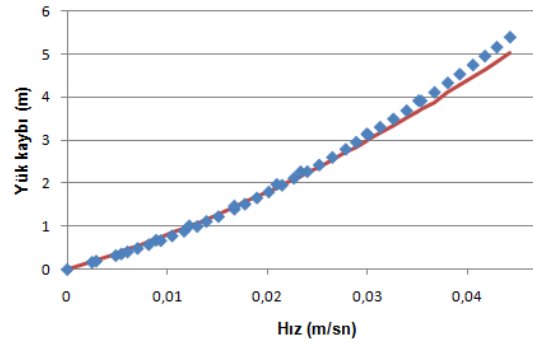


Şekil B.18 : 1,00-1,18 mm kum-4 (ϵ : 0,44)*
(T, °C: 19,4-19,8)

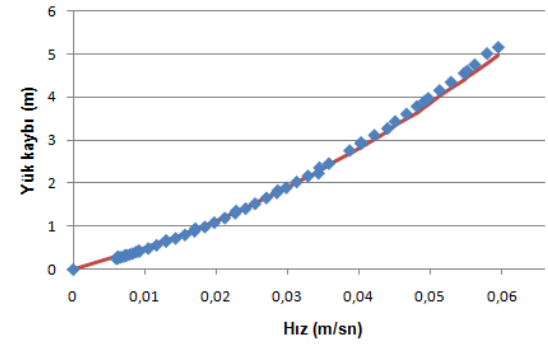
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



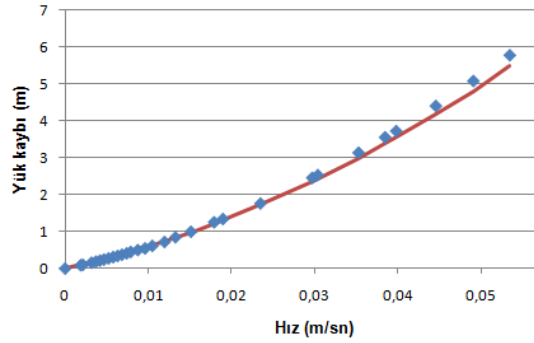
Şekil B.19 : 1,00-1,18 mm kum-5 (ϵ : 0,42)*
(T, °C: 19,7-20)



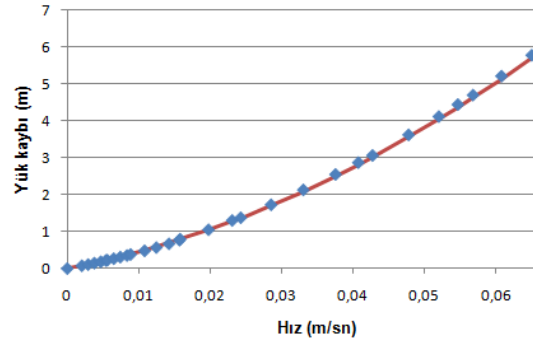
Şekil B.20 : 1,00-1,18 mm kum-6 (ϵ : 0,41)*
(T, °C: 19,9-20,7)



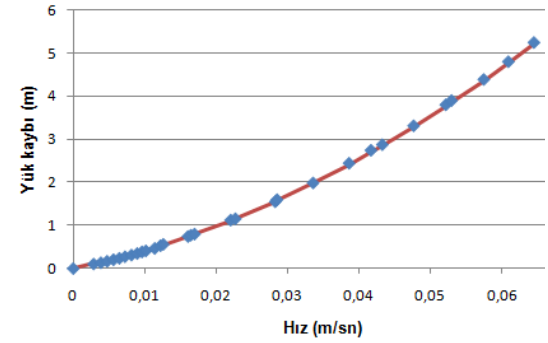
Şekil B.21 : 1,00-1,18 mm kum-7 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 21-21,7)



Şekil B.22 : 1,18-1,40 mm kum-1 (ϵ : 0,38)*
(T, °C: 20,6-20,8)

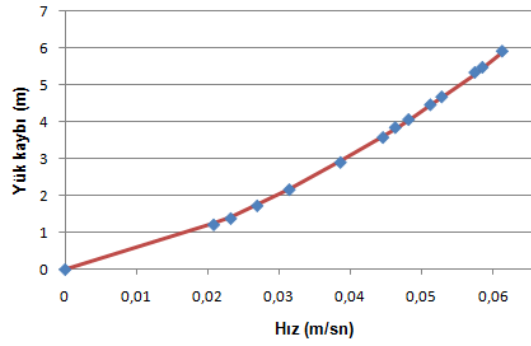


Şekil B.23 : 1,18-1,40 mm kum-2 (ϵ : 0,41)*
(T, °C: 20,4-20,8)

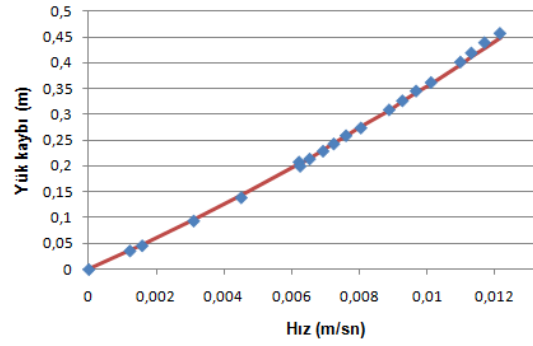


Şekil B.24 : 1,18-1,40 mm kum-3 (ϵ : 0,42)*
(T, °C: 20,9-21,2)

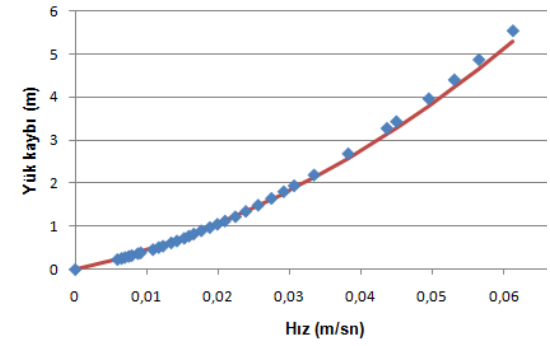
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



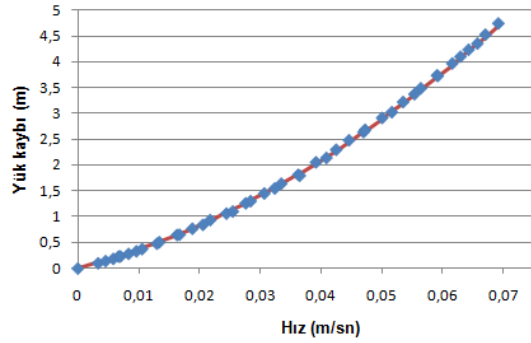
Şekil B.25 : 1,40-1,70 mm kum-1 (ϵ : 0,38)*
(T,°C: 20,8-21,3)



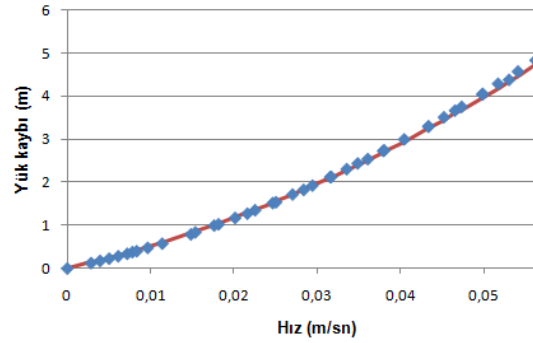
Şekil B.26 : 1,40-1,70 mm kum-2 (ϵ : 0,41)*
(T,°C: 20,6-20,8)



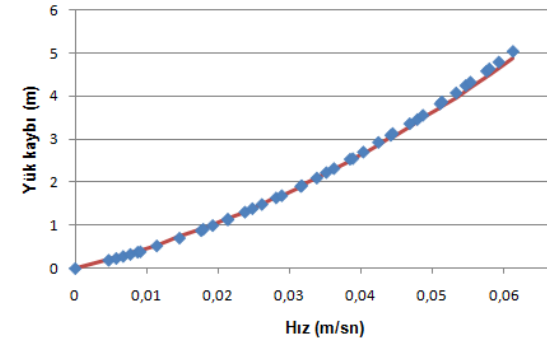
Şekil B.27 : 1,40-1,70 mm kum-3 (ϵ : 0,39)*
(T,°C: 20,1-20,4)



Şekil B.28 : 1,00-1,18 mm perlit-1 (ϵ : 0,46)*
(T,°C: 20,3-20,6)

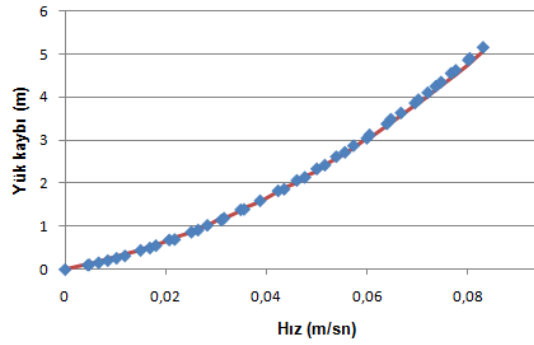


Şekil B.29 : 1,00-1,18 mm perlit-2 (ϵ : 0,42)*
(T,°C: 20,5-21)

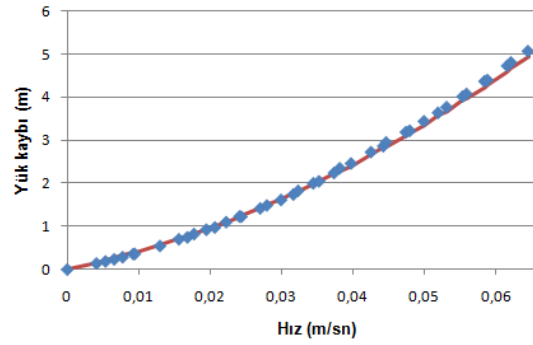


Şekil B.30 : 1,00-1,18 mm perlit-3 (ϵ : 0,44)*
(T,°C: 19,5-19,9)

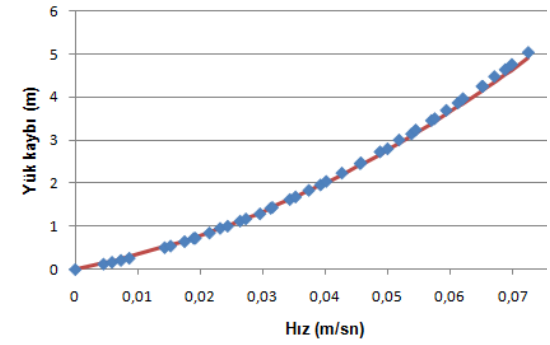
- : Ergun denklemi (1952a)
 ◆ : Data
 * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



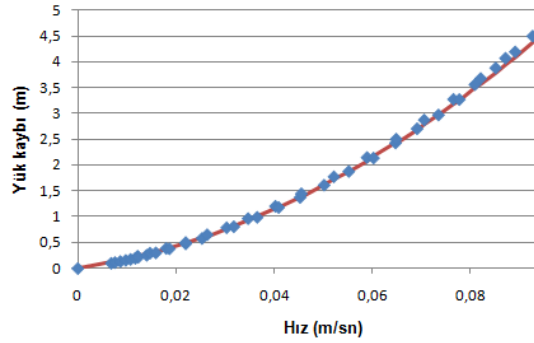
Şekil B.31 : 1,18-1,40 mm perlit-1 (ϵ : 0,47)*
(T,°C: 18,3-19,1)



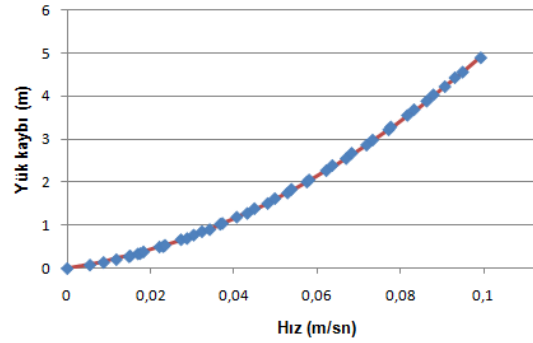
Şekil B.32 : 1,18-1,40 mm perlit-2 (ϵ : 0,42)*
(T,°C: 19,2-19,7)



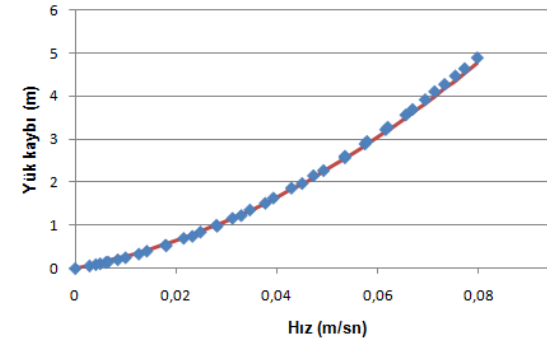
Şekil B.33 : 1,18-1,40 mm perlit-3 (ϵ : 0,45)*
(T,°C: 19,8-20,4)



Şekil B.34 : 1,40-1,70 mm perlit-1 (ϵ : 0,48)*
(T,°C: 21,3-22,1)

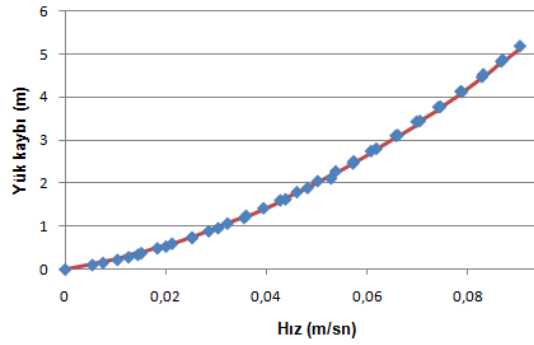


Şekil B.35 : 1,40-1,70 mm perlit -2 (ϵ : 0,48)*
(T,°C: 19,9-20,5)

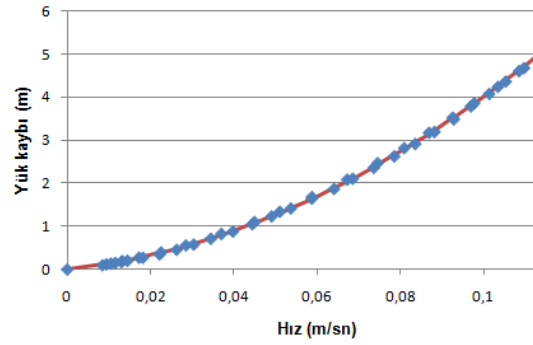


Şekil B.36 : 1,40-1,70 mm perlit -3 (ϵ : 0,43)*
(T,°C: 18,4-19)

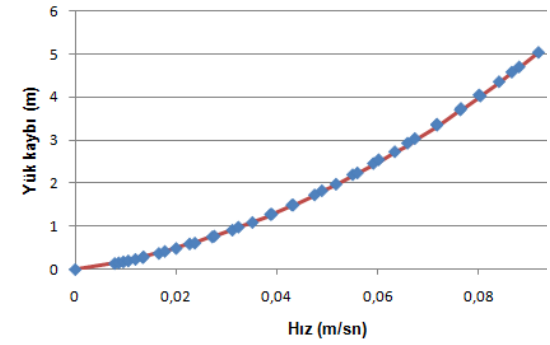
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



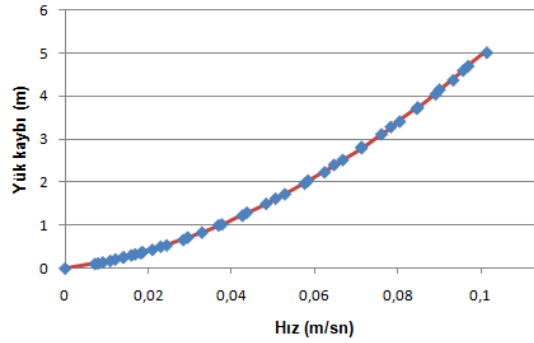
Şekil B.37 : 1,40-1,70 mm perlit -4 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 17,4-17,8)



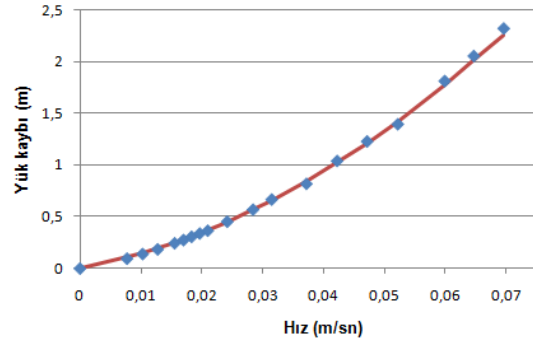
Şekil B.38 : 1,70-2,00 mm perlit-1 (ϵ : 0,48)*
(T, °C: 19,5-20,1)



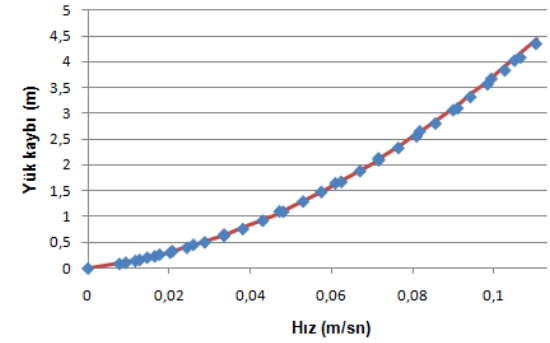
Şekil B.39 : 1,70-2,00 mm perlit-2 (ϵ : 0,43)*
(T, °C: 20,2-20,8)



Şekil B.40 : 1,70-2,00 mm perlit-3 (ϵ : 0,43)*
(T, °C: 20,9-21,4)

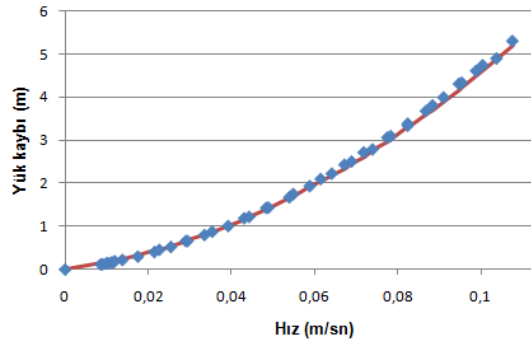


Şekil B.41 : 2,00-2,36 mm perlit-1 (ϵ : 0,47)*
(T, °C: 19,1-20,8)

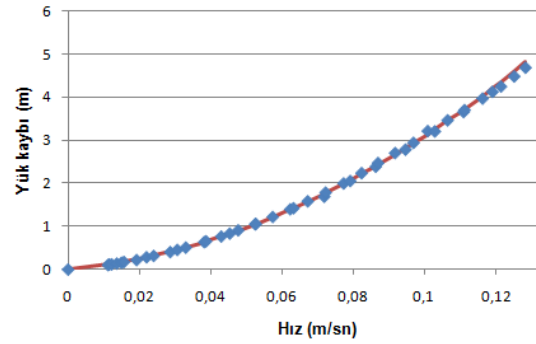


Şekil B.42 : 2,00-2,36 mm perlit-2 (ϵ : 0,50)*
(T, °C: 17,6-18,7)

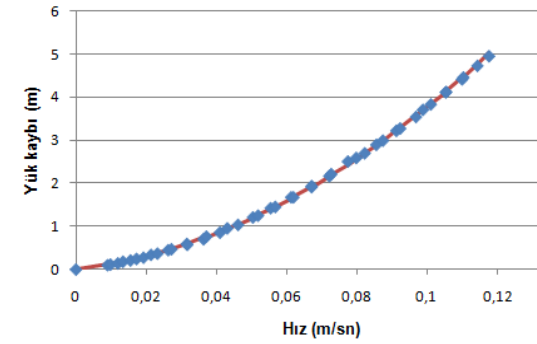
— : Ergun denklemi (1952a)
◆ : Data
* : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



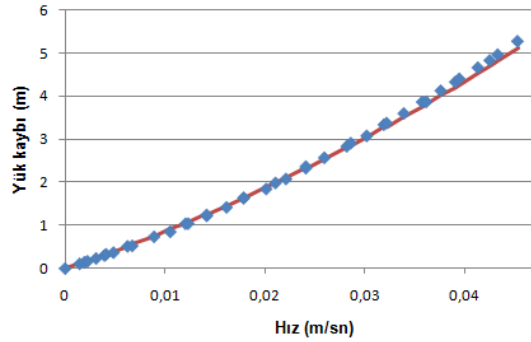
Şekil B.43 : 2,00-2,36 mm perlit-3 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 16,1-17,5)



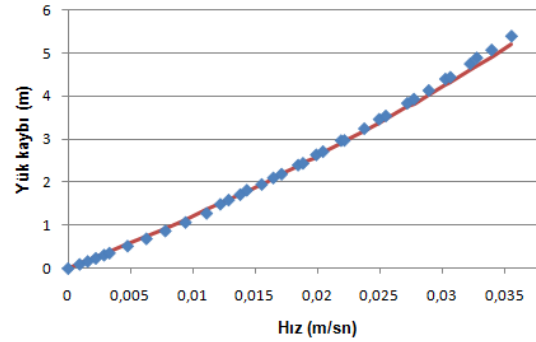
Şekil B.44 : 2,00-2,36 mm perlit-4 (ϵ : 0,51)*
(T, °C: 17,9-18,7)



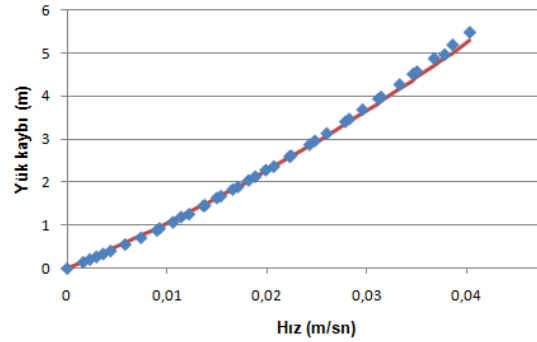
Şekil B.45 : 2,00-2,36 mm perlit-5 (ϵ : 0,48)*
(T, °C: 18,4-19,1)



Şekil B.46 : 0,50-0,60 mm garnet-1 (ϵ : 0,50)*
(T, °C: 24,2-24,6)

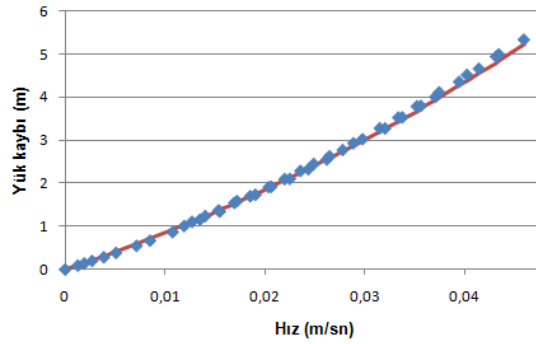


Şekil B.47 : 0,50-0,60 mm garnet-2 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 24,4-24,9)

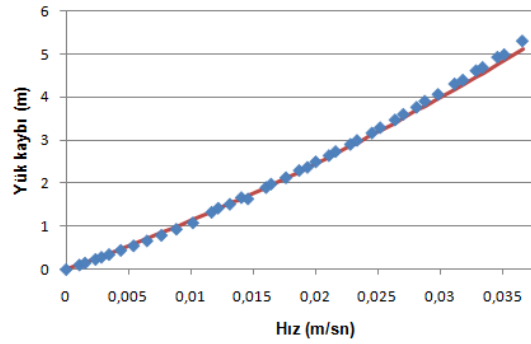


Şekil B.48 : 0,50-0,60 mm garnet-3 (ϵ : 0,48)*
(T, °C: 23,1-23,5)

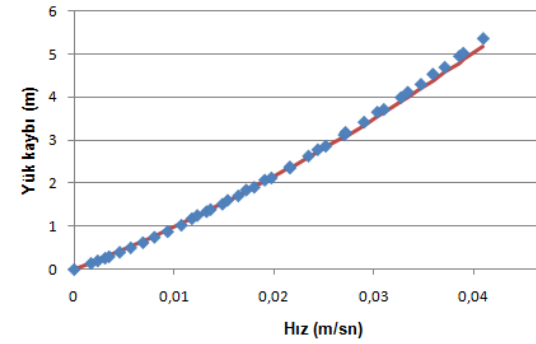
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



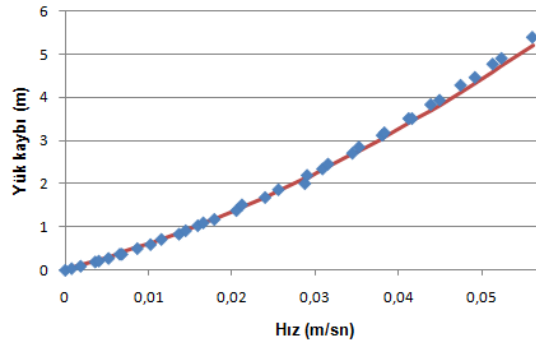
Şekil B.49 : 0,60-0,71 mm garnet-1 (ϵ : 0,48)*
(T, °C: 23,2-23,7)



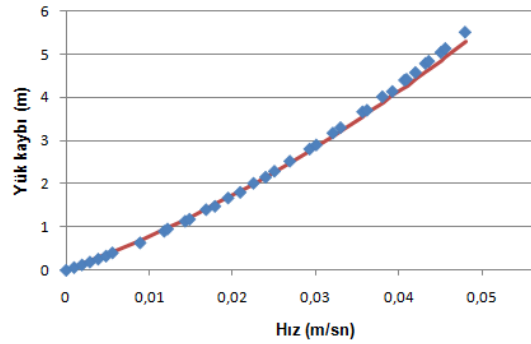
Şekil B.50 : 0,60-0,71 mm garnet-2 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 23-23,9)



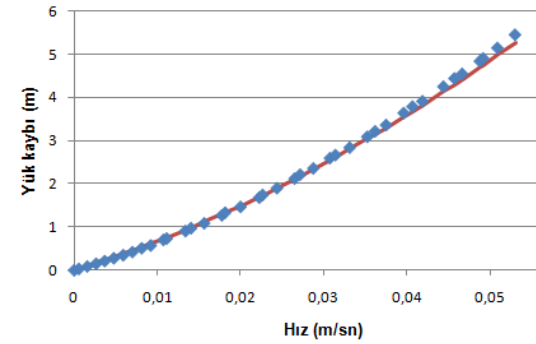
Şekil B.51 : 0,60-0,71 mm garnet-3 (ϵ : 0,47)*
(T, °C: 22,2-22,7)



Şekil B.52 : 0,71-0,85 mm garnet-1 (ϵ : 0,50)*
(T, °C: 23,2-23,7)

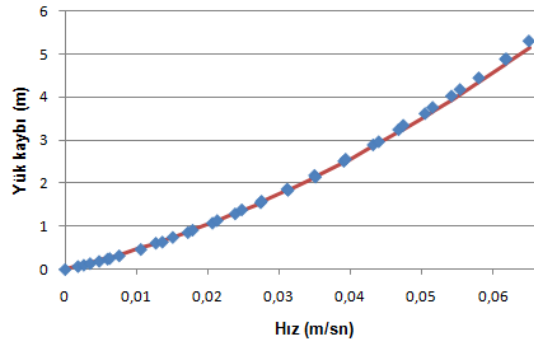


Şekil B.53 : 0,71-0,85 mm garnet-2 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 23,8-24,1)

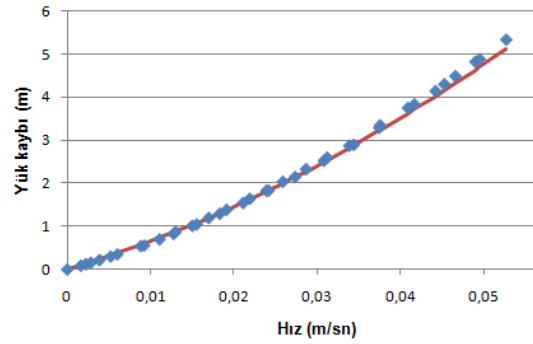


Şekil B.54 : 0,71-0,85 mm garnet-3 (ϵ : 0,48)*
(T, °C: 24-24,3)

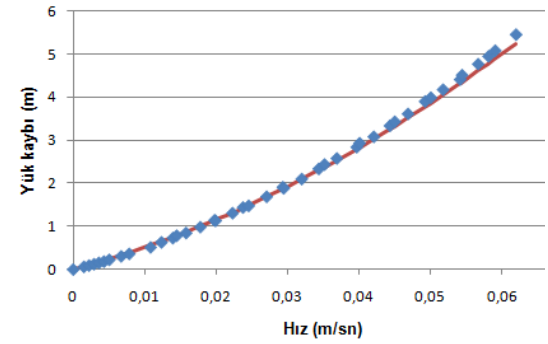
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



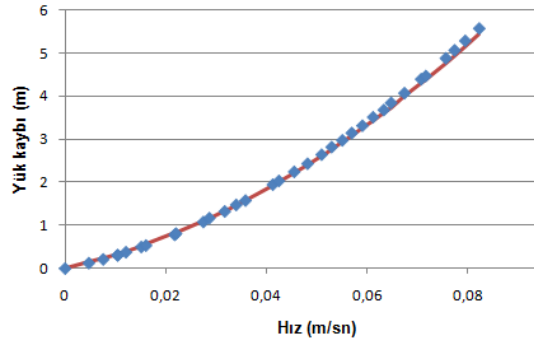
Şekil B.55 : 0,85-1,00 mm garnet-1 (ϵ : 0,49)*
(T, °C: 22,9-23,4)



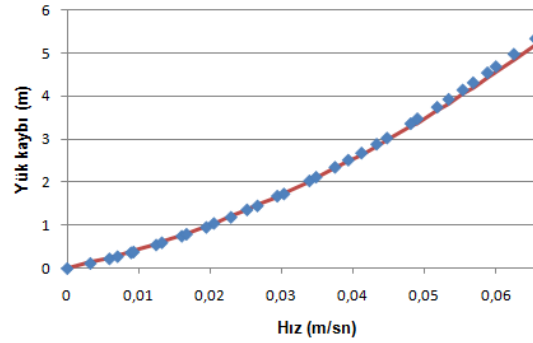
Şekil B.56 : 0,85-1,00 mm garnet-2 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 19,9-20,7)



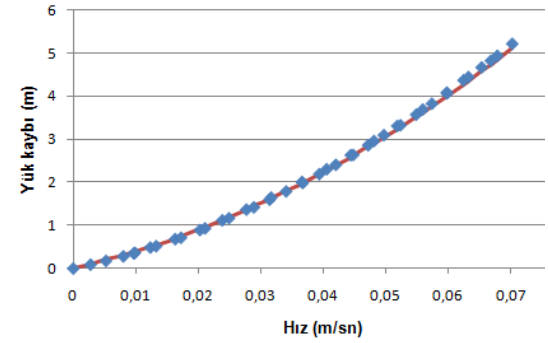
Şekil B.57 : 0,85-1,00 mm garnet-3 (ϵ : 0,48)*
(T, °C: 22,9-23,5)



Şekil B.58 : 1,00-1,18 mm garnet-1 (ϵ : 0,50)*
(T, °C: 21,9-22,4)

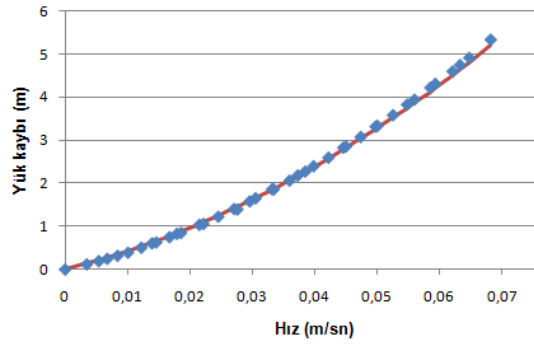


Şekil B.59 : 1,00-1,18 mm garnet-2 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 22,6-23)

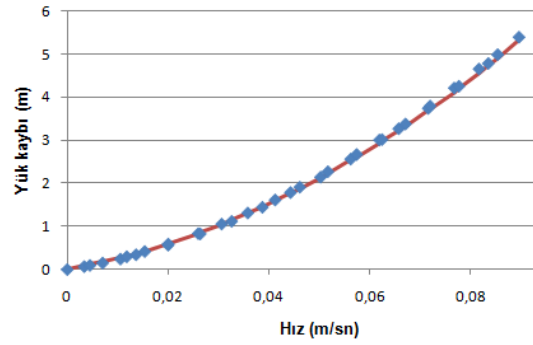


Şekil B.60 : 1,00-1,18 mm garnet-3 (ϵ : 0,48)*
(T, °C: 21,6-22,1)

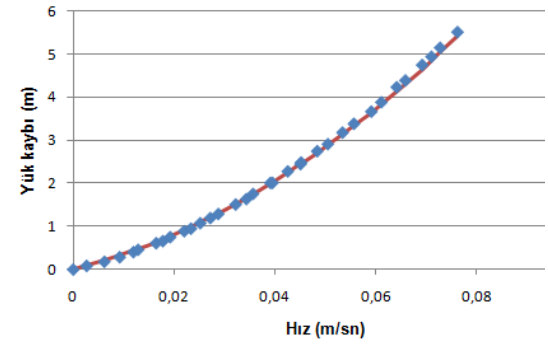
— : Ergun denklemi (1952a)
 ◆ : Data
 * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



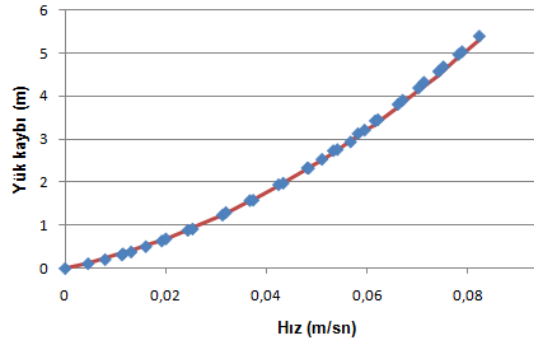
Şekil B.61 : 1,00-1,18 mm garnet-4 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 21,6-22,2)



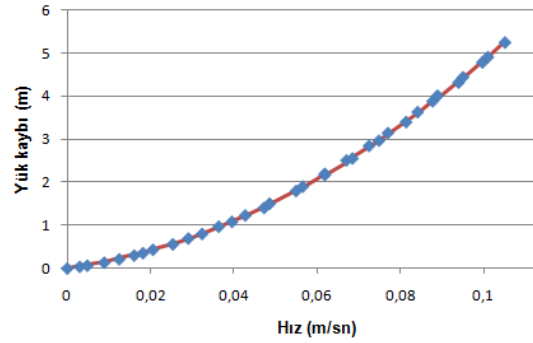
Şekil B.62 : 1,18-1,40 mm garnet-1 (ϵ : 0,49)*
(T, °C: 22,4-22,8)



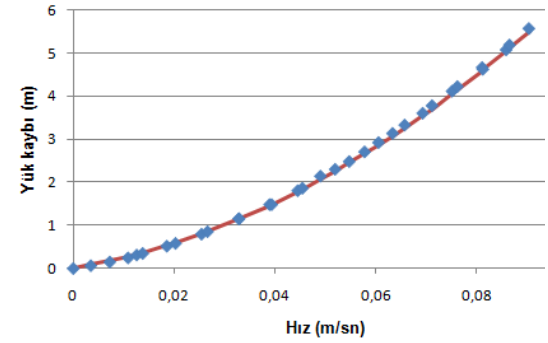
Şekil B.63 : 1,18-1,40 mm garnet-2 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 22,4-22,7)



Şekil B.64 : 1,18-1,40 mm garnet-3 (ϵ : 0,47)*
(T, °C: 22,7-23,1)

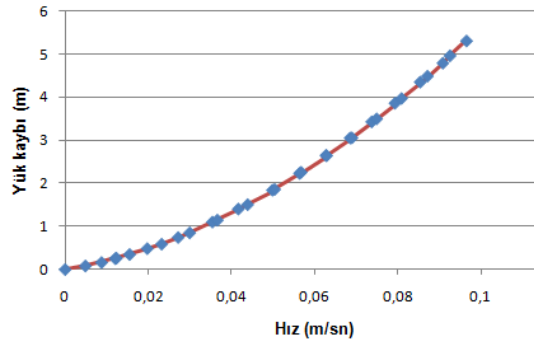


Şekil B.65 : 1,40-1,70 mm garnet-1 (ϵ : 0,50)*
(T, °C: 22,9-23,4)

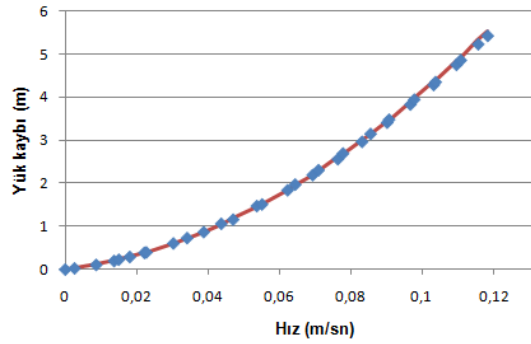


Şekil B.66 : 1,40-1,70 mm garnet-2 (ϵ : 0,46)*
(T, °C: 23,3-23,7)

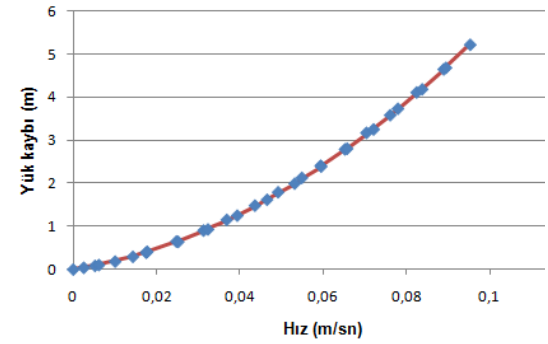
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



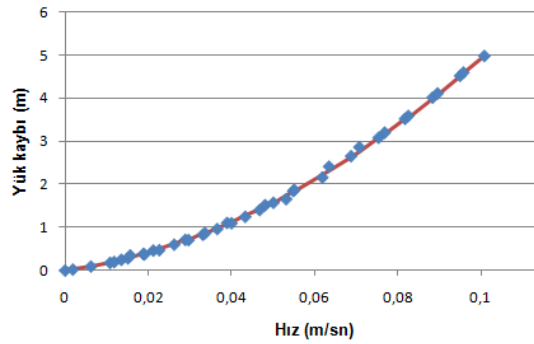
Şekil B.67 : 1,40-1,70 mm garnet-3 (ϵ : 0,47)*
(T, °C: 23,6-24)



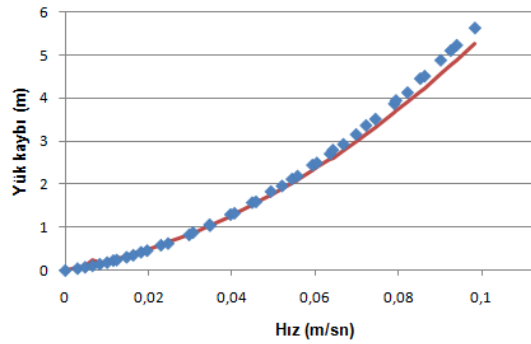
Şekil B.68 : 1,70-2,00 mm garnet -1 (ϵ : 0,49)*
(T, °C: 23,5-24)



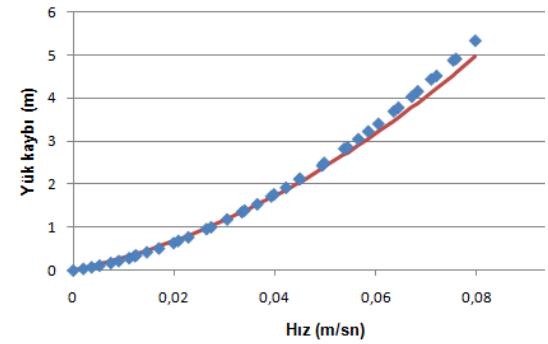
Şekil B.69 : 1,70-2,00 mm garnet -2 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 23,7-24,1)



Şekil B.70 : 1,70-2,00 mm garnet -3 (ϵ : 0,47)*
(T, °C: 20,1-20,6)

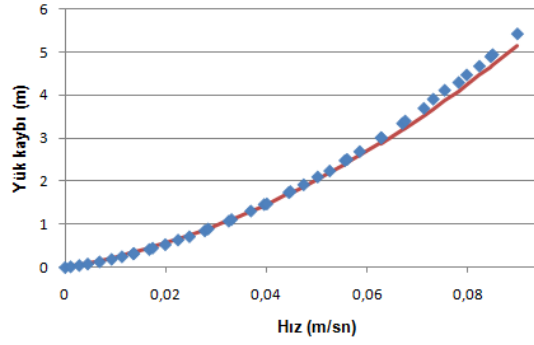


Şekil B.71 : 1,40-1,70 mm kırık cam-1 (ϵ : 0,53)*
(T, °C: 23,7-24,3)

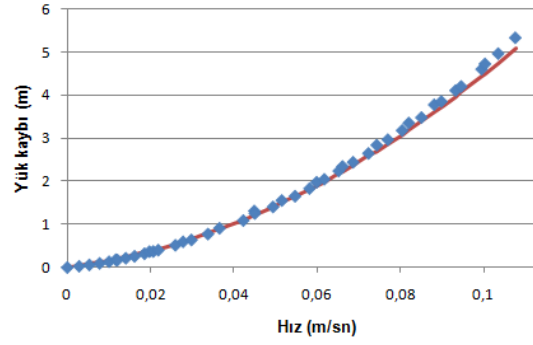


Şekil B.72 : 1,40-1,70 mm kırık cam-2 (ϵ : 0,49)*
(T, °C: 23,5-24)

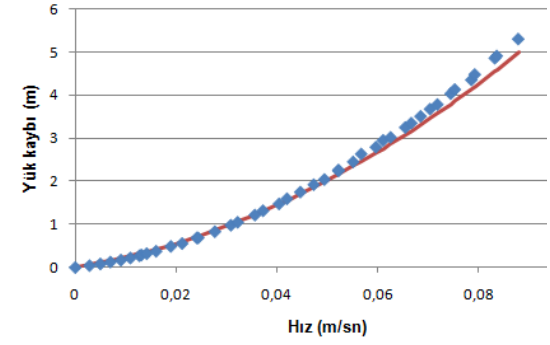
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



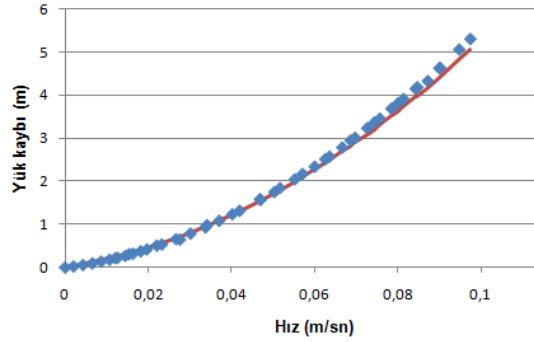
Şekil B.73 : 1,40-1,70 mm kırık cam-3 (ϵ : 0,51)*
(T, °C: 23,4-23,8)



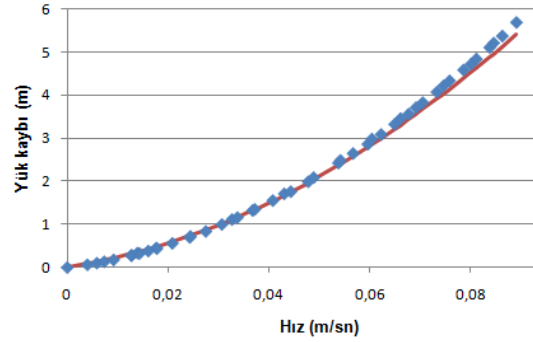
Şekil B.74 : 1,70–2,00 mm kırık cam-1 (ϵ : 0,52)*
(T, °C: 24,1-24,6)



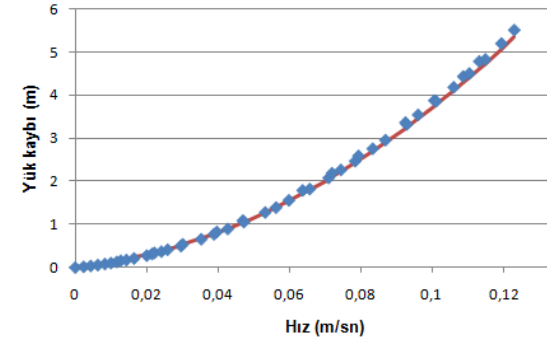
Şekil B.75 : 1,70–2,00 mm kırık cam-2 (ϵ : 0,48)*
(T, °C: 24,6-24,9)



Şekil B.76 : 1,70–2,00 mm kırık cam-3 (ϵ : 0,50)*
(T, °C: 24,5-24,9)

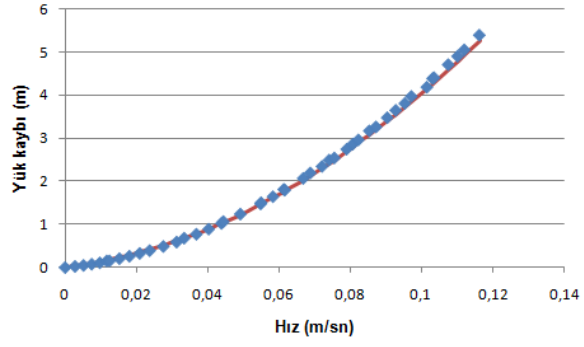


Şekil B.77 : 2,00-2,36 mm kırık cam-1 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 23,1-23,7)



Şekil B.78 : 2,00-2,36 mm kırık cam-2 (ϵ : 0,45)*
(T, °C: 24,2-24,8)

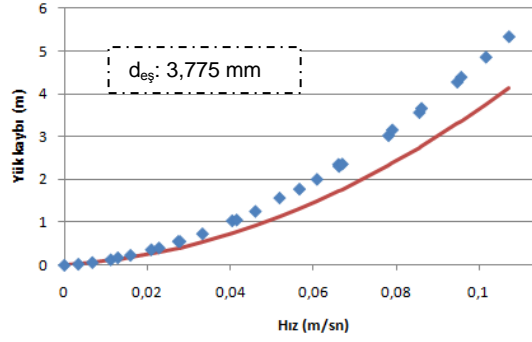
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney



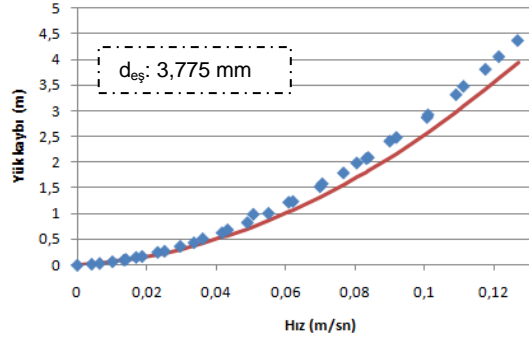
Şekil B.79 : 2,00-2,36 mm kırık cam-3 (ϵ : 0,50)*
(T, °C: 25,3-25,7)

-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney

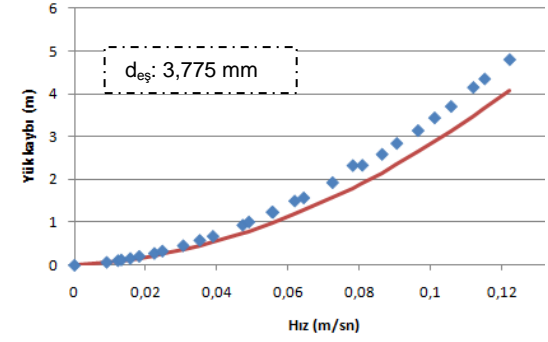
EK C: Küresel olmayan düzgün şekilli malzemeler için hız-yük kaybı grafikleri



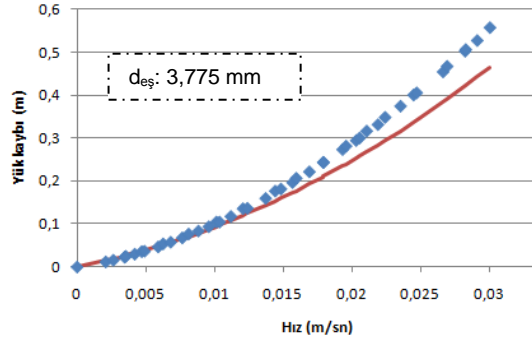
Şekil C.1 : Üçgen prizma-1 ($\epsilon: 0,41$)*
(T, °C: 25-25,3)



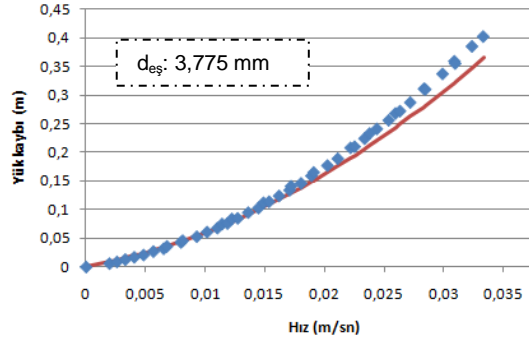
Şekil C.2 : Üçgen prizma-2 ($\epsilon: 0,46$)*
(T, °C: 24,8-25,2)



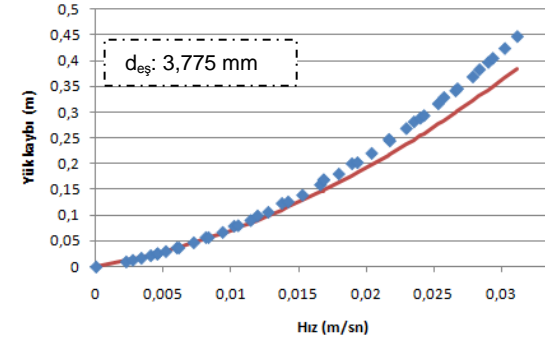
Şekil C.3 : Üçgen prizma-3 ($\epsilon: 0,44$)*
(T, °C: 25,1-25,3)



Şekil C.4 : Üçgen prizma-4 ($\epsilon: 0,40$)**
(T, °C: 25,2-25,8)

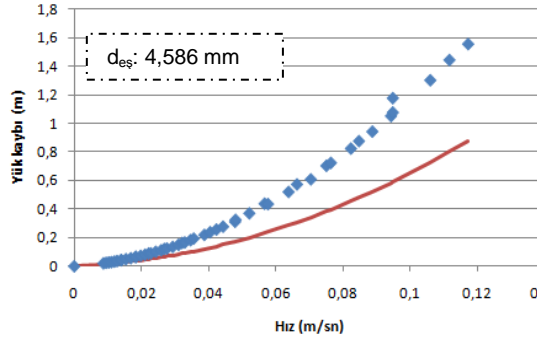


Şekil C.5 : Üçgen prizma-5 ($\epsilon: 0,45$)**
(T, °C: 25,6-26,1)

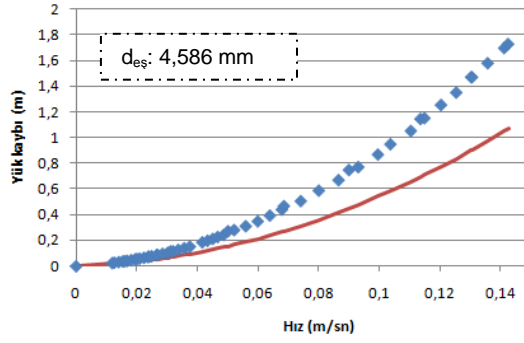


Şekil C.6 : Üçgen prizma-6 ($\epsilon: 0,43$)**
(T, °C: 24,8-26,1)

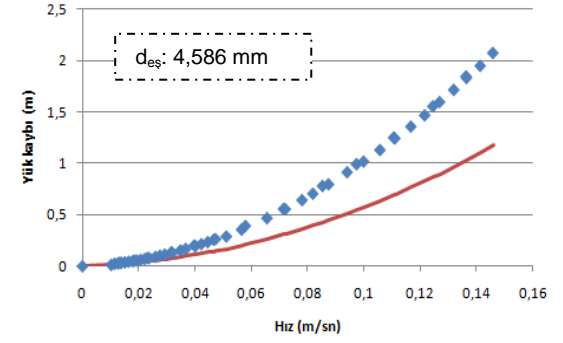
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney
 - ** : 10,04 cm çaplı kolonda yapılan deney



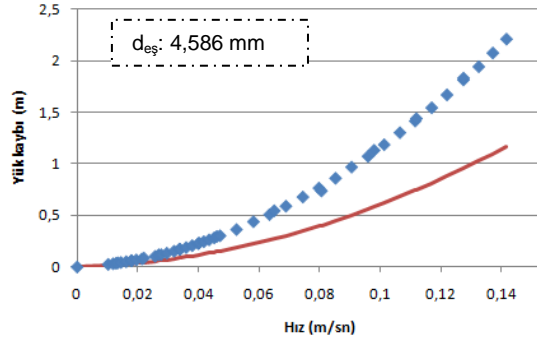
Şekil C.7: Halka-1, 1 ($\epsilon: 0,62$)*
(T, °C: 16,5-17,5)



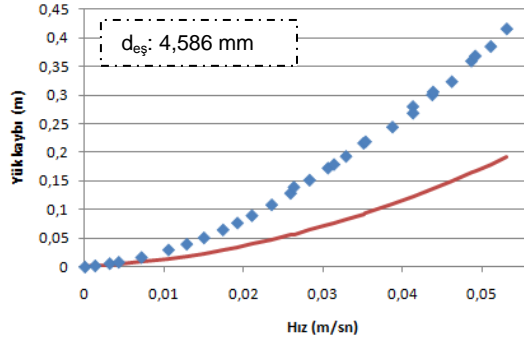
Şekil C.8: Halka-1, 2 ($\epsilon: 0,65$)*
(T, °C: 24,8-26,1)



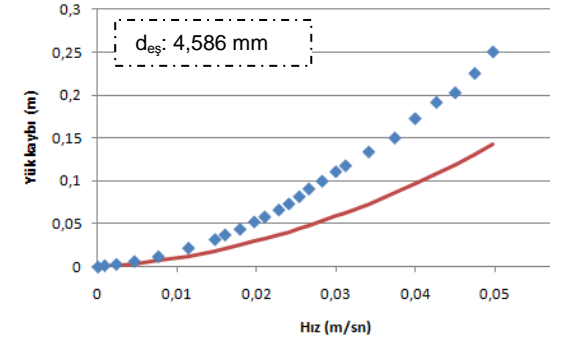
Şekil C.9: Halka-1, 3 ($\epsilon: 0,64$)*
(T, °C: 21-21,2)



Şekil C.10: Halka-1, 4 ($\epsilon: 0,63$)*
(T, °C: 22,3-23)

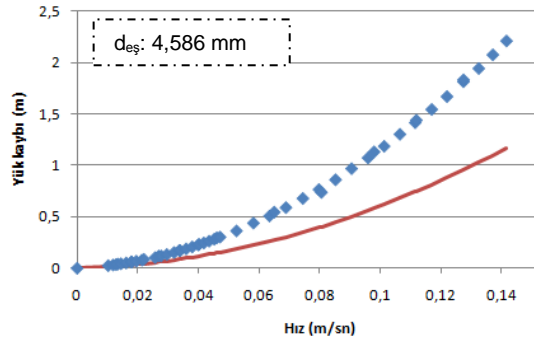


Şekil C.11: Halka-1, 5 ($\epsilon: 0,62$)**
(T, °C: 22,8-23,4)

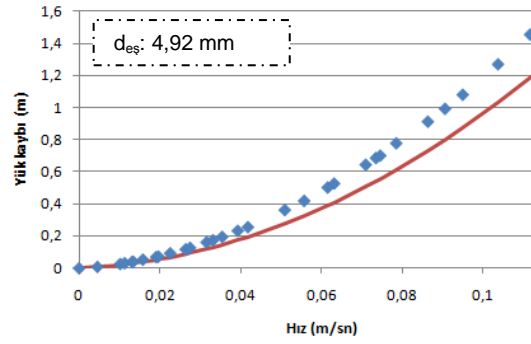


Şekil C.12: Halka-1, 6 ($\epsilon: 0,65$)**
(T, °C: 22-22,6)

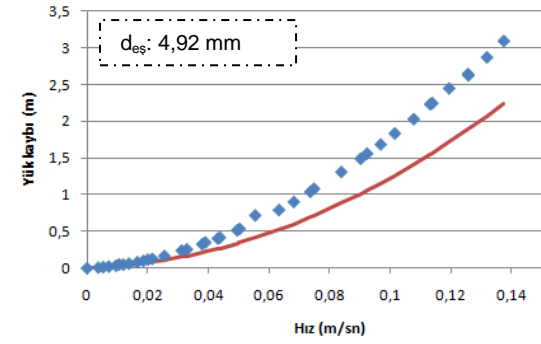
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney
 - ** : 10,04 cm çaplı kolonda yapılan deney



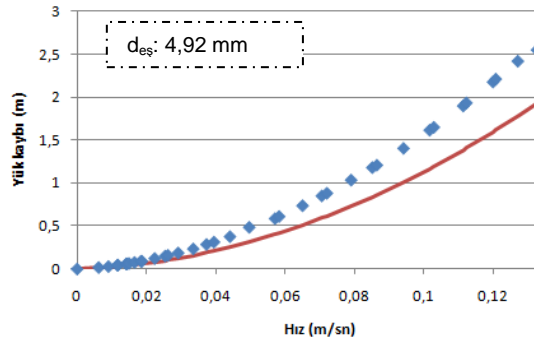
Şekil C.13: Halka-1, 7 ($\epsilon: 0,63$)**
(T, °C: 24,3-24,7)



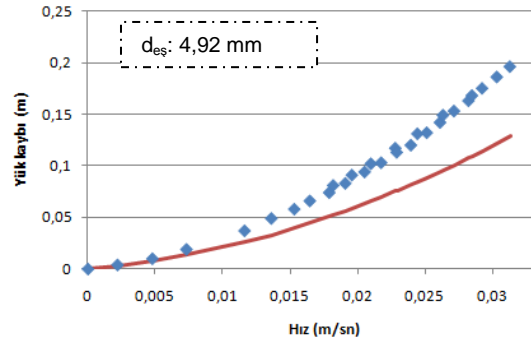
Şekil C.14: Halka-2, 1 ($\epsilon: 0,53$)*
(T, °C: 24,1-24,4)



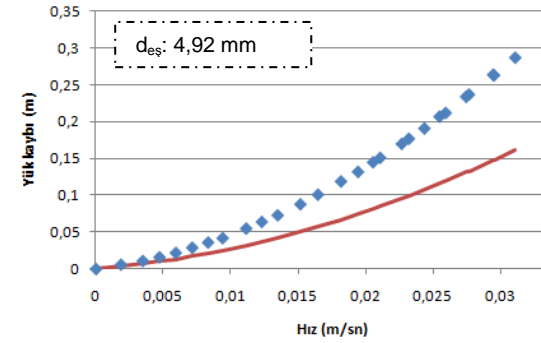
Şekil C.15: Halka-2, 2 ($\epsilon: 0,49$)*
(T, °C: 25,3-25,9)



Şekil C.16: Halka-2, 3 ($\epsilon: 0,50$)*
(T, °C: 25,7-26)

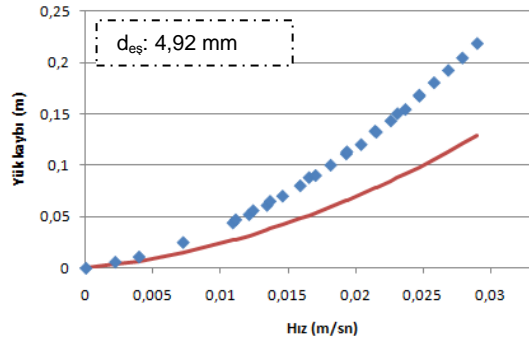


Şekil C.17: Halka-2, 4 ($\epsilon: 0,52$)**
(T, °C: 25,8-26,2)

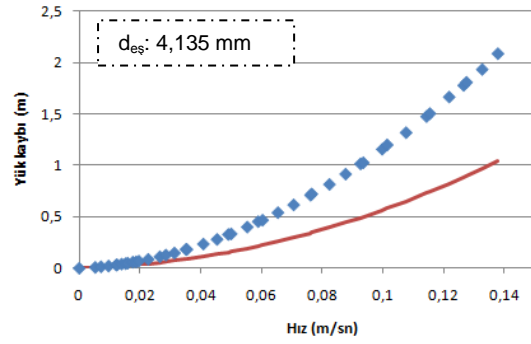


Şekil C.18: Halka-2, 5 ($\epsilon: 0,48$)**
(T, °C: 26,1-26,3)

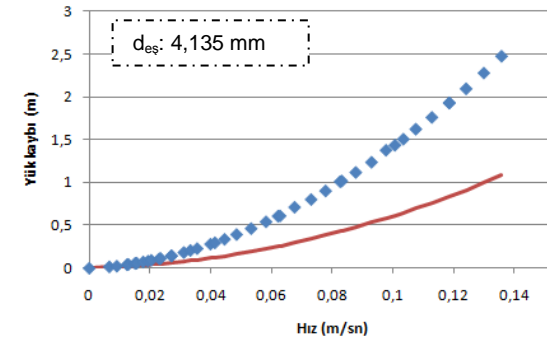
- : Ergun denklemi (1952a)
- ◆ : Data
- * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney
- ** : 10,04 cm çaplı kolonda yapılan deney



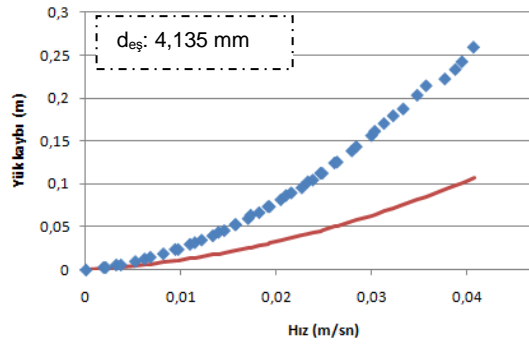
Şekil C.19: Halka-2, 6 ($\epsilon: 0,50$)**
(T, °C: 26,3-26,4)



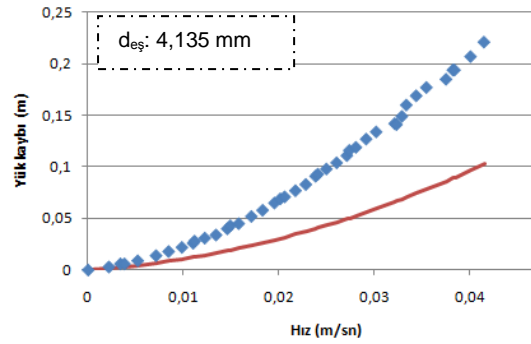
Şekil C.20: Halka-3, 1 ($\epsilon: 0,69$)*
(T, °C: 24,9-25,4)



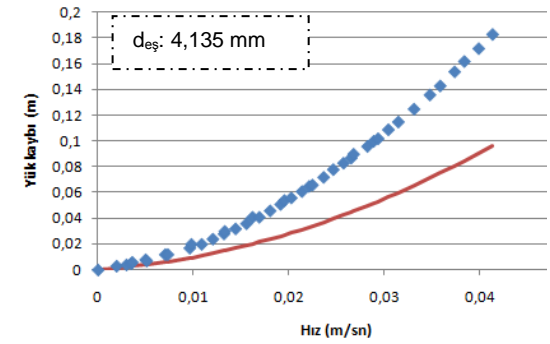
Şekil C.21: Halka-3, 2 ($\epsilon: 0,67$)*
(T, °C: 25,2-25,7)



Şekil C.22: Halka-3, 3 ($\epsilon: 0,67$)**
(T, °C: 27,9-28,4)

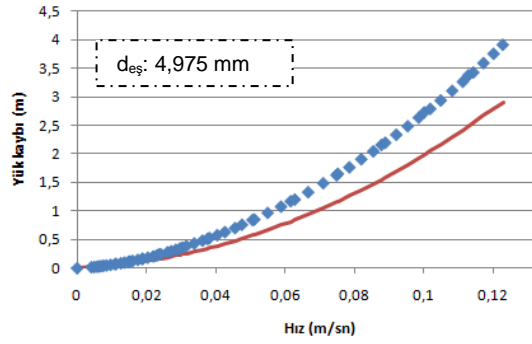


Şekil C.23: Halka-3, 4 ($\epsilon: 0,69$)**
(T, °C: 28,3-28,5)

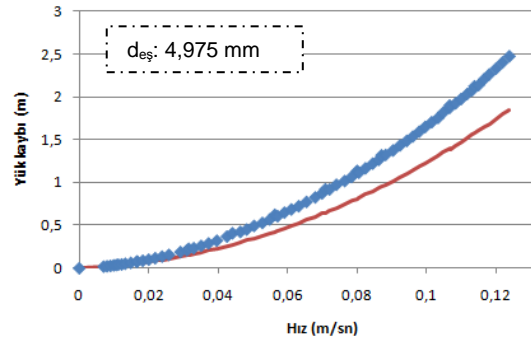


Şekil C.24: Halka-3, 5 ($\epsilon: 0,70$)**
(T, °C: 27,9-28,1)

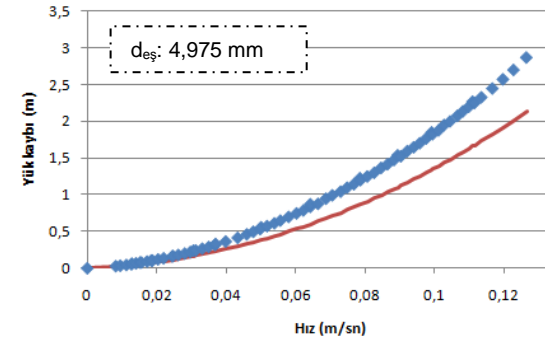
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney
 - ** : 10,04 cm çaplı kolonda yapılan deney



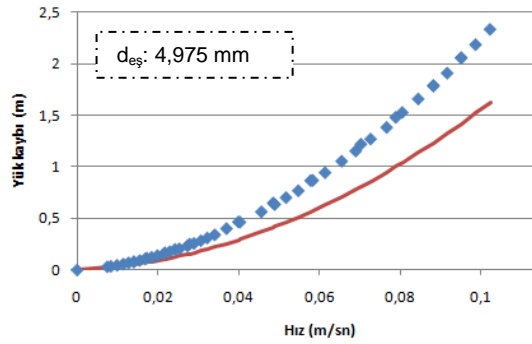
Şekil C.25: Küp-1, 1 ($\epsilon: 0,40$)*
(T, °C: 13,7-16,9)



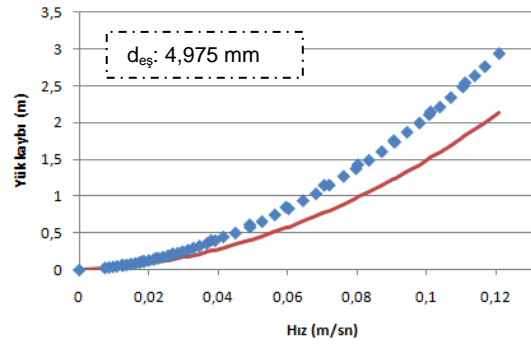
Şekil C.26: Küp-1, 2 ($\epsilon: 0,46$)*
(T, °C: 17,1-19,3)



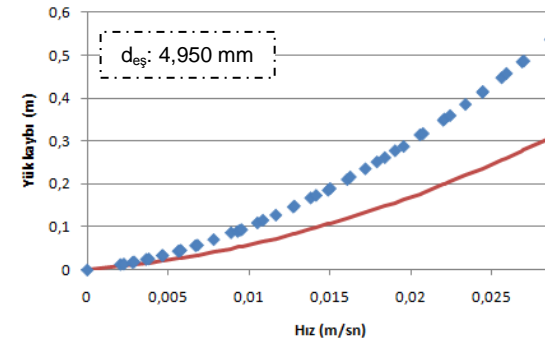
Şekil C.27: Küp-1, 3 ($\epsilon: 0,45$)*
(T, °C: 20,1-21,9)



Şekil C.28: Küp-1, 4 ($\epsilon: 0,43$)*
(T, °C: 21,9-22,4)

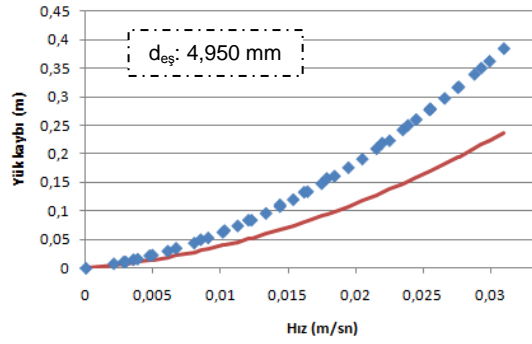


Şekil C.29: Küp-1, 5 ($\epsilon: 0,43$)*
(T, °C: 20,8-22)

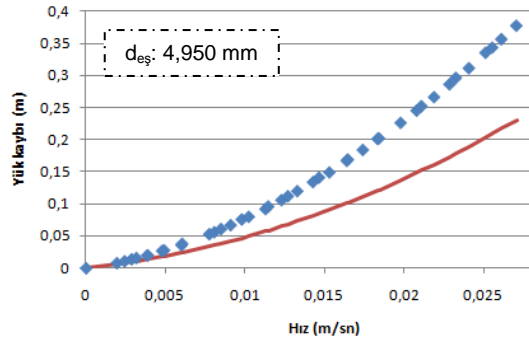


Şekil C.30: Küp-2, 1 ($\epsilon: 0,35$)**
(T, °C: 28-28,2)

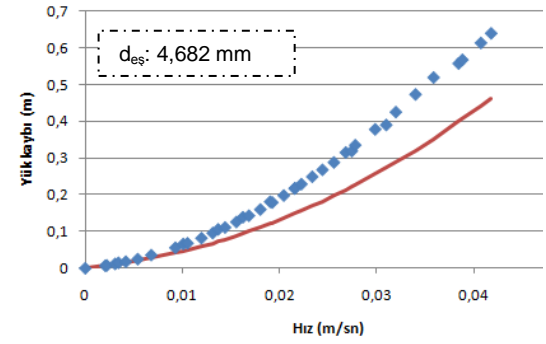
-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - * : 4 cm çaplı kolonda yapılan deney
 - ** : 10,04 cm çaplı kolonda yapılan deney



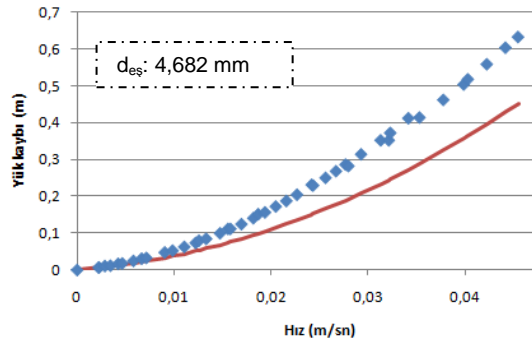
Şekil C.31 : Küp-2, 2 ($\epsilon: 0,40$)**
(T, °C: 27,9-28,2)



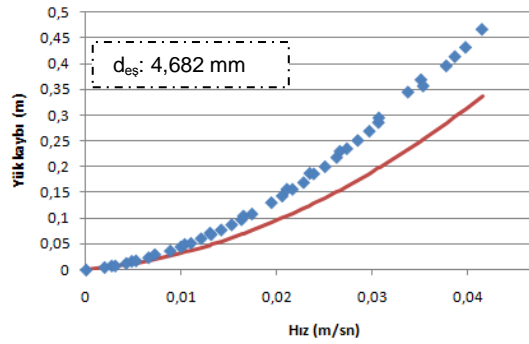
Şekil C.32 : Küp-2, 3 ($\epsilon: 0,38$)**
(T, °C: 27,9-28)



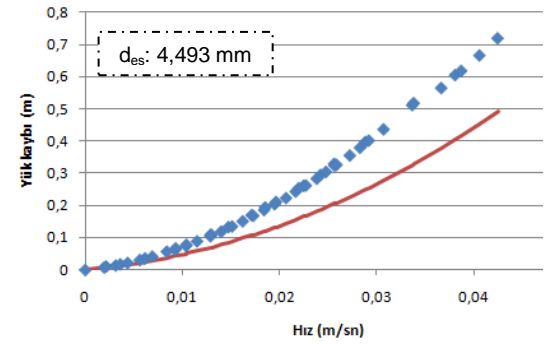
Şekil C.33: Tablet, 1 ($\epsilon: 0,39$)**
(T, °C: 26-26,1)



Şekil C.34 : Tablet, 2 ($\epsilon: 0,41$)**
(T, °C: 26-26,1)

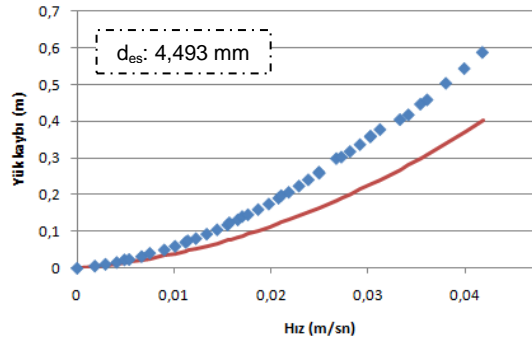


Şekil C.35 : Tablet, 3 ($\epsilon: 0,43$)**
(T, °C: 25,2-26,2)

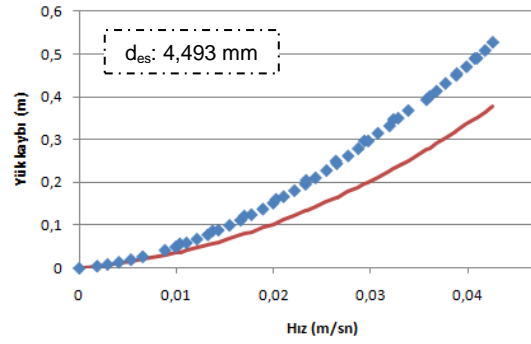


Şekil C.36: Silindir-1, 1 ($\epsilon: 0,39$)**
(T, °C: 27,9-28,2)

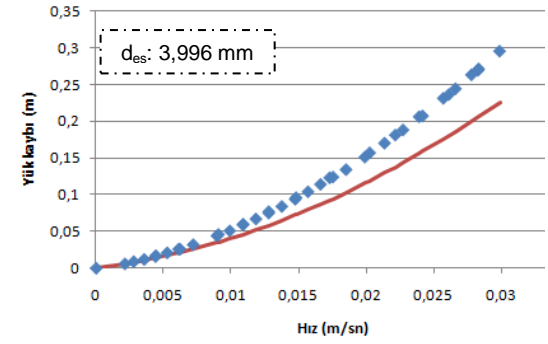
— : Ergun denklemi (1952a)
◆ : Data
** : 10,04 cm çaplı kolonda yapılan deney



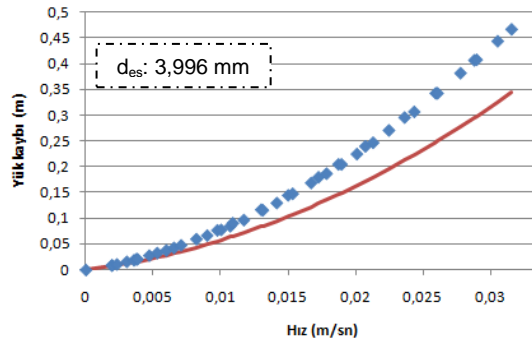
Şekil C.37: Silindir-1, 2 ($\epsilon: 0,41$)**
(T, °C: 25,1-26,1)



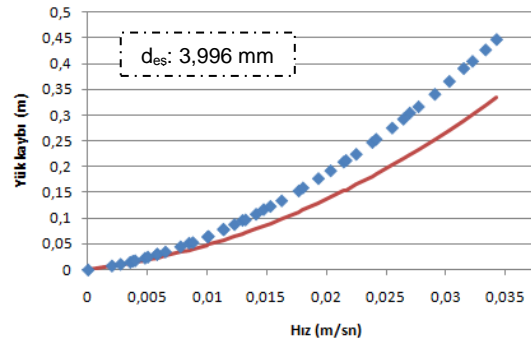
Şekil C.38: Silindir-1, 3 ($\epsilon: 0,42$)**
(T, °C: 25,1-26,1)



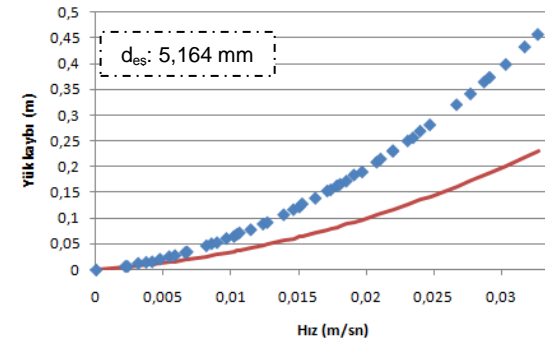
Şekil C.39: Silindir-2, 1 ($\epsilon: 0,43$)**
(T, °C: 26,1-26,5)



Şekil C.40: Silindir-2, 2 ($\epsilon: 0,39$)**
(T, °C: 25,5-26,6)

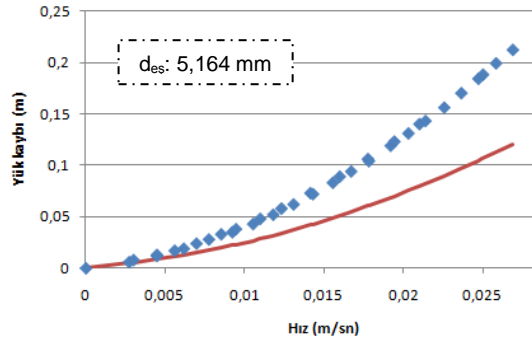


Şekil C.41: Silindir-2, 3 ($\epsilon: 0,41$)**
(T, °C: 25,7-26,2)

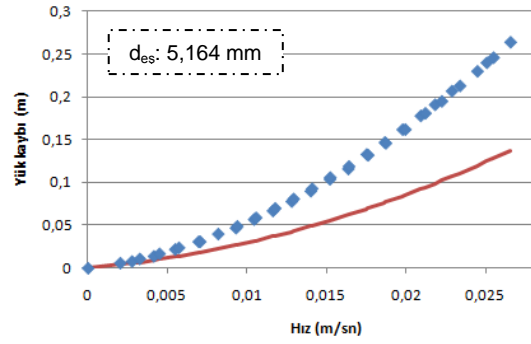


Şekil C.42: Dikd.prizması-1, 1 ($\epsilon: 0,41$)**
(T, °C: 25,5-25,8)

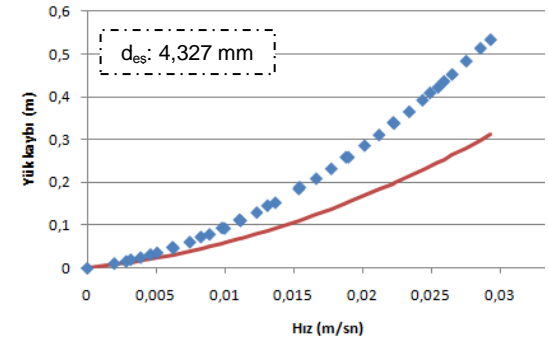
— : Ergun denklemi (1952a)
◆ : Data
** : 10,04 cm çaplı kolonda yapılan deney



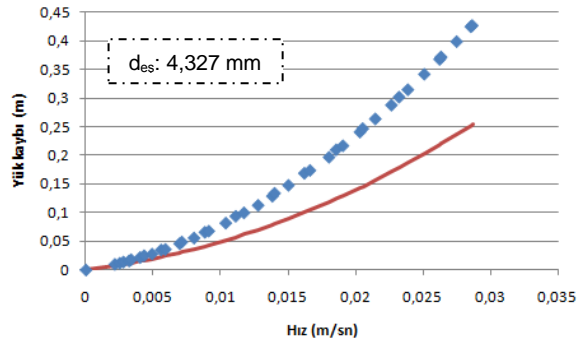
Şekil C.43: Dikd.prizması-1, 2 ($\epsilon: 0,46$)**
(T, °C: 24,3-24,5)



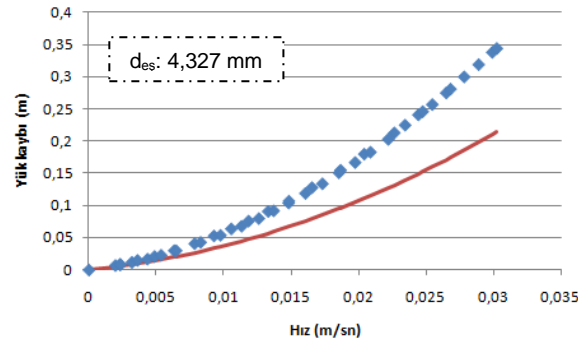
Şekil C.44: Dikd.prizması-1, 3 ($\epsilon: 0,44$)**
(T, °C: 22,7-23)



Şekil C.45: Dikd.prizması-2, 1 ($\epsilon: 0,39$)**
(T, °C: 26,3-26,8)



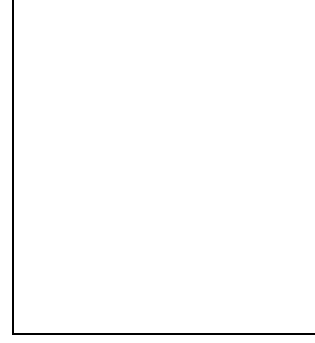
Şekil C.46: Dikd.prizması-2, 2 ($\epsilon: 0,41$)**
(T, °C: 26,9-27,3)



Şekil C.47: Dikd.prizması-2, 3 ($\epsilon: 0,45$)**
(T, °C: 27,2-27,7)

-
- : Ergun denklemi (1952a)
 - ◆ : Data
 - ** : 10,04 cm çaplı kolonda yapılan deney

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Esra ERDİM
Doğum Yeri ve Tarihi: İSTANBUL-1977
Adres: İTÜ İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü
Lisans Üniversitesi: İTÜ İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü