

2216

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ İNŞAAT FAKÜLTESİ

İÇME SUYU FİLTRASYONUNDA
GERİ YIKAMA HIZINA VE YATAK GENLEŞMESİNE
ETKİYEN FAKTÖRLERİN ARAŞTIRILMASI

İ.T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜNCE

"DOKTOR"

Ünvanının Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Yük.Müh. Atilla AKKOYUNLU

Tezin Fen Bilimleri Ens. Verildiği Tarih : 30 Haziran 1983

Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Eylül 1983

Doktorayı Yöneten Öğretim Üyesi : Prof.Dr. Yılmaz MUSLU

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. İstemi ÜNSAL

: Doç.Dr. Mehmet KARPUZCU

Şubat – 1984

V. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
SUMMARY	II
SEMBOLLER	VII

BÖLÜM I

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİNDE FİLTASYON

1.1. Giriş	1
1.2. Geri Yıkamada Yatak Genleşmesi İle İlgili Modeller	3
1.3. İncelenecek Problemin Tanıtılması	9

BÖLÜM II

TANE KAREKTERİSTİKLERİ

2.1. Eşdeğer Tane Çapının ve Çökelme Hızının Tesbiti ..	10
2.2. Filtre Malzemesine Ait Şekil Faktörünün Tayini ...	13

BÖLÜM III

GERİ YIKAMA HİDROLİĞİ

3.1. Geri Yıkama İle İlgili Temel Esaslar	20
3.2. Flüdize Olmuş Bir Yatağın Karakteristiklerini Belirten Bağıntılar	22
3.3. Geri Yıkama Hızını Poroziteye Bağlayan Bağıntısının En Genel İfadelerinin Çıkarılması	26

BÖLÜM IV

GERİ YIKAMA AKIMINA ETKİYEN FAKTÖRLERİN ARAŞTIRILMASI

4.1. Giriş	31
4.2. Çeşitli Yük Kaybı Formüllerine Göre Geri Yıkama Hızının Hesabı	32
4.3. Sonuçların Değerlendirilmesi	55

BÖLÜM V

YATAK GENLEŞMESİNİN HESABI İÇİN UYGUN BİR MATEMATİK MODELİN ARAŞTIRILMASI

5.1. Filtrelerde Genleşmenin Hesabı İçin Uygun Bağıntıların Çıkarılması	58
5.2. Geliştirilen Matematik Model Yardımıyla Boyut İtibariyle Dereceli Filtre Malzemesinde Yatak Genleşmesinin Hesabı	67
5.3. Yatak Genleşmesinin Hesabıyla İlgili Bilgisayar Programı	69

BÖLÜM VI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Giriş	70
6.2. Deney Teçhizatı ve Kullanılan Malzemeler	70
6.3. Yapılan Deneyler	71
6.4. Geri Yıkama İle İlgili Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	77

BÖLÜM VII

GELİŞTİRİLEN MODELİN DENEY SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

7.1. Giriş	79
7.2. Filtre Yatak Genleşmesinin Hesabı ve Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması	79

BÖLÜM VIII

SONUÇLAR	99
----------------	----

EKLER

REFERANSLAR

HAL TERCÜMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, içme suyu tekniğinde kullanılan filtrelerin geri yıkanması ile ilgili hız ifadeleri araştırılmış ve boyut itibariyle dereceli veya uniform filtre malzemesine uygulanabilen yatak genişlemesini veren matematik bir model geliştirilmiştir.

Birinci bölümde Çevre Mühendisliğinde filtrasyon olayına genel bir giriş yapılmış ve filtrelerin geri yıkanmasında meydana gelen yatak genişlemesine ait daha önce verilen ampirik, yarı teorik ve teorik modeller ele alınmıştır.

İkinci bölümde filtre malzemesine ait tane karakteristikleri incelenmiş, taneye ait eşdeğer çap ve benzeri büyüklüklerin tespiti için lüzumlu bağıntılar verilmiştir. Ayrıca tane biçiminin fonksiyonu olan şekil faktörünün ölçülmesi ile ilgili dolaylı ve dolaysız metodlar ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde flüdize olmuş bir yatağın karakteristiklerini belirten ifadeler ve geri yıkama hızını poroziteye bağlayan bağıntının en genel denklemleri verilmiştir.

Dördüncü bölümde filtrelerin geri yıkanması ile ilgili hız ifadeleri geliştirilmiş ve olaya etkiyen çeşitli parametreler belirlenmiştir. Bu hız denklemlerinden faydalanarak $V/K = F(\epsilon)$ şeklinde bir porozite fonksiyonu elde edilmiş, neticede çeşitli yatak genişleme katsayıları ortaya konmuştur.

Beşinci bölümde boyut itibariyle dereceli veya uniform olan filtrelerde yatak genişlemesinin hesabı için geliştirilen bir matematik model verilmiştir.

Altıncı bölümde yapılan deneyler anlatılmış, yedinci bölümde ise geliştirilen modelin deney sonuçları ile karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

Sekizinci bölümde bu çalışmada elde edilen neticeler özet halinde verilmiştir.

SUMMARY

In this study a new mathematical model has been investigated for the calculation of expanded bed height of the water filters at various back wash velocities. Although this model is basically for the graded filter media, it can also be used for the uniform sized filter media. Besides this research, different backwash velocity equations have been sought and by the help of these equations different n values, which represent the filter bed expansion coefficient, have been obtained.

In the first chapter a brief introduction about the filters used in potable water technology and the different expansion models developed by different researchers have been given

This brief introduction covers the function, the type and particle characteristics of the filters. Once the effluent turbidity becomes unacceptable or the total available head loss is used up, filters should be cleaned. In rapid filters this cleaning mechanism is done by applying water alone, air flow followed by water or air and water together. In this research backwashing by water alone was considered.

Some of the expansion models given in this chapter are for graded media and some of them are for uniform sized filter media. Table 1.1 represents some of these models in three categories as empirical, theoretical and semi theoretical with their Reynolds number applicability range.

In the second chapter the characteristics of filter media particle have been mentioned.

The calculation of (d_n) equivalent volume particle diameter, (d_h) hydraulically equivalent diameter and (V_s) discrete settling velocity of particle, (V_n) discrete settling velocity of equivalent volume sphere have been given. The calculation of above mentioned parameters are based on the relationship between drag coefficient and particle Reynolds number given

III

for spherical particles.

This chapter also covers different formulas given by different investigators about the description of the particle shape. Some researchers called it sphericity and some of them named it as shape factor.

The shape factor parameter concept was considered in this study since it is important in backwashing phenomenon. Generally speaking, the techniques for measuring shape can be divided into two groups, namely, direct methods and indirect methods. Direct methods require the individual measurements of particle dimensions. Indirect methods do not require this type measurement, rather they rely on some non-dimensional property of particle which is based on some statistical analysis of a set of particles.

In the investigation of expansion model which was developed in this study, above mentioned d_n , d_h , V_s , V_n parameters and one of the shape factor parameters (DSF) was used.

In the third chapter backwashing hydraulic was given. Head loss equation during fluidization phase was considered in this chapter since it was used later in obtaining filter bed expansion coefficients in the fourth chapter.

In the fourth chapter different backwash velocity equations have been developed as one of the objectives of this research. For this purpose, each of the different head loss equations of the filter bed, and constant head loss equation for the fluidized phase were solved simultaneously. Simultaneous solution of these two type equations resulted backwash velocity equations.

The physical and hydraulic parameters which affect backwashing event were analyzed in the scope of these equations.

Using these equations

$$V/K = F(\epsilon)$$

type porosity equations were developed for linear and nonlinear

flow. Once these V/K functions were plotted on a logarithmic scaled graph paper, expansion coefficient n values were obtained as the slope of the linear portion of the curve.

Some of these n values are the function of Re_s , particle Reynolds number which is the function of the discrete settling velocity of particle in an infinite medium. These n values were compared with the n values of Richardson and Zaki's, given in Table 1.1 since they are also the function of above mentioned Reynolds number.

In the fifth chapter a mathematical model was investigated for the expansion of graded filter media. For this purpose two different filter bed expansion coefficients were developed. One of these coefficients is the function of V_s/V_n and Re_s parameters. The other equation is the function of d_h/d_n and Re_s . These parameters were defined previously. To develop expansion coefficient, n , multiple linear regression method was used.

Once these expansion coefficients were available the calculation of expanded bed height of filter at a given backwash velocity was expressed step by step in an order. These steps cover the division of graded filter media into uniform sized layers, determination of some physical characteristics and V_s , V_n , d_h , d_n , DSF , Re_s , V_i (backwash velocity at porosity one) parameters and usage of the equations of expansion coefficients and the equations (1.7), (1.30), (5.17).

In the sixth chapter results of the experiments performed about backwashing of two filters have been given. One of these two filters consists of Iowa Muscatine sand, the other consists of Carbonite filter coal media. Both filter materials were graded and nonspherical.

Two groups of experiments were done. First group of experiments comprise the determination of physical characteristics of filter media such as sieve analysis, particle size determination in different ways, specific mass of particle, fixed bed porosity, particle settling velocity. The ASTM standard Test Method was used for sieve analysis. The specific mass of particle measurement was made by water displacement technique. Fixed bed porosity was measured by column technique.

The second group of experiments consist of backwashing of filters at different backwash velocities at a constant water temperature. During the bed expansions, filter heights and the behaviour of media was measured and observed.

The purpose of this second group experiments was to check the validity of the expansion model developed in this study.

The last part of this chapter covers the evaluation of the experimental results for both sand and coal material.

In the seventh chapter the calculations of filter bed heights at different backwash velocities, by using the model developed in this study, were performed and the results were tabulated. Since these calculations consume too much time a computer programme was written in fortran language to ease them.

Calculations indicated that Richardson and Zaki's $V/V_i = \epsilon^n$ equation should be limited within the range of $\epsilon < 0,9$ while applying it. This was supported by different investigators studies.

The results of the calculations were compared with the experimental results. The comparision was made in high and in practical expansion range.

By the help of these comparisions the mathematical model developed in this study was evaluated.

In the eighth chapter, a summary of the conclusions of this thesis have been presented. Some basic results are as follows:

- Filter bed expansion coefficient, n , developed based on Ergun's equation is the function of particle size.
- Two new filter bed expansion coefficients, n

$$n = n_{\text{spherical}} (d_h/d_n)^a$$

$$n = n_{\text{spherical}} (V_s/V_n)^{a'}$$

were developed with the

$$a = f \{Re_s, (d_h/d_n)\}$$

$$a' = F \{Re_s, (V_s/V_n)\}$$

exponents.

- Iowa Muscatine sand and Carbonite filter coal material were used as filter media in the laboratory during the experiments.

Each of these media were backwashed at different backwash velocities at a constant temperature.

- During the expansion of coal media, which is less dense than sand media, a diffused layer over the concentrate coal media was observed.

It was realized that if higher backwash velocities were used, than the velocities applied in this study, for the coal bed filter there might be media loss. To prevent this case it is suggested to use coal material with a low uniformity coefficient.

- The suggested expansion model gave good results when compared with experimental results, especially within the practical application range.

Appendixes contains computer programmes, graphs and tables.

VII

SEMBOLLER

A : N adet tanenin harekete dik bir düzlem üzerindeki izdüşümlerinin toplam alanı veya tek bir tanenin harekete dik doğrultudaki düzlem üzerindeki izdüşüm alanı $\{L^2\}$

A': Flüdizasyon kolonu en kesit alanı $\{L^2\}$

a : Geliştirilen filtre yatak genleşme katsayısı n de geçen (d_h/d_n) oranının üssü

a' : Geliştirilen filtre yatak genleşme katsayısı n de geçen (V_s/V_n) oranının üssü.

$\bar{a}$: Elipsoidin en uzun boyutu $\{L\}$

a_1 : Dinamik şekil faktörü hesabında geçen katsayı

A_1 : Porozitenin fonksiyonu cinsinden ifade edilen parametre

B_1 : Porozitenin fonksiyonu cinsinden ifade edilen parametre

B : Geri yıkama sayısı

b_1 : Dinamik şekil faktörü hesabında geçen bir katsayı

b : a ve a' ifadelerine ait regresyon katsayısı

$\bar{b}$: Elipsoidin orta boyutu $\{L\}$

C_1 : Al-Dibouni denklemine ait bir sabit

C : Kozeny sabiti

C_D : Direnç katsayısı

$\bar{C}$: 1 gr kütleinde olan malzemedeki tanelerin toplam hacmi $\{L^3\}$

VIII

C' : Tanelerin dizilişi ile ilgili bir katsayı

C'' : $6C'$

$\bar{c}$: Elipsoidin en kısa boyutu {L}

c : a ve a' ifadelerine ait regresyon katsayısı

d : Tane çapı {L}

d_{ort} : $1/\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}$ {L}

d_n : Hacimce eşdeğer tane çapı {L}

d_h : Hidrolikçe eşdeğer tane çapı {L}

d'_a : Kararlı denge halindeki bir tanenin yatay bir düzlem üzerindeki izdüşümüyle ortaya çıkan alana eşit alanlı bir dairenin çapı {L}

d_{cs} : Tanenin yatay düzlem üzerindeki izdüşüm alanının dış hatlarını çevreleyen en küçük dairenin çapı {L}

D : Flüdizasyon kolon çapı {L}

D_t : Kapiler boru çapı {L}

DSF: Dinamik şekil faktörü

d_{10} : Efektif çap {L}

d_a : Tane aritmetik ortalama çapı {L}

d_g : Tane geometrik ortalama çapı {L}

F_D : Bir taneye akışkanın uyguladığı direnç kuvveti $\{M\}\{L\}/\{T\}^2$

F_w : Bir tanenin ağırlığı $\{M\}\{L\}/\{T\}^2$

F_B : Bir taneye akışkanın uyguladığı kaldırma kuvveti $\{M\}\{L\}/\{T\}^2$

$(F_D)_n$: V_n çökelme hızına sahip bir taneye akışkanın uyguladığı direnç kuvveti $\{M\}\{L\}/\{T\}^2$

$F(\epsilon)$: Porozite fonksiyonu

$F_1(Re_s, \epsilon)$: Reynolds sayısının ve porozitenin fonksiyonu olan büyüklük

$F_2(Re_s)$: Reynolds sayısının fonksiyonu olan büyüklük

G_a : Galileo sayısı

g : Yerçekimi ivmesi $\{L\}/\{T\}^2$

i : Filtreyi meydana getiren tabakaların sayısı

i' : $32/K_t$

J : Hidrolik eğim

K_r : Hacimsel şekil faktörü

$K_s, \bar{K}$: Taneli ortamın sıvı geçirme kabiliyeti ile alakalı katsayılar $\{L^2T^2/M\}$, (Boyutsuz)

K : (V/K) porozite fonksiyonundaki sabit $\{L\}/\{T\}$

K_t : Kapiler boru çapı, D_t , ifadesi içindeki sabit

k_i : İdeal şekilde dağılmış küresel malzeme yığınlarına ait boyutsuz katsayı

k : $\omega'k_i$

l_o : Sabit haldeki filtre toplam yatak kalınlığı $\{L\}$

l : Genleşmiş haldeki filtre toplam yatak kalınlığı veya filtreyi meydana getiren tabakalardan birine ait genleşmiş tabaka kalınlığı $\{L\}$

l_{oi} : i 'nci tabakanın genleşmeden önceki kalınlığı $\{L\}$

m_1 : Porozitenin fonksiyonu olan parametre

m : Tanenin kütlesi $\{M\}$.

n : Filtre yatak genleşme katsayısı

N : Kütlesi 1 gr olan malzemede mevcut tane sayısı

Re' : V geri yıkama hızı cinsinden hesaplanan Reynolds sayısı

Re_s : Serbest çökelme hızı cinsinden hesaplanan tane Reynolds sayısı

Re_c : Camp'in değiştirilmiş Reynolds sayısı

Re_n : V_n hızı cinsinden hesaplanan tane Reynolds sayısı

r^2 : Determinasyon katsayısı

R : Hidrolik yarıçap $\{L\}$

Re : Hidrolikçe eşdeğer tane çapı cinsinden hesaplanan Reynolds sayısı

Re_1 : $\psi \rho V d / \mu$

t : Zaman $\{T\}$

U_R : $V / \epsilon V_s$

U : Kapiler boru içindeki hız (Boşluk hızı) $\{L\}/\{T\}$

u : Uniformluk katsayısı

V : Geri yıkama hızı $\{L\}/\{T\}$

V_s : Tek bir tanenin serbest çökelme hızı $\{L\}/\{T\}$

V_i : ϵ 'nin 1 olması halindeki geri yıkama hızı $\{L\}/\{T\}$

V_{mf} : Minimum flüidizasyon hızı $\{L\}/\{T\}$

V_n : d_n çaplı tanenin çökelme hızı $\{L\}/\{T\}$

V_t : Flüidizasyon kolonundaki toplam tane hacmi $\{L\}^3$

V_{ti} : Filtreyi meydana getiren i 'nci tabakadaki toplam tane hacmi $\{L\}^3$

W_i : i 'nci tabakanın ağırlığı $\{M\}$

x_i : d_i çapına haiz tanelerin ağırlık oranı

α : $\epsilon = 1$ için $F(\epsilon)$ 'nin değeri

ϵ : Porozite veya genleşmiş yatak porozitesi

ϵ_o : Sabit filtre yatak porozitesi

ϵ_{oi} : i'nci tabakanın genleşmeden önceki porozitesi

ϵ_i : i'nci tabakanın genleşmiş haldeki porozitesi

ρ_t : Tanenin özgül kütlesi $\{M\}/\{L\}^3$

ρ : Akışkanın özgül kütlesi $\{M\}/\{L\}^3$

ρ_{ti} : i'nci tabakayı teşkil eden malzemenin özgül kütlesi $\{M\}/\{L\}^3$

γ_t : Filtre malzemesinin özgül ağırlığı $\{M\}/\{L\}^2\{T\}^2$

γ : Akışkanın özgül ağırlığı $\{M\}/\{L\}^2\{T\}^2$

μ : Akışkanın dinamik viskozitesi $\{M\}/\{L\}\{T\}$

ϕ_ϵ : $\{1 - 1.21(1-\epsilon)^{2/3}\}^{-1}$

ϕ : $C_D Re_n^2$

Δh : Filtrede yük kaybı $\{L\}$

ψ : Küresellik

ψ_w : Wadell'in tanımladığı küresellik ifadesi

ψ_k : Krumbein'in tanımladığı küresellik ifadesi

ψ_h : Heywood'un tanımladığı şekil faktörü ifadesi

ψ' : Tane şekil faktörü

ψ_1 : Tane boyut dağılımı ile ilgili katsayı

$\bar{\psi}$: Reynolds sayısının, malzeme boyutunun ve şeklinin fonksiyonu olan sayı

XII

* : Tek bir tanenin hacmi $\{L\}^3$

∇ : Flüdizasyon kolonundaki toplam tane ve su hacmi $\{L\}^3$

σ : Beirne ve Hutcheon'un tanımladığı şekil faktörü ifadesi

ν : Kinematik viskozite $\{L\}^2/\{T\}$

ω : Malzemenin yerleşmesi ile ilgili katsayı

ω' : ω/ψ_1

λ : Sürtünme katsayısı



BÖLÜM I

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİNDE FİLTASYON

1.1. Giriş

Meskün bölgelere içme ve kullanma maksadıyla suyun getirilmesinde ve kullanıldıktan sonra kirli su olarak uzaklaştırılmasında, suyun tasfiyesi çevre sağlığı açısından önemli bir durum arz etmektedir. Bu sebeple su ve kullanılmış su tasfiyesinde filtrasyon konusu da üzerinde yoğun araştırmaların yapıldığı bir temel işlem olarak yerini almaktadır.

Filtrelerde su, ya tanelerin yüzeyleri üzerinde ince tabakalar meydana getirerek damlaya damlaya akar veya filtre tanelerinin arasındaki boşlukları tamamen doldurur. Tanelerin yüzeyleri üzerinden suyun damlaya damlaya akarak süzülmesi hali kullanılmış suların temizlenmesinde uygulanır. Bunlara en iyi örnek olarak, damlatmalı filtreler verilebilir. İkinci durum, yani suyun filtre boşluklarını tamamen doldurması hali ise, içme suyu filtrasyonunda görülmektedir. Ancak azot ve fosfor gidermek için uygulanan ileri tasfiye tekniklerinin gerekli olması halinde, kullanılmış su tasfiye tesislerinden gelen suların, filtre edilmesi de son zamanlarda önem kazanmıştır(1).

Suların tasfiyesinde filtrasyon, yüzeysel sularda mevcut olan süspansiyon halindeki maddeleri, kireçle yumuşatılmış sulardaki çökeltileri, kuyu sularının tasfiyesiyle ortaya çıkan demir ve mangan parçacıklarını uzaklaştırmakta kullanılır. İçme suyu filtrasyon tekniğinde bir ön tasfiyeden geçmiş sular filtre edilebileceği gibi, tabii göl ve rezervuarların nispeten temiz özellikteki suları da doğrudan doğruya filtre edilebilir. Kullanılmış suların tasfiyesinde filtrasyon, ikinci çökeltilme havuzunda çökelmeyen biyolojik yumakları, kimyasal olarak fosfatın çöktürülmesinde ortaya çıkan

süspansiyon maddeleri, kullanılmış suların fiziko-kimyasal veya ileri derecedeki tasfiyelerinde kimyasal koagülasyondan sonra suda kalan asılı haldeki maddeleri uzaklaştırmada tatbik edilir.

İçme suyu filtrasyon tekniğinde, cazibe ile çalışan filtreler, suları yavaş ve hızlı süzen olmak üzere iki gruba ayrılır. Yavaş süzen filtrelerde filtre hızı 0.1 m/st ile 0.3 m/st arasında, etkili dane çapı 0.25 mm ile 0.35 mm arasında ve üniformluk katsayısı 2.0 ile 3.0 arasında değişir(1),(2). Hızlı süzen filtrelerde ise filtre hızı 2.45 m/st ile 9.80 m/st arasında olup, etkili tane çapı 0.45 mm ve daha büyük ve üniformluk katsayısı 1.5 veya daha azdır. Yavaş süzen filtreler ilk defa 19 ncü yüzyılın ortalarında İngiltere'de geliştirilmiş ve iyi neticeler alınmıştır, bu filtreler A.B.D. deki yüzeysel sular için olumlu sonuç vermediğinden 19 cu yüzyılın sonunda yüksek hızlarda çalışan filtreler geliştirilmiştir. Kullanılmış suların tasfiyesinde ise biyolojik yumakların parçalanmaması için 4.90 m/st ile 19.50 m/st arasında değişen filtre hızları uygulanmaktadır.

Filtrasyonda çıkış suyunun kalitesi kabul edilmez bir değere ulaşınca veya mevcut hidrolik yükün tamamı filtrasyon işlemi süresinde kullanılıncaya filtreler temizlenmelidir. Suları yavaş süzen filtrelerde, askıdaki maddelerin tutulması en üstte birkaç santimetre kalınlığında bir filtre tabakasında olur. Bu tabakaya Schmutzdecke (= kirli örtü) denir(3),(12). Bu filtrelerin temizlenmesi bu tabakanın kazınması suretiyle olur, alınan kum yıkandıktan sonra filtre üzerine konmak üzere saklanır. Seri filtrelerde ve kullanılmış su filtrelerinde yabancı maddeler filtre malzemesinin bütün tabakalarında tutulduğundan, bu tip filtreler geri yıkama suretiyle temizlenirler. Geri yıkama işlemi sadece su ile, veya önce hava ile gevşetildikten sonra su verilmesi, veya aynı anda hava ve su ile yıkanması suretiyle olur(2),(4),(5). Bu esnada yatak akışkan hale geçer. Temizlenmiş filtre yatağı eski haline nazaran bir miktarda genleşmiş olur.

1.2. Geri Yıkamada Yatak Genleşmesi İle İlgili Modeller

Filtrelerin geri yıkaması ile ilgili modeller, filtre malzemesinin karakteristiklerine ve filtrenin teşkil şekline bağlıdır. Bu konuda yapılan çalışmalar, teorik, yarı teorik ve amprik modeller olmak üzere sınıflandırılacak ve herbirinden örnekler sunulacaktır. Literatürde mevcut modellerin en tanınmış olanları Tablo 1.1 de geçerli oldukları Reynolds sayısı aralığı ile birlikte verilmiştir. Bu tabloda verilen bağıntılardaki terimler aşağıda tanımlanmıştır.

V = Geri yıkama hızı

V_s = Tek bir tanenin serbest çökme hızı

ϵ = Porozite

V_i = ϵ 'nin 1 olması halindeki geri yıkama hızı (ϵ ile V arasında çizilen grafikten okunur).

n = Yatak genleşme katsayısı

$$G_a = \frac{d^3 \rho (\rho_t - \rho) g}{\mu^2} = \text{Galileo sayısı}$$

d = Tane çapı

ρ_t, ρ = Sırasıyla tane ve sıvının özgül kütlesi

g = Yerçekimi ivmesi

μ = Dinamik viskozite

$$Re_i = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (\text{Geri yıkama hızı cinsinden hesaplanan Reynolds sayısı})$$

$$Re_s = \frac{\rho V_s d}{\mu} \quad (\text{Serbest çökme hızı cinsinden hesaplanan Reynolds sayısı})$$

$$\phi_\epsilon = \{1 - 1.21 (1 - \epsilon)^{2/3}\}^{-1}$$

Tablo 1.1. Filtrasyonun Genişletilmesi ile İlgili Modeller (Denklemlerde Geçen Sembollerin Tanımları için sayfa 3 ve 5'e bakınız.).

Yazarın Adı	Denklemler	Geçerli olduğu Reynolds sayıları Aralığı	Denklemin Tipi
Atwood	$\frac{V}{V_0} = e^{-4.65}$ (1.1)	1.1 < Re _g < 26	Ampirik
Levenspiel ve Bauer (1969) (36)	$\frac{V}{V_0} = e^{-5.60}$ (1.2)	0.001 < Re _g < 0.4	
Jostand (1952) (15)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.3)	0.2 < Re _g < 500	
Levenspiel ve Bowerman (1952) (8)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.3)	0.2 < Re _g < 500	
Richardson ve Zaki (1954) (6)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	
Hen ve Yu (1966) (7)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	Ampirik
Hen ve Fan (1974) (43)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	
John Garstide ve Mann K. Al Dibouni (1977) (18)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	
Cleasby ve Fan (1980) (9)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	
Steinour (1944) (37)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	
Haskalov (1951) (39)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	Yarı Teorik
Loeffler ve Ruch (1959) (40)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	
Oliver (1961) (41)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	
Letan (1974) (42)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	
Brinkman (1947) (38)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	
Happel (1958) (14)	$\frac{V}{V_0} = e^{-n}$ (1.7)	0.2 < Re _g < 500	Teorik

$$U_R = \frac{V}{\epsilon V_s}$$

A_1, B_1, m_1 = Porozitenin fonksiyonu cinsinden ifade edilen parametreler olup, Al Dibouni denkleminde geçmektedir.

C_1 = Al Dibouni denkleminde geçen bir sabit.

Tablo 1.1 den görüleceği üzere yatak genleşmesinin tahmini için teklif edilen pek çok model mevcuttur. Bunların büyük bir kısmı sınırlı bir Reynolds sayısı aralığında geçerlidir. Bununla beraber bütün akım bölgelerini içine alan denklemler de vardır. Bunlar arasında tatbikatı bakımından en kolay olanları, geri yıkama hızına bağlı olan ve porozitenin üslü fonksiyon olduğu modellerdir. Lewis, Gilliland ve Bauer yatak genleşmesi ile ilgili deney neticelerini, porozitenin üslü fonksiyonu şeklinde ifade etmeye çalışan ilk araştırmacılar arasında bulunmaktadır.

Hawksley ve Happel'in modelleri de yarı teorik ve teorik olarak geliştirilmiş iki dikkate değer denklem ihtiva etmektedir. Bu araştırmacılarından Happel, Tablo 1.1 deki modelini, atalet terimlerini içine almayan Navier Stokes hareket denklemlerini kullanmak suretiyle elde etmiştir.

Oldukça büyük bir Reynolds sayısı aralığında tatbikatı olan önemli denklemlerden biri de Wen ve Yu'ya aittir. Bu denklemin elde edilişinde flüidize haldeki her bir küresel taneye etkiyen kuvvetlerin dinamik dengesi prensibinden hareket edilmiştir. Wen ve Yu, Schiller ve Naumann(30)'ın $0.001 < Re' = \rho V d / \mu < 1000$ gibi geniş bir aralık için vermiş oldukları, sonsuz seyreltik bir sıvıda, akışkanın tek bir taneye uyguladığı

$$F_D = \pi d^2 \rho V^2 (3Re'^{-1} + 0.45 Re'^{-0.313}) \quad (1.24)$$

direnç kuvveti ifadesini ve literatürde mevcut olan ve kendi yaptıkları deneylerin neticesini kullanarak Tablo 1.1 de verilen

$$\epsilon^{4.7} Ga = 18 Re' + 2.70 Re'^{1.687} \quad (1.13)$$

bağıntısını elde etmişlerdir. Bu denklemi kullanarak yatak

genleşmesini bulmak için, sadece filtre malzemesi, sıvının fiziksel karakteristikleri ve geri yıkama hızı gereklidir. Tablo 1.1 deki pek çok denklemdeki gibi V_s serbest çökelme hızına ihtiyaç yoktur. Bu bakımdan pratik maksatlar için hesap kolaylığı temin eden ideal bir ifadedir.

1979 da Gunasingham ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarda Wen ve Yu gibi Ga Galileo sayısından istifade etmişlerdir(46).

John Garside ve Al Dibouni'nin vermiş olduğu,

$$\frac{U_R - A_1}{B_1 - U_R} = C_1 Re_s^{m_1} \quad (1.15)$$

denklem, Tablo 1.1 de verilen diğer denklemlerden farklı karakterde olup bu tip bağıntılara lojistik veya büyüme eğrisi denklemi denilmektedir. Bu araştırmacılar yatak genleşme karakteristiklerini en doğru şekilde bu denklemin ifade ettiği kanaatinde idirler. A_1, B_1 ve m_1 porozitenin fonksiyonu olup, C_1 bir sabiti göstermektedir.

Richardson ve Zaki'nin vermiş oldukları,

$$\frac{V}{V_i} = \epsilon^n \quad (1.7)$$

bağıntısının üstün tarafı, Tablo 1.1 den de görüleceği üzere değişik Reynolds sayılarında geçerli olmasıdır. Buna mukabil, flüidizasyonda porozitenin 0.9 dan büyük olan değerlerinin, bu denklemle iyi bir şekilde temsil edilemeyeceği ifade edilmiştir(18).

Tablo 1.1 de verilenlerin dışında 1948 de Wilhelm ve Kwauk(16) ve 1970 de Carvalho(13)'nun çalışmaları da eski ve oldukça yeni çalışmalara örnek olarak verilebilir.

Özel olarak çeşitli çapta tane ihtiva eden derecelenmiş filtreler üzerinde de çalışılmıştır. Aşağıda bunlara ait bazı örnekler verilecektir. Bu grupta gene aynı yoğunluklu tanelerden meydana gelen filtreler ele alınmıştır. Ancak filtrede her büyüklükte tane bulunmaktadır. Geri yıkamadan sonra bu tip filtreler irileri en altta inceleri üstte olmak üzere dereceli olarak sıralanırlar.

Leva (1948, 1948, 1959) flüidizasyon kolonu kesitinden birim zamanda geçen sıvı kütlesini esas alarak ve,

$$d_{ort} = \frac{1}{\frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}} \quad (1.25)$$

bağıntısını kullanarak aynı yoğunluk ve farklı boyuta haiz filtrelerde genleşme hesabı üzerinde çalışmışlardır(33),(32), (31). Burada x_i , d_i çapına haiz tanelerin ağırlık oranını, i de değişik çaptaki tabakaların sayısını göstermektedir.

1964 de Camp, sabit yatak içindeki akıma ait ve laminer bölge için geçerli olan Kozeny denklemi,

$$\frac{\Delta h}{l_o} = \frac{C\mu}{g\rho} \frac{(1-\epsilon_o)^2}{\epsilon_o^3} \left\{ \frac{6}{\psi_d} \right\}^2 v \quad (1.26)$$

ile, flüidize haldeki yatağa ait sabit Δp basınç kaybını veren

$$\Delta p = \Delta h \rho g = 1(\rho_t - \rho)(1-\epsilon)g \quad (1.27)$$

bağıntısından ve Darcy-Weisbach formülünün değiştirilmiş bir şeklini müşterek olarak kullanmak suretiyle B geri yıkama sayısı adını verdiği

$$B = \frac{\mu^2}{g(\rho_t - \rho)\rho d^3} = \frac{2\epsilon^2}{\lambda Re_c^2 \sqrt{\epsilon(1-\epsilon)}} \quad (1.28)$$

bir büyüklükten hareket etmiştir(17). (1.26), (1.27) ve (1.28) bağıntılarında Δh yük kaybını, l_o sabit haldeki filtre yatak kalınlığını, l genleşmiş filtre yatak kalınlığını, C kozeny sabitini, λ Darcy-Weisbach sürtünme katsayısını,

$$Re_c = \frac{V d \rho}{\mu \sqrt{\epsilon(1-\epsilon)}}$$

Camp'in değiştirilmiş Reynolds sayısını ve ψ küreselliği(=Eşdeğer hacimli kürenin yüzey alanının tanenin gerçek yüzey ala-

nına oranı) göstermektedir. Değişik poroziteler için $\log Re_c$ ve $\log B$ arasında çizilen eğri ailesinden yararlanmak suretiyle herhangi bir V geri yıkama hızındaki, ϵ porozite bulunmakta ve diğer tabakalar için de aynı işlem tekrarlanarak,

$$1 = \sum_{i=1}^n l_{oi} \frac{(1-\epsilon_{oi})}{(1-\epsilon_i)} \quad (1.29)$$

bağıntısıyla 1 toplam genleşmiş filtre kalınlığı elde edilmektedir. Burada,

l_{oi}, ϵ_{oi} : Sırasıyla i 'nci tabakanın genleşmeden önceki kalınlık ve porozitesi.

ϵ_i : i 'nci tabakanın genleşmiş haldeki porozitesi.

(1.29) denkleminin uygulanabilmesi için her bir tabakanın sabit yatak durumundaki kalınlığının ve porozitesinin bilinmesi gerekir. Bu denklem, yataktaki genleşmeden önce ve sonraki tane hacimlerinin aynı kalacağını ifade eden,

$$l_o (1-\epsilon_o) = l(1-\epsilon) \quad (1.30)$$

bağıntısından yararlanarak elde edilmiştir.

Camp, bu metodun kömürden müteşekkil bir yatağa tatbik edilmemesini tavsiye etmekte ve λ sürtünme katsayısında meydana gelebilecek değişimleri buna sebep olarak göstermektedir.

1968 de Fair, Geyer ve Okun, tabakalı bir yatağın genleşmesini tesbit için, bir matematik modelden çok, mevcut bağıntıların ilgi çekici bir uygulaması olarak mütalea edilebilecek bir metod geliştirmişlerdir(34).

Yatağı teşkil eden tabakalardan herbirinin belli bir V geri yıkama hızındaki porozitesinin ne olacağını tahmin için sabit yatak içindeki akıma ait ve laminar bölge için geçerli olan (1.26) numaralı Kozeny denklemi ile, flüdize haldeki yatağa ait sabit yük kaybını veren (1.27) bağıntılarının müsterek çözümüyle,

$$\frac{\epsilon_i^3}{(1-\epsilon_i)} = \frac{C}{g} \frac{\mu}{(\rho_t - \rho)} \left\{ \frac{6}{\psi d_i} \right\}^2 V \quad (1.31)$$

sonucuna varmışlardır. Burada d_i , i 'nci tabakaya ait çapdır. Bu denklem herhangi bir V geri yıkama hızında i 'nci tabakanın porozitesini vermektedir. Bütün yatağın genleşmesi halindeki toplam yatak yüksekliği (1.29) bağıntısından bulunur. Daha öncede belirtildiği üzere (1.29) bağıntısı için her bir tabakanın sabit yatak durumundaki kalınlığının ve porozitesinin bilinmesi gerekir.

Bilindiği üzere Kozeny denklemi sabit yatak ve laminar akım şartları için geliştirilmiştir. Bu sebeple yukarıda Fair, Geyer ve Okun tarafından verilen metod, sabit yatağa ait laminar akım şartının, yatak flüdize olduğunda da hakim olduğu kabulüne dayanmaktadır. Ancak normal geri yıkama şartlarında akımın geçiş bölgesinde olacağı hakikatini de belirtmektedirler.

1.3. İncelenecek Problemin Tanıtılması

Proje mühendisi, filtrelerin geri yıkanması ile ilgili olarak, flüdize yatakdaki basınç kaybı, filtre yatağının genleşmeğe başlayacağı hız ve değişik geri yıkama hızlarındaki genleşme miktarını bilmek zorundadır(1),(5). Bu sebeple bu tezde değişik geri yıkama hızlarındaki genleşmenin ne olacağı konusu, ele alınarak aşağıdaki hususlar araştırılacaktır:

1) Yukardan aşağıya doğru dereceli olarak tabakalanmış farklı boyutta ve aynı yoğunluğa sahip, malzemeden müteşekkil filtreler esas alınarak çeşitli geri yıkama hızlarına tekabül eden genleşmenin tahmini ile ilgili bir matematik model geliştirilecektir. Modele ait denklemlerin vereceği sonuçlar, kum ve kömür gibi değişik iki malzemeye ait deney neticeleri ile karşılaştırılarak, modelin geçerliliği tahkik edilecektir.

2) İçme suyu filtrelerinde yatak içindeki akıma ait değişik yük kaybı ifadeleri ile flüdize (= akışkan) yatağa ait enerji kaybı denkleminde yararlanarak geri yıkama ile ilgili hız ifadeleri çıkarılacak ve olaya etkiyen fiziksel ve hidrolik faktörler açıklanacaktır.

3) Elde edilen hız ifadelerinden yararlanmak suretiyle $F(\epsilon)$ tarzında porozite fonksiyonu geliştirilerek n filtre yatak genleşme katsayıları ortaya çıkarılacak ve bunlar literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

BÖLÜM II

TANE KARAKTERİSTİKLERİ

2.1. Eşdeğer Tane Çapının ve Çökelme Hızının Tesbiti

Durgun suda çökelmekte olan bir taneye etkiyen F_D direnç kuvveti, tanenin F_W ağırlığı ve sıvının F_B kaldırma kuvveti arasında Newton'un ikinci kanununa göre aşağıdaki bağıntı yazılabilir:

$$\frac{m d\bar{v}}{dt} = F_W - F_B - F_D \quad (2.1)$$

Burada,

m : Tanenin kütlesi
 $\bar{v}$: Tanenin çökelme hızı
 t : Zaman

Belli bir zaman sonra hareketi meydana getiren bileşke kuvvet, dolayısıyla $d\bar{v}/dt = 0$ olur. Bu andan itibaren ivmesiz, sabit hızlı bir hareket söz konusu olacaktır. Sabit hız, Kısım 1.2 de bahsi geçen V_s serbest çökelme hızını gösterir. Bu hal için (2.1) ifadesi

$$F_W - F_B = F_D \quad (2.2)$$

şeklini alır. Yukardaki bağıntı küresel bir tane için yazılırsa,

$$\frac{\pi}{6} d^3 \rho_t g - \frac{\pi}{6} d^3 \rho_g = \frac{1}{2} C_D \frac{\pi d^2}{4} \rho v_s^2 \quad (2.3)$$

elde edilir (24),(25). Burada C_D direnç katsayısını gösterir. (2.3) bağıntısından direnç katsayısı çekilirse,

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{dg(\rho_t - \rho)}{\rho V_s^2} \quad (2.4)$$

bulunur.

Literatürde küresel taneler için C_D direnç katsayısı ve bunun $C_D Re^2$, C_D/Re şeklindeki fonksiyonları ile Re , Reynolds sayısı arasındaki münasebeti veren teorik ve deneysel pekçok araştırma mevcuttur. Referans (19) dan alınan bu değerler Tablo 2.1 de verilmiştir.

Herhangi bir biçimdeki tane ile ilgili matematik işlemlerde başlıca iki tip eşdeğer çap kullanılmaktadır. Birinci tarifte, aynı hacme sahip kürenin çapı eşdeğer tane çapı olarak kabul edilir. Bu tane çapı d_n ve çökelme hızı V_n sembolüyle gösterilecektir. İkinci tarifte aynı çökelme hızına sahip kürenin çapı, hidrolikçe eşdeğer tane çapı olarak kabul edilir. Bu tane çapı d_h ve çökelme hızı V_s ile gösterilecektir. d_h ve V_n değerleri, yukardaki bağıntılar ve Tablo 2.1 yardımıyla bulunabilir. Bunun için tanenin hacmine eşit hacimli bir küre vasıtasıyla önce $d=d_n$ eşdeğer çapı bulunur ve kullanılan akışkanın özelliklerine bağlı olarak ρ ve μ nün tesbitinden sonra (2.4) bağıntısı ve $Re_n = V_n d_n \rho / \mu$ yardımıyla,

$$\Phi = C_D Re_n^2 = \frac{4}{3} \frac{d_n^3 g \rho (\rho_t - \rho)}{\mu^2} \quad (2.5)$$

hesaplanır. Tablo 2.1 den bu Φ ye karşılık gelen Re_n okunur ve bu Reynolds sayısından,

$$V_n = \frac{Re_n \mu}{d_n \rho} \quad (2.6)$$

elde edilir.

Hidrolikçe eşdeğer tane çapının tespitinde, çökelme hızı bilindiğinden (2.4) bağıntısındaki çap ifadesini ortadan kaldıracak bir düzenlemeye gitmek gerekir. Bunun için C_D/Re bağıntısı teşkil edilir:

Tablo 2.1. Küresel Taneler İçin Direnç Katsayısı ve İlgili Fonksiyonları(19).

Re	C_D	$C_D Re^2$	C_D/Re
0.1	240	2.4	2400
0.2	120	4.8	600
0.3	80	7.2	267
0.5	49.5	12.4	99.0
0.7	36.5	17.9	52.1
1.0	26.5	26.5	26.5
2.0	14.6	58.4	7.3
3.0	10.4	93.7	3.47
5.0	6.9	173	1.38
7.0	5.3	260	0.757
10	4.1	410	0.410
20	2.55	1.02×10^3	0.1275
30	2.00	1.80	0.0667
50	1.50	3.75	0.0300
70	1.27	6.23	0.0181
100	1.07	1.07×10^4	0.0107
200	0.77	3.08	3.85×10^{-3}
300	0.65	5.85	2.17
500	0.55	1.38×10^5	1.10
700	0.50	2.45	7.14×10^{-4}
1.000	0.46	4.60	4.60
2.000	0.42	1.68×10^6	2.10
3.000	0.40	3.60	1.333
5.000	0.385	9.60	7.70×10^{-5}
7.000	0.390	1.91×10^7	5.57
10.000	0.405	4.05	4.05
20.000	0.45	1.80×10^8	2.25
30.000	0.47	4.26	1.57
50.000	0.49	1.23×10^9	9.80×10^{-6}
70.000	0.50	2.45	7.14
100.000	0.48	4.8	4.80
200.000	0.42	1.68×10^{10}	2.10
300.000	0.20	1.80	6.67×10^{-7}
400.000	0.084	1.34	2.10
600.000	0.10	3.60	1.667
1.000.000	0.13	1.30×10^{11}	1.300
3.000.000	0.20	1.80×10^{12}	6.67×10^{-8}

$$\frac{C_D}{Re} = \frac{4g(\rho_t - \rho)\mu}{3\rho^2 v_s^3} \quad (2.7)$$

(2.7) bağıntısındaki bütün değerler bilindiğinden (C_D/Re) hesaplanarak Tablo 2.1 de bu değere karşı gelen Reynolds sayısı okunur ve hidrolikçe eşdeğer çap,

$$d_h = \frac{Re\mu}{V_s\rho} \quad (2.8)$$

şeklinde bulunur.

2.2. Filtre Malzemesine Ait Şekil Faktörünün Tayini

Filtrelerin geri yıkanmasında tanenin şekli önemli bir hususdur. Geri yıkama sırasında yatak içindeki tanenin davranışında ve yük kaybının hesabında bu durum gözönüne alınmaktadır. Küresel olmayan tanelerin genleşmedeki davranışı küresel tanelerden farklıdır(9). Literatürde filtrelerle ilgili fiziksel ve hidrolik olaylarda tanenin biçiminin etkisi, çeşitli şekillerde tarif edilen bir faktörün fonksiyonu olarak açıklanmak istenmiştir. Bu parametreye şekil faktörü veya küresellik adı verilmektedir. Şekil faktörü dolaylı ve dolaysız olmak üzere iki ayrı yoldan tanenin biçimini tarif eder. Dolaysız metodlarda, tanenin bizzat boyutları ve şekli ile ilgili büyüklükler ölçülmektedir. Diğer ise, taneye ait bir kısım özelliklere dayanarak şekli endirekt olarak ifade eden bir yoldur. Bunlar tanenin şekli ile değişen ve bir seri istatistik analiz sonuçlarına göre ifade edilen değerlerdir. Bir fikir vermek için literatürde teklif edilmiş olan bazı ölçme metodları aşağıda ele alınacaktır.

2.2.1. Dolaysız Metod

a) Wadell(26) küreselliğin tesbiti için aşağıdaki ifadeyi vermiştir.

$$\psi_w = \frac{d'_a}{d_{cs}} \quad (2.9)$$

Burada,

d'_a : Kararlı denge halindeki bir tanenin yatay bir düzlem üzerindeki izdüşümüyle ortaya çıkan alana eşit alanlı bir dairenin çapı.

d_{cs} : Taneinin yatay düzlem üzerindeki izdüşüm alanının dış hatlarını çevreleyen en küçük dairenin çapı.

b) Krumbein(27)'a göre küresellik,

$$\psi_k = 3 \sqrt{\frac{\text{Tanenin hacmi}}{\text{Taneyi içine alan kürenin hacmi}}} \quad (2.10)$$

bağıntısıyla belirtilmiştir. Meselâ üç eksenli elipsoidal bir tane için küresellik,

$$\text{Elipsoidin hacmi} = \left(\frac{\pi}{6}\right) \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}$$

$\bar{a}$: Elipsoidin en uzun boyutu

$\bar{b}$: Orta boyutu

$\bar{c}$: En kısa boyutu

$$\text{Taneyi içine alan küre hacmi} = \left(\frac{\pi}{6}\right) \bar{a}^3$$

$$\psi_k = \frac{\{(\pi/6) \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}\}^{1/3}}{\left(\frac{\pi}{6} \bar{a}^3\right)^{1/3}} = 3 \sqrt{\frac{\bar{b} \cdot \bar{c}}{\bar{a}^2}}$$

olur.

c) Heywood(28) şekil faktörünü

$$\psi_h = \frac{\star}{d'_a} \quad (2.11)$$

olarak vermektedir. Burada,

ψ_h : Şekil faktörü

v : Tek bir tanenin hacmi

d) Bilhassa filtrelerde hidrolik yük kaybını veren bazı bağıntılarda geçen özgül yüzeyi ifade ederken kullanılan bir diğer küresellik ifadesi de, daha önce Bölüm I'de verilen,

$$\psi = \frac{\text{Eşdeğer hacimli kürenin yüzey alanı}}{\text{Tane gerçek yüzey alanı}} \quad (2.12)$$

ifadesidir.

Geometrisi bilinen bir tane için ψ kolayca hesap edilebilir. Eğer geometrisi bilinmiyorsa, bu taktirde üniform malzemeli filtredeki $\Delta h/l$ hidrolik eğimini tesbit suretiyle dolaylı yoldan deneysel olarak bulunabilir. Bu halde tatbik edilen işlem dolaylı metodlar sınıfına sokulabilir.

2.2.2. Dolaylı Metod

Çeşitli araştırmacılar şekil faktörünü endirekt olarak ifade etmişlerdir. Aşağıda bunlardan bazı örnekler verilecektir.

a) Beirne ve Hutcheon(29) σ sembolü ile gösterdikleri şekil faktörünü

$$\sigma = \frac{(6\bar{C}/\pi N)^{1/3}}{(4A/\pi N)^{1/2}} = \frac{1.1\bar{C}^{1/3}N^{1/6}}{A^{1/2}} \quad (2.13)$$

ifadesi ile tariflemişlerdir. Burada,

N : Kütlesi 1 gram olan malzemede mevcut tane sayısı

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right)d_a'^2 N \quad (2.14)$$

$$\bar{C} = \left(\frac{\pi}{6}\right)d_n^3 N \quad (2.15)$$

(2.15) bağıntısında $\bar{C}$ ifadesi 1 gr kütleinde olan malzemede-ki tanelerin toplam hacmini gösterir. d'_a daha önce (2.9) bağıntısı ile ilgili olarak tariflenmiştir. d'_a nın bulunması için, birbiri üzerine girişim yapmadan serbestçe çökelen N adet tanenin harekete dik bir düzlem üzerindeki izdüşümlerinin toplam A alanını düşünmek gerekir. Bu alan, serbest çökme teorisi ve buna ait serbest çökme deneyinde bahsi geçen alandan ibarettir.

b) Briggs, McCulloch ve Moser(10)'e göre şekil faktörünü tane geometrisinden ziyade hidrodinamik karakteristikler cinsinden ifade etmek daha uygundur. Çünkü tanenin hidrolik karakteristikleri malzemenin şeklinden etkilenmektedir. Bu maksatla taneye etkiyen direnç kuvvetini veren bağıntı kullanılmıştır. Bilindiği üzere bu bağıntı lineer akım bölgesinde,

$$F_D = 3\pi\mu d V_s = 3\pi\mu \sqrt{\frac{4A}{\pi}} V_s \quad (2.16)$$

ve daha genel olarak bütün bölgede

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho V_s^2 \quad (2.17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada A tanenin, akıma dik doğrultudaki izdüşüm alanıdır. Briggs ve arkadaşları bu direnç kuvvetinin bağlı olduğu değişkenlerin etkilerini herhangi bir biçimdeki tane ile, buna eşdeğer hacimli küresel bir tane için ayrı ayrı birbiriyle mukayese etmektedirler. Bu araştırmacılara göre tanenin biçimi, direnç kuvvetine yansımaktadır. Aynı biçim ve hacimde iki tanenin direnç kuvvetleri aynı olmalıdır. Meselâ hacimleri aynı, fakat biri küre şeklinde olan iki taneye etkiyen direnç kuvvetleri birbirinden farklıdır. Briggs ve arkadaşları şekil faktörünü, direnç kuvvetleri arasındaki oranla ifade etmişlerdir. Bu oran 1'e ne kadar yakınsa tane küreselliği o derece yakın demektir. Bu araştırmacılar tanenin harekete dik doğrultudaki A alanını, eşdeğer hacimli kürenin merkezin-den geçen bir düzlemle kesilmiş alanına eşit olmaktadır.

$$A = \frac{\pi d_n^2}{4} \quad (2.18)$$

Buna göre bu kürenin serbest çökme hızı V_n ile gösterilirse,

direnç kuvvetleri arasındaki oran, tane biçimini karakterize eden bir parametre olarak kabul edilebilir. Buna dinamik şekil faktörü (=DSF) adı verilmiştir. Literatürde pek kullanılmamakla beraber lineer akım bölgesinde dinamik şekil faktörü bu tarife göre ifade edilmek istenirse,

$$DSF = \frac{F_D}{(F_D)_n} = \frac{V_s}{V_n} \quad (2.19)$$

yazılmalıdır.

Briggs ve arkadaşları dinamik şekil faktörünü nonlinear akım bölgesi için (2.17) genel bağıntısı yardımıyla tarif etmişlerdir. Bu araştırmacılar çok büyük hızlar bölgesinde ($Re_n = \rho V_n d_n / \mu > 500$ için) C_D direnç katsayısının gerek tane ve gerekse eşdeğer hacimli küre için aynı olduğunu farzederek

$$DSF = \frac{F_D}{(F_D)_n} = \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^2 \quad (2.20)$$

denklemini vermektedirler. Re_n değerinin $1 < Re_n < 500$ aralığında olması halinde ise C_D direnç katsayısının Reynolds sayısı ile değiştiği kabul edilmektedir. Bu hal için tane biçimini temsil etmek üzere DSF şekil faktörü,

$$DSF = a_1 \left(\frac{V_s}{V_n} \right) + b_1 \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^2 \quad (2.21)$$

bağıntısıyla tarif edilmiştir. Burada a_1 ve b_1 toplamı bire eşit olan katsayılardır. Küresel bir tane için $DSF = 1$ olması gerektiğinden,

$$\frac{V_s}{V_n} = 1 \quad ; \quad \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^2 = 1 \quad (2.22)$$

$$DSF = a_1 + b_1 = 1 \quad (2.23)$$

şartı gerçekleşmelidir. Diğer taraftan nonlinear bölgede büyük Reynolds sayıları için (2.21) denkleminde birinci terim

ihmal edilebilecek kadar küçük olmalı ve sadece ikinci terim DSF yi, (2.20) bağıntısıyla verildiği gibi, temsil edebilmesidir. Bu düşünceden hareketle Briggs ve arkadaşları a_1 ve b_1 için aşağıdaki bağıntıları vermişlerdir:

$$a_1 = \frac{1}{1+Re_n} \quad (2.24)$$

$$b_1 = \frac{Re_n}{1+Re_n} \quad (2.25)$$

$$\frac{b_1}{a_1} = Re_n \quad (2.26)$$

Görüldüğü üzere büyük Reynolds sayıları için, $Re_n \rightarrow \infty$, $a_1 \rightarrow 0$ olup,

$$a_1 + b_1 = 1 \rightarrow b_1 = 1$$

$$DSF = \left(\frac{V_s}{V_n}\right)^2 \quad (2.20)$$

elde edilir. Küçük Reynolds sayıları için ise $Re_n \rightarrow 0$, $a_1 \rightarrow 1$, $b_1 \rightarrow 0$ olup,

$$DSF = \frac{V_s}{V_n} \quad (2.19)$$

bulunur.

$$(2.17) \text{ denkleminde } A = \frac{\pi d_n^2}{4} \text{ konulursa,}$$

$$V_s^2 = \frac{2F_D}{C_D A \rho} = \frac{2F_D}{C_D \frac{\pi d_n^2}{4} \rho} = \frac{8F_D}{\pi C_D d_n^2 \rho} \quad (2.27)$$

veya

$$DSF = \frac{V_s^2}{V_n^2} = \frac{8F_D}{\pi C_D d_n^2 \rho V_n^2} = \frac{8F_D / V^2}{\pi C_D Re_n^2 \rho} \quad (2.28)$$

elde edilir. Burada ν , kinematik viskozitedir.

Literatürde DSF faktörü daha ziyade (2.20) ve (2.21) bağıntılarıyla ifade edilmekte ve (2.19) bağıntısı pek kullanılmamaktadır. Bunun sebebi, geri yıkama hidroliğinde bu denklemin geçerli olacağı kadar küçük hızların kullanılmamasıdır.

Bu dinamik şekil faktörü su sıcaklığından bağımsızdır.

Fisher(11), üç farklı filtre malzemesine ait değişik tane boyutları için, şekil faktörünü birkaç ayrı yolla tesbit ederek, sonuçda genişletilmiş yatağa ait korrelasyonlar için DSF dinamik şekil faktörünün en faydalısı olabileceğini ifade etmiştir.

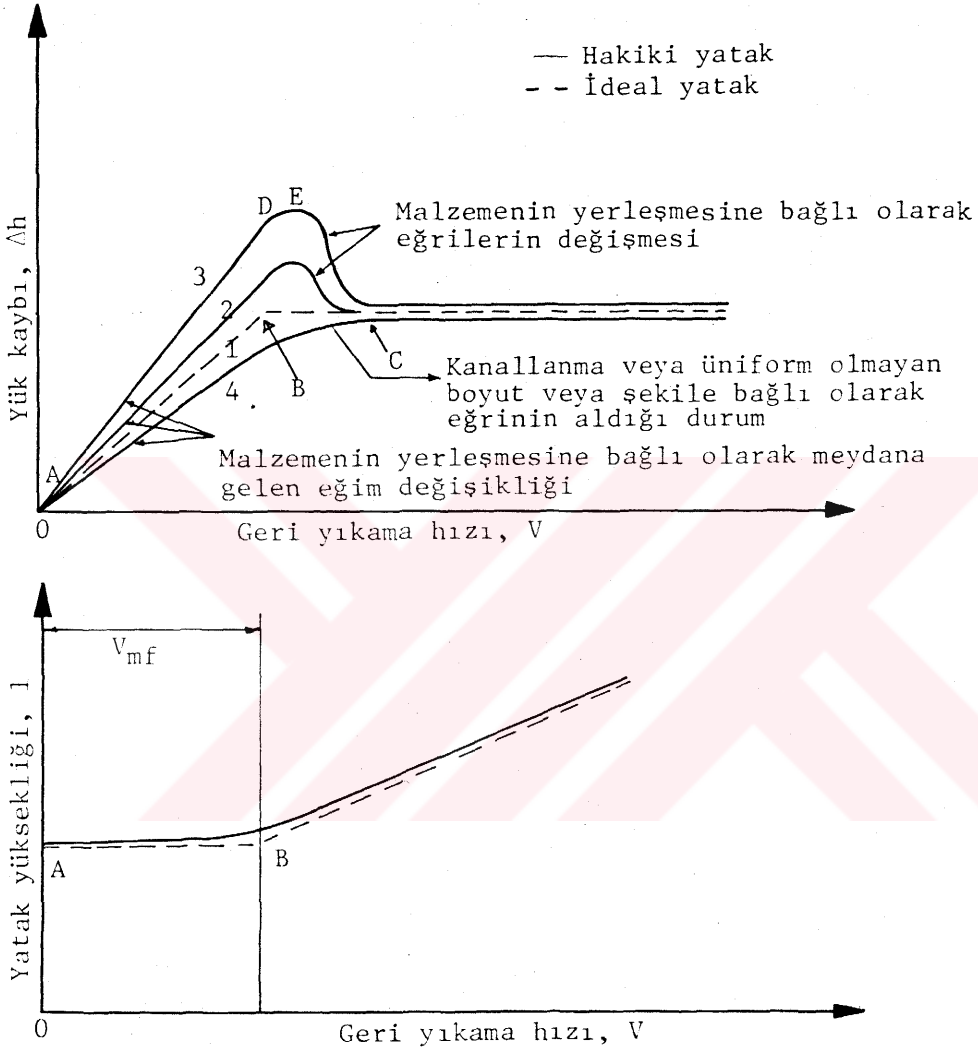


BÖLÜM III

GERİ YIKAMA HİDROLİĞİ

3.1. Geri Yıkama ile İlgili Temel Esaslar

Filtre yatağının geri yıkanmasında, yatağın akışkan hale gelmesine flüdizasyon denir. Bu olay süzülen sıvının filtreye içindeki yukarı akımında taneleri askıda tutacak bir hıza ulaşması ile meydana gelir. Geri yıkama sırasında, sıvı akımının yukarı doğrultudaki hareketinde yerçekimi kuvvetinden başka, filtre tanelerinin akıma karşı gösterdiği direnç kuvveti de söz konusudur. Bu direnç kuvveti viskoz ve kinetik etkilerden oluşur. Yatağın akışkan hale gelmesinden önce, sabit yatak içindeki enerji kaybı, V geri yıkama hızının lineer bir fonksiyonudur (Şekil 3.1). Geri yıkama hızı arttırılınca, filtre tanelerinin akıma karşı olan direncide artar. Belirli bir geri yıkama hızına kadar bu durum devam eder ve yatağın üst seviyesinde bir değişme, yani genleşme olmaz. Bu minimum flüdizasyon hızı için direnç kuvveti yerçekimi kuvvetine eşit olunca, taneler sıvı içinde asılı halde kalır. Bu durum Şekil 3.1'de kesikli çizgi ile karakterize edilmiş olup ideal olarak flüdize olan aynı boyutlu küresel tanelerden müteşekkil bir yatağı tarifler ve B noktasına tekabül eden hız da, V_{mf} minimum flüdizasyon hızını belirtir(9). Geri yıkamada yatağın akışkan hale geçmeğe başladığı noktayı tesbit bakımından bu hızı bilmek gereklidir. V_{mf} 'den daha büyük hızlar, yük kaybında bir artış olmadan, yatağın genleşmesine yol açar. Değişik boyutlu tanelerden müteşekkil gerçek bir yatakda ise, minimum flüdizasyon hızı bütün taneler için aynı değildir. Bu sebeple sabit yatak halinden tamamen akışkan hale geçişte tedrici bir değişme vardır. Şekil 3.1 de hakiki yatağı gösteren 2, 3 ve 4 numaralı eğrilerin yatay hale geldiği C noktasına kadar bütün yatak akışkan duruma geçmeyecektir(9). Meselâ 3 numaralı eğride AD doğrusu sabit yatağı gösterir. D noktasından itibaren



Şekil 3.1. Flüdize yatağın karakteristikleri.

ren lineerlikten sapma başlar. Bu noktadan sonra tanelerin kımıldanırları görölür. Hızın artışına bağılı olarak tanelerdeki bu oynama devam eder. E noktasına gelindiğinde yatak da gevşeme görölür. Hızın daha fazla arttırılması halinde tanelerden bir kısmı birbiriyle artık temas halinde değıldir ve devamlı bir çalkantı durumundadır. E noktası hidrolik rejimler arasında bir geğış noktası olup flüdizasyon başlangıç noktasıdır. C noktasında flüdizasyon tamamdır ve her tane çalkantı halindedir. CF yatay doğrusu tam flüdizasyonu gösterir ve artan geri yıkama hızına bağılı olarak bütün yatakdaki sabit enerji kaybını karakterize eder(16).

Görölüdüğü üzere gerçık bir filtre yatağında yük kaybı, ideal yatak için gösterilene benzememektedir. Tanenin şekli, filtre kolundaki yerleşme tarzı ve yukarı doğru olan akımın üniform şekilde dağılmayışı sebebiyle daha önce açıklandığı üzere 2, 3, 4 eğrileri gibi değışik durumlar ortaya çıkmaktadır. Tanelerin filtre kolunu içindeki yerleşme biçimleri, tanelerin küreselliğinden etkilenir. Genleşme öncesi, sabit yatakdaki yük kaybı, yatağı teşkil eden tanelerin sıkı veya gevşık olarak yerleşmelerine bağılı olarak, ideal haldeki yatakdakinden büyük veya küçük olabilir. Şekil 3.1 de görölün tepe noktaları yatak akışkan hale gelmeden önce tanelerin birbirine bağlanmış olmasından ve akışkan hale hemen geçmemesinden ileri gelmektedir. Küresel olmayan tanelerde bu hal küresel tanelere nazaran daha fazla görölür(21). Yatak içinde kanalların meydana gelmesi veya tane büyüklük veya şeklinin üniform olmamasının etkisi Şekil 3.1 de 4 eğrisi ile gösterilmiştir. Bu durumda akım üniform olmaktan çıkar. Yatak genişirken tanelerin birbirinden ayrılmasına bağılı olarak kanallar ortadan kalkacaktır.

3.2. Flüdize Olmuş Bir Yatağın Karakteristiklerini Belirten Bağıntılar

Flüdize olmuş bir yatakdaki sabit basınç kaybı, akışkan haldeki tanelerin su içindeki ağırlığına eşittir. Bu ifade daha önce Kısım 1.2'de (1.27) bağıntısı olarak aşağıdaki şekilde verilmiştir,

$$\Delta p = \Delta h \rho g = 1 (\rho_t - \rho) g (1 - \epsilon) \quad (1.27)$$

Genleşmiş filtre yatağının kalınlık ve porozitesi ile, genleşmeden önceki kalınlık ve porozite arasında, tanelerin hacminin ve flüdizasyon kolonunun enkesit alanının sabit olması halinde, daha önce Kısım 1.2 de verilen (1.30) bağıntısı geçerlidir.

$$l_0(1-\epsilon_0) = l(1-\epsilon) \quad (1.30)$$

Genleşmiş yatakda, yoğunluğu ve boyutu farklı iki malzeme bulunması halinde böyle bir yatağın porozitesinin hesaplanması için 1964 de Le Clair(23) ve Pruden(47) aşağıda verilen bağıntıyı teklif etmiş ve kullanmışlardır.

$$\epsilon = \frac{\sum \frac{\epsilon_i}{1-\epsilon_i} \frac{W_i}{\rho_{ti}}}{\sum \frac{1}{1-\epsilon_i} \frac{W_i}{\rho_{ti}}} \quad (3.1)$$

Burada,

ϵ : Filtre yatağının herhangi bir geri yıkama hızı için tahmin edilen porozitesi.

ϵ_i : Yatağı teşkil eden i'nci tabakaya ait, verilen geri yıkama hızına tekabül eden porozite.

W_i : i'nci tabakanın ağırlığı.

ρ_{ti} : i'nci tabakayı teşkil eden malzemenin özgül kütlesi.

ϵ_i değeri, filtreyi teşkil eden her bir tabakanın, müstakil olarak geri yıkanması suretiyle elde edilir. Yukarda verilen (3.1) denklemi porozitenin tanımından hareketle aşağıda gösterildiği üzere elde edilebilir:

$$\text{Porozite} \quad \epsilon = 1 - \frac{V_t}{V} \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir. Burada V_t ve V sırasıyla flüdizasyon ko-

lonundaki toplam tane hacmini, tane ve su toplam hacmini göstermektedir. Bu ifadede filtreyi teşkil eden farklı yoğunluk ve boyutdaki iki malzemenin toplam hacmi,

$$V_t = \frac{W_1}{\rho_{t1}} + \frac{W_2}{\rho_{t2}} \quad (3.3)$$

ve toplam yatak hacmi,

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{(1-\epsilon)} V_t = \frac{1}{(1-\epsilon_1)} V_{t1} + \frac{1}{(1-\epsilon_2)} V_{t2} \\ &= \frac{1}{1-\epsilon_1} \frac{W_1}{\rho_{t1}} + \frac{1}{1-\epsilon_2} \frac{W_2}{\rho_{t2}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

olarak yazılır ve (3.2) de yerine konulursa (3.1) bağıntısı elde edilmiş olur. Farklı yoğunluktaki malzemelerin genişmesinde tabakaların birbirinden ayrılması, karışması safhaları görülebilir. Le Clair (3.2) denkleminin flüidizasyonun her safhası için geçerli olduğunu ifade etmiştir.

Huisman geri yıkamada yüksek hızlara ait akım bölgesinde ($5 < Re < 50$) yük kaybını bulmak için aşağıdaki ampirik ifadeyi kullanmaktadır(20), (22).

$$\Delta h = C' \frac{v^{0.8}}{g} \frac{(1-\epsilon)^{1.8}}{\epsilon^3} \frac{v^{1.2}}{d^{1.8}} \quad (3.5)$$

Burada,

C' : Tanelerin dizilişi ile ilgili bir katsayı (Huisman'a göre $C' = 150$).

Flüidize bir yatakta, genişmiş yatak porozitesi ile geri yıkama suyu hızı arasındaki bağıntı, (1.27) ve (3.5) bağıntılarındaki Δh ifadelerini eşitleyerek bulunabilir.

$$1 \frac{(\rho_t - \rho)}{\rho} (1-\epsilon) = 150 \frac{v^{0.8}}{g} \frac{(1-\epsilon)^{1.8}}{\epsilon^3} \frac{v^{1.2}}{d^{1.8}} \quad (3.6)$$

Bu denklem, ϵ na göre çözülürse,

$$\frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^{0.8}} = 150 \frac{v^{0.8}}{g} \frac{\rho}{\rho_t - \rho} \frac{v^{1.2}}{d^{1.8}} \quad (3.7)$$

olur. İyi bir yaklaşımla,

$$\frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^{0.8}} \approx (2.63) \epsilon^{3.6} \quad (3.8)$$

yazılabilir. Bu değer (3.7) de yerine konulursa,

$$\epsilon = 3.07 \frac{v^{1/4,5}}{g^{1/3,6}} \left(\frac{\rho}{\rho_t - \rho} \right)^{1/3,6} \frac{v^{1/3}}{d^{1/2}} \quad (3.9)$$

elde edilir. Buradan V geri yıkama hızı ile genleşmiş filtre yatağının ϵ porozitesi arasındaki bağıntı,

$$v = \frac{d^{3/2} g^{3/3,6}}{3,07^3 v^{3/4,5}} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right)^{3/3,6} \epsilon^3 \quad (3.10)$$

şeklinde elde edilmiş olur. (3.10) bağıntısı,

$$\frac{v}{v_i} = \epsilon^3 \quad (3.11)$$

olarak yazılabilir. Burada,

$$v_i = \frac{d^{3/2} g^{3/3,6}}{3,07^3 v^{3/4,5}} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right)^{3/3,6} \quad (3.12)$$

olup $\epsilon = 1$ 'e tekabül eden geri yıkama hızını gösterir.

3.3. Geri Yıkama Hızını Poroziteye Bağlayan Bağıntının En Genel İfadelerinin Çıkarılması

Kısım 3.2'de açıklandığı üzere aynı boyutlu tanelerden ibaret flüdize olmuş bir filtre yatağı için, geri yıkama hızının logaritması, porozitenin logaritmasının bir fonksiyonudur. Bu münasebetin daha genel şekli ilk defa 1954 de Richardson ve Zaki tarafından bulunmuştur(6). Bu konudaki en ilgi çekici araştırmalardan birisi olan bu çalışma eski olmakla beraber bugün de önemini korumaktadır. Richardson ve Zaki'ye göre V geri yıkama hızı ile, ϵ yatak porozitesi arasında, Tablo 1.1 de verildiği üzere

$$\frac{V}{V_i} = \epsilon^n \quad (1.7)$$

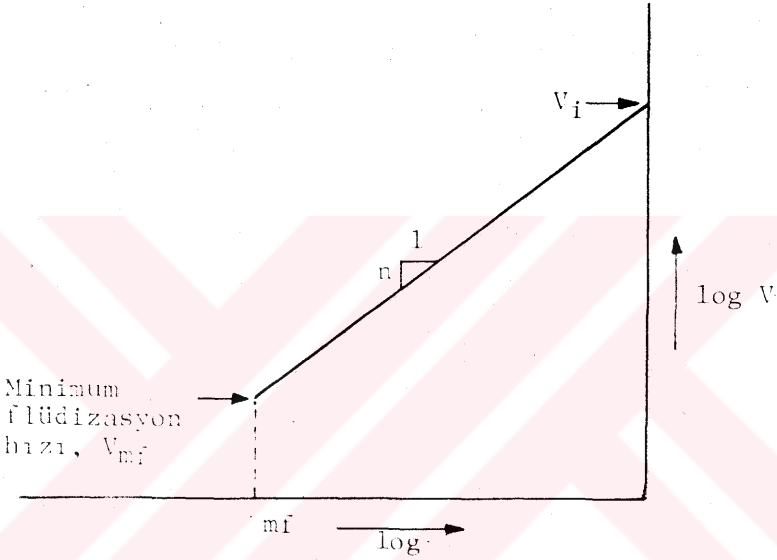
veya

$$\text{Log } V = \text{log} V_i + n \text{log} \epsilon$$

şeklinde bir bağıntı mevcuttur. Burada n , cidar tesiri ve Reynolds sayısı ile değişen bir katsayı olup (1.7) ifadesinin eğimidir. Buna yatağın genleşme katsayısı adı verilmektedir. Amprik olan yukardaki bağıntı, sıvı-katı sistemlerde flüdizasyon ve çökelme olayının deneysel incelenmesi sonunda elde edilmiştir. Bu deneylerde, 100 mikrondan büyük boyutlu ve yoğunluğu 1.06 ila 10.6 arasında değişen üniform taneli malzeme kullanılmıştır.

Wilhelm ve Kwauk(16), daha sonra John Garside ve Maan R. Al-Dibouni'de(18) yapmış oldukları deneylerin sonuçlarını şekil 3.2 deki gibi bir grafik haline getirdikleri zaman, küçük Reynolds sayılarında noktaların bir doğru üzerine düştüğünü görmüşler, fakat yüksek Reynolds sayılarında, porozitenin 0.9 dan büyük olması halinde, işaretlenen noktaların bu doğru çizgiden saptığını tesbit etmişlerdir. Birçok araştırmada, noktalar doğru çizgiden sapmadığı için (1.7) bağıntısının genel bir geçerliliğe sahip olduğu anlaşılabılır ise de yukarda açıklandığı üzere büyük poroziteler için nonlinear bir bölge mevcut bulunmaktadır. (3.11) bağıntısı (1.7) ile karşılaştırılırsa

$n=3$ olduğu görülür. Bu geçiş bölgesindeki akım içindir ($5 < Re < 50$). (3.11) ifadesinin çıkarılışında kullanılan yük kaybı formülü çok yaklaşık ve bütün parametreleri ihtiva etmediğinden, ayrıca (1.27) denklemi idealize edilmiş yatak için yazılmış olduğundan (3.11) bağıntısı problemin özel çözümünü gösterir. (1.7) bağıntısı ise daha geneldir.



Şekil 3.2. Üniorm boyutlu malzemeden müteşekkil bir filtrede $\log V - \log \epsilon$ grafiği.

Richardson ve Zaki, ayrıca, küresel taneli malzeme için V_i değeri ile, V_s tane serbest çökelme hızı arasında, cidar tesirini ifade eden aşağıdaki amprik bağıntısının mevcut olduğunu bulmuşlardır,

$$\frac{V_s}{V_i} = 10^{d/D} \quad (3.13)$$

veya

$$\log V_s = \log V_i + d/D \quad (3.14)$$

Burada,

d : Tane boyutu

D : Flüdizasyon kolonu çapı.

Bu bağıntıda d/D nin sıfıra yaklaşması halinde (V_s/V_i) oranı 1'e eşit olduğundan, V_i yerine V_s yazılabilir ve (1.7) ifadesi,

$$\frac{V}{V_s} = \epsilon^n \quad (3.15)$$

şeklini alır.

Küresel tanelerden müteşekkil filtre yatağının genişmesinde, n katsayısı için Tablo 1.1 de verilen aşağıdaki amprik bağıntılar geçerlidir:

$$n = \left\{ 4.35 + 17.5 \frac{d}{D} \right\} Re_s^{-0.03} \quad 0.2 < Re_s < 1 \quad (1.9)$$

$$n = \left\{ 4.45 + 18 \frac{d}{D} \right\} Re_s^{-0.1} \quad 1 < Re_s < 200 \quad (1.10)$$

$$n = 4.45 Re_s^{-0.1} \quad 200 < Re_s < 500 \quad (1.11)$$

Bu bağıntılar laminar ve türbülanslı rejim arasında kalan geçiş bölgesinde geçerlidir. $Re_s < 0.2$ için akım laminardır. Laminar rejimde atalet kuvvetleri ihmal edilebilecek derecede küçüktür. Bu halde,

$$n = 4.65 + 19.5 \frac{d}{D} \quad Re_s < 0.2 \quad (1.8)$$

denklemleri verilmiştir. $Re_s > 500$ için akım türbülanslı olur. Türbülanslı rejimde ise viskoz kuvvetler ikinci plânda kalır. Bu hâl için Richardson ve Zaki n 'in sabit ve

$$n = 2.39 \quad (1.12)$$

olduğunu tesbit etmişlerdir. Küresel taneler üzerindeki çalış-

malarının yanısıra, Richardson ve Zaki'nin küresel olmayan silindirik, küp ve plaka şeklindeki tanelerle ilgili olarak da araştırmaları mevcuttur. Türbülanslı akım bölgesinde, vatak genişleme katsayısı olan n değeri, tane şeklinin fonksiyonu olarak aşağıdaki bağıntıyla ifade edilmiştir.

$$n = 2.7 K_r^{0.16} \quad (3.16)$$

Burada;

$$K_r = \frac{\pi}{6} \frac{d_n^3}{d_a^3} = \text{Hacimsel \u0131ekil fakt\u00f6r\u00fc} \quad (3.17)$$

Tesarik, de\u011fi\u015fik malzeme t\u00fcrleriyle yapt\u0131\u011f\u0131 \u00e7alı\u015fmalarda deney sonu\u00e7larının Richardson ve Zaki'nin verdi\u011fi $V/V_i = \epsilon^n$ denklemin\u00e9 uydu\u011funu belirtmi\u015ftir(35).

1980 de Cleasby ve Fan(9) k\u00fcresel ve k\u00fcresel olmayan malzemeye uygulanabilecek modellerini geli\u015ftirirken, Richardson ve Zaki'ye ait, Tablo 1.1 de verilen, n genle\u015fme katsayısını veren (1.10) ve (1.11) denklemlerinden istifade etmi\u015flerdir. Bu ba\u011fıntılarda, B\u00f6l\u00fcm II de a\u00e7ıklanan DSF dinamik \u015fekil fakt\u00f6r\u00fc veya ψ k\u00fcresellik katsayılarının etkisini g\u00f6stermek suretiyle a\u015fa\u011fıda g\u00f6r\u00fclen ifadeleri elde etmi\u015flerdir.

$$n = (4.45 + 18 \frac{d}{D}) Re_s^{-0.1} DSF^a \quad 15 < Re_s < 200 \quad (3.18)$$

$$n = 4.45 Re_s^{-0.1} DSF^a \quad 200 < Re_s < 503 \quad (3.19)$$

$$a = -2.27 \cdot (DSF)^{0.42} Re_s^{-0.441} \quad (r^2 = 0.826) \quad (3.20)$$

r^2 = Determinasyon katsayısı olarak bilinen istatistikî parametre.

$$n = (4.45 + 18 \frac{d}{D}) Re_s^{-0.1} \psi^{0.88} Re_s^{-0.363} \quad 15 < Re_s < 200 \quad (3.21)$$

$$n = 4.45 Re_s^{-0.1} \psi^{0.88} Re_s^{-0.363} \quad 200 < Re_s < 503 \quad (3.22)$$

$$a = -2.92 \cdot \psi^{0.88} \text{Re}_s^{-0.363} \quad (r^2 = 0.831) \quad (3.23)$$

Yukarıda verilen n genleşme katsayısı geçerli olduğu Reynolds sayısına bağlı olarak, Richardson ve Zaki'ye ait $V/V_i = \epsilon^n$ bağıntısında kullanılmıştır. Bu bağıntı vasıtasıyla herhangi bir geri yıkama hızında yatağın porozitesinin ne olacağını bulmak kabildir. Ancak bu formülden de görüleceği üzere ϵ 'nın 1 olmasına tekabül eden V_i hızını belli bir boyuta haiz malzeme için bilmek gerekir. Cleasby ve Fan tanelerin herhangi bir biçimde olabileceğini düşünerek, onun küresellik derecesini ifade eden DSF dinamik şekil faktörünü ihtiva edecek tarzda,

$$\frac{V_i}{V_s} = 0.90 (\text{DSF})^{-0.262} \quad (3.24)$$

bağıntısını vermişlerdir. Bu bağıntı daha önce Richardson ve Zaki tarafından küresel malzeme için verilen (3.14) denklemin-den uygulama açısından farklıdır.

BÖLÜM IV

GERİ YIKAMA AKIMINA ETKİYEN

FAKTÖRLERİN ARAŞTIRILMASI

Filtre tesislerinin proje ve inşaatında gerekli tedbirler alınmazsa etkili bir geri yıkama temin edilemez. Bu sebeple olaya etkiyen faktörlerin araştırılmasına ihtiyaç vardır. Bu bölümde geri yıkama, çeşitli yük kaybı formüllerinin ışığında ele alınacak ve olaya etkiyen fiziksel ve hidrolik faktörler meydana çıkarılmaya çalışılacaktır.

4.1. Giriş

Bir filtreyi etkili olarak yıkamak için, yatak bütün taneleriyle birlikte akışkan (= flüdize) hale getirilerek süspansiyon durumuna geçirilmelidir. Bu halde filtre tanelerinin etrafındaki akımda, sürtünme sebebiyle basınç kaybı, tanelerin su içindeki ağırlığına eşittir. Bu ifade daha önce verilmiş olan (1.27) numaralı,

$$\Delta p = \Delta h \rho g = l(\rho_t - \rho)(1 - \epsilon)g$$

bağıntısıdır. Birim uzunluktaki yük kaybını veren J hidrolik eğimi yukardaki bağıntıdan,

$$J = \frac{\Delta h}{l} = \frac{(\rho_t - \rho)}{\rho} (1 - \epsilon) \quad (4.1)$$

olarak bulunur. Bu denklem flüdize haldeki yatağa ait olup Kısım 4.2 de kullanılacaktır.

4.2. Çeşitli Yük Kaybı Formüllerine Göre Geri Yıkama Hızının Hesabı

Taneli malzeme içinde birim boydaki yük kaybını çeşitli araştırmacılar değişik formüllerle vermişlerdir. Akımın lineer ve nonlineer bölgede olmasına göre bunları değerlendirmek gerekir. Aşağıda önce bu yük kaybı formülleri ve (4.1) numaralı denklem yardımıyla geri yıkama hızı hesaplanacak, daha sonra sonuçlar, olaya etkiyen parametrelerin ışığında, ayrı bir kısımda değerlendirilecektir.

Filtre akımının hesabında kapiler modele dayanan ilk çalışma 1899 da Slichter tarafından yapılmıştır(57), (59). Bütün birimler c.g.s sisteminde gösterilirse lineer akım bölgesi için bu çalışmanın sonucu,

$$v = \frac{10.2 d^2}{\gamma \cdot K_s \cdot \mu} \frac{\Delta p}{l} = \frac{10.2 d^2}{\gamma \cdot K_s \cdot \mu} \gamma \frac{\Delta h}{l} = \frac{10.2 d^2}{\gamma K_s \cdot \mu} \gamma J \quad (4.2)$$

denklemini ile ifade edilebilir. Geri yıkama hızı,

$$v = \frac{\bar{k} d^2}{\mu} \gamma J \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilirse,

$$\bar{k} = \frac{10.2}{\gamma K_s} \quad (4.4)$$

olur. (4.4) bağıntısındaki $\bar{k}$ veya K_s katsayıları taneli ortamın sıvı geçirme kabiliyeti ile alâkalı değerlerdir. γ da akışkanın özgül ağırlığını göstermektedir.

Slichter'in çalışmalarına dayanarak 1932 de Smith $\bar{k}$ için aşağıdaki bağıntıyı vermiştir(56), (57), (59).

$$\bar{k} = 0,00809 (1-\epsilon)^{2/3} \left\{ \frac{0.985}{(1-\epsilon)^{2/3}} - 1 \right\}^2 \quad (4.5)$$

Bu ifade (4.3) bağıntısında yerine konur ve J ye göre düzenlenirse,

$$V = 0,00809 (1-\epsilon)^{2/3} \left\{ \frac{0,985}{(1-\epsilon)^{2/3}} - 1 \right\}^2 \frac{d^2}{\mu} \gamma J$$

$$J = \frac{\mu}{d^2} \frac{1}{\gamma} \frac{1}{0,00809 (1-\epsilon)^{2/3} \left\{ \frac{0,985}{(1-\epsilon)^{2/3}} - 1 \right\}^2} V \quad (4.6)$$

elde edilir. Bu denklem flüdize yatağa ait hidrolik eğimi veren (4.1) bağıntısına eşitlenirse,

$$J = \frac{\mu}{d^2} \frac{1}{\gamma} \frac{1}{0,00809 (1-\epsilon)^{2/3} \left\{ \frac{0,985}{(1-\epsilon)^{2/3}} - 1 \right\}^2} V = \frac{(\rho_t - \rho)}{\rho} (1-\epsilon) \quad (4.7)$$

bulunur. (4.7) denklemini V'ye göre ifade edilirse,

$$V = 0,00809 \frac{d^2 \gamma}{\mu} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) (1-\epsilon)^{2/3} \left\{ \frac{0,985}{(1-\epsilon)^{2/3}} - 1 \right\}^2 (1-\epsilon) \quad (4.8)$$

elde edilir. Bu ifadede bütün sabitler K ile gösterilirse,

$$V = K \left\{ \frac{0,985}{(1-\epsilon)^{2/3}} - 1 \right\}^2 (1-\epsilon)^{5/3} \quad (4.9.a)$$

olur. Burada,

$$K = 0,00809 \frac{d^2 \gamma}{\mu} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) \quad (4.9.b)$$

(4.9.a) denkleminin çıkarılışında (4.1) bağıntısı kullanıldığı için, bu denklem minimum flüdizasyon hızını ve yük kaybının sabit kaldığı flüdize yatağın çeşitli safhalarındaki hızları bulmak için kullanılır. (4.9.a) bağıntısı,

$$\frac{V}{K} = \left\{ \frac{0,985}{(1-\epsilon)^{2/3}} - 1 \right\}^2 (1-\epsilon)^{5/3} = F(\epsilon) \quad (4.10)$$

şeklinde yazılırsa, $F(\epsilon)$ grafiği, ϵ porozitesinin fonksiyonu olarak nokta nokta bulunabilir. Bu fonksiyonun grafiğini çizmek için ϵ 'na çeşitli değerler verilerek Tablo 4.1 de $F(\epsilon)$

fonksiyonu hesaplanmıştır. Temiz filtre yatağının porozitesi genel olarak $\epsilon = 0.40$ civarında olduğundan bu tablolar 0.40 porozitesinden itibaren hesaplanan değerleri ihtiva etmektedir.

Logaritmik ölçekli bir dik koordinat sisteminde, hesaplanan $F(\epsilon)$ değerleri noktalanırsa Şekil 4.1 elde edilir.

Tablo 4.1. ϵ 'nin Çeşitli Değerlerine Karşı (V/K) nın Hesabı.

ϵ	$F(\epsilon) = \left\{ \frac{0.985}{(1-\epsilon)^{2/3}} - 1 \right\}^2 (1-\epsilon)^{5/3}$
0.4	0.064
0.5	0.101
0.6	0.146
0.7	0.195
0.8	0.245
0.9	0.278
1.00	0.000

Kaydedilen noktaların pratik olarak,

$$F(\epsilon) \approx \alpha \cdot \epsilon^n \quad (4.11)$$

denklemleri ile ifade edilebilecek bir doğru üzerine düştüğü görülmektedir. Burada α , $\epsilon = 1$ için $F(\epsilon)$ değeridir, n 'de $F(\epsilon)$ fonksiyonunun eğimidir.

Şekil 4.1 den de görüleceği üzere (4.11) bağıntısının geçerlilik bölgesi $0.40 \leq \epsilon \leq 0.80$ aralığı olup Şekilden $\epsilon = 1$ için $\alpha = 0.4$ okunur ve n değeri de doğrunun eğiminden bulunabilir veya

$$n = \frac{\log 0.25 - \log 0.08}{\log 0.8 - \log 0.45} = 1.98$$

şeklinde hesaplanabilir.

(4.11) ifadesi, (4.10) da yerine konursa,

$$V \approx \alpha \cdot K \cdot \varepsilon^n \quad (4.12)$$

veya

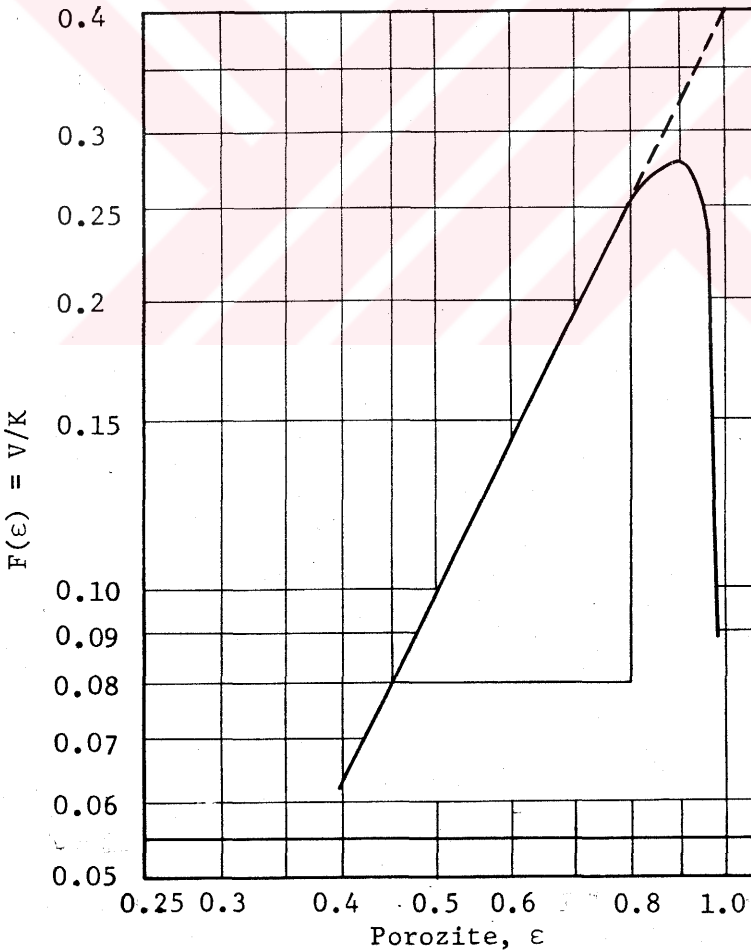
$$V \approx 0.4 \left\{ 0.00809 \frac{d^2 \gamma}{\mu} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) \right\} \varepsilon^{1.98} \quad (4.13)$$

$$\alpha = 0.4 ; \quad K = 0.00809 \frac{d^2 \gamma}{\mu} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right)$$

olur. (4.13) bağıntısı Richardson ve Zaki'ye ait (1.7) denklemiyle karşılaştırılırsa,

$$n = 1.98$$

$$V_i = 0.4 K \text{ elde edilir.}$$



Şekil 4.1. (4.10) bağıntısından hesaplanan $F(\varepsilon)$ porozite fonksiyonu.

Filtre boşluklarının dairesel kapiler boşluklardan meydana geldiğini kabul eden diğer araştırmacılar arasında Kozeny, Fair ve Hatch müstesna bir yer tutar. Bunlar kapiler boru içindeki laminar akıma ait J hidrolik eğim ifadesi için Poiseuille tarafından çıkarılan,

$$J = \frac{32}{g} \frac{v}{D_t^2} U \quad (4.14)$$

denklemini kullanmışlardır(17),(59). Burada,

U : Kapiler boru içindeki hız (Boşluk hızı)

D_t : Kapiler boru çapı

Kozeny, Poiseuille bağıntısındaki D_t^2 yi, taneli malzeme için tarif edilen bir hidrolik yarıçap değerinin fonksiyonu şeklinde ifade edip boşluk hızını (V/ϵ) şeklinde kabul ederek J hidrolik eğimini,

$$J = \frac{32}{g} \frac{v}{K_t \frac{\epsilon^2}{(1-\epsilon)^2} \frac{d^2}{(\psi')^2}} \frac{V}{\epsilon} \quad (4.15.a)$$

olarak hesaplamıştır. Burada ψ' tane şekil faktörü olup küresel tane için 6, köşeli taneler için 9 veya daha büyüktür(17). K_t bir sabiti gösterir. Bu ifadede $32/K_t$ 'i şeklinde tariflenmiş olup, $i(\psi')^2 = 180$ alınması suretiyle elde edilen ve üniform boyutlu küresel taneler için verilen

$$J = 180 \frac{v}{g} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{V}{d^2} \quad (4.15.b)$$

bağıntısı literatürde Kozeny-Carman denklemi olarak geçmektedir(22). Daha önce Kozeny denklemi (1.26) bağıntısıyla da verilmiştir. Bu denklem (4.15.b) ile mukayese edilirse küresel filtre malzemesi halinde $180 = C \cdot (6)^2$ bulunur. (4.15.b) denklemi (4.1) bağıntısına eşitlenir,

$$J = 180 \frac{v}{g} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{V}{d^2} = (1-\epsilon) \frac{(\rho_t - \rho)}{\rho} \quad (4.16)$$

ve V ye göre düzenlenirse,

$$V = \frac{1}{180} \frac{g}{v} d^2 \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} \quad (4.17)$$

olur. Bu bağıntıdaki sabit kısım K ve (4.10) ifadesinde olduğu gibi (V/K) , $F(\varepsilon)$ la gösterilirse (4.17) denklemi,

$$\frac{V}{K} = \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = F(\varepsilon) \quad (4.18.a)$$

$$K = \frac{1}{180} \frac{g}{v} d^2 \frac{(\rho_t - \rho)}{\rho} \quad (4.18.b)$$

olur. $\varepsilon \geq 0.40$ değerleri için (4.18.a) bağıntısı hesaplanarak sonuçları Tablo 4.2 de gösterilmiş ve bu değerler yardımı ile Şekil 4.2 elde edilmiştir. İşaretlenen noktalar, ε 'nın 0.70 den büyük değerlerinde doğru çizgiden sapmaktadır. Bu sebeple $0.40 \leq \varepsilon \leq 0.70$ aralığı için (4.11) bağıntısı geçerli olup Şekil 4.2 den $\alpha = 5$ ve $n = 4.30$ okunur. Buna göre

$$V \approx K \cdot F(\varepsilon) = \alpha \cdot K \cdot \varepsilon^n$$

$$V \approx (5) \left\{ \frac{1}{180} \frac{g}{v} d^2 \frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right\} \varepsilon^{4.30} \quad (4.19)$$

$$\alpha = 5 ; K = \frac{1}{180} \frac{g}{v} d^2 \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right)$$

elde edilir. Bu bağıntı (1.7) denklemiyle karşılaştırılırsa,

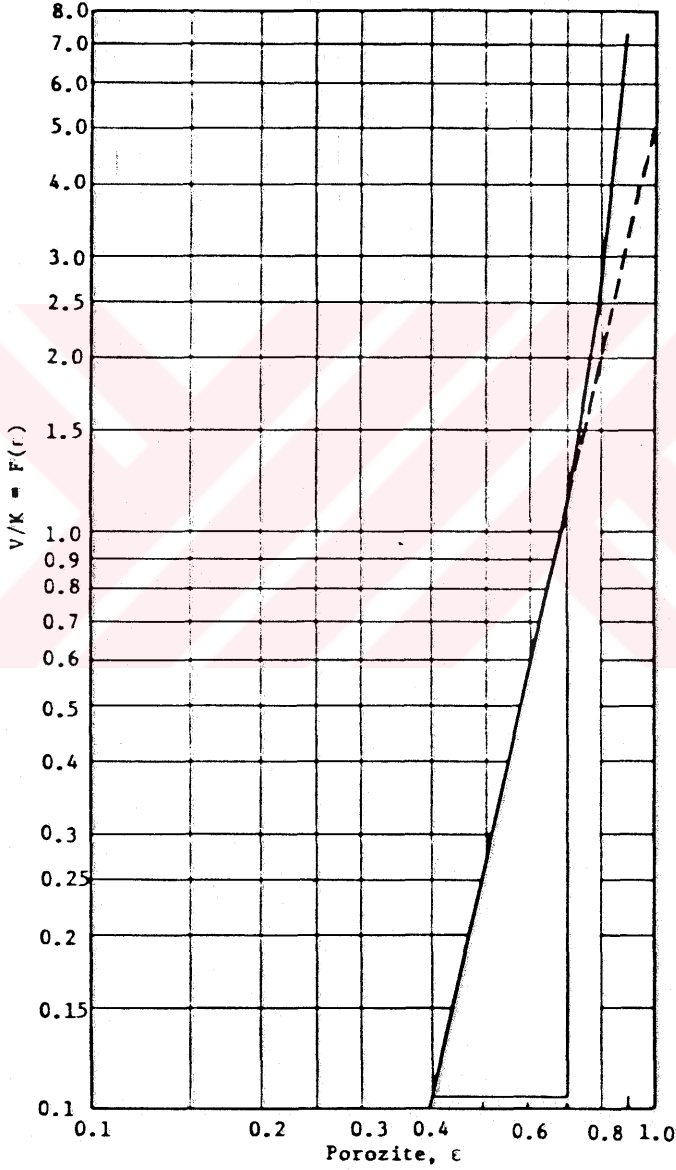
$$n = 4.30$$

$$V_i = 5 K$$

bulunur.

Tablo 4.2. ε 'nın Çeşitli Değerlerine Karşı (V/K) nın Hesabı.

ε	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$F(\varepsilon)=\varepsilon^3/(1-\varepsilon)$	0.107	0.25	0.54	1.14	2.56	7.29	∞

Şekil 4.2. (4.18a) bağıntısından hesaplanan $F(\varepsilon)$ porozite fonksiyonu.

Taneli malzemedeki lineer akım için bir başka yük kaybı denklemi de Fair (1954) tarafından verilmiştir(59). Bu bağıntı için de benzer işlemler yapılırsa,

$$V = \frac{\epsilon^4 d^2}{25.6\mu} \frac{\Delta p}{1} \quad (4.20)$$

$$J = \frac{25.6\mu}{\gamma d^2} \frac{1}{\epsilon^4} V = \left(\frac{\rho t^{-\rho}}{\rho} \right) (1-\epsilon) \quad (4.21)$$

$$V = \frac{\gamma d^2}{25.6\mu} \left(\frac{\rho t^{-\rho}}{\rho} \right) (1-\epsilon) \epsilon^4 \quad (4.22)$$

$$\frac{V}{K} = \epsilon^4 (1-\epsilon) = F(\epsilon) \quad (4.23)$$

bulunur.

$F(\epsilon)$ fonksiyonunun çeşitli ϵ poroziteleri için hesaplanmış değerleri Tablo 4.3 de verilmiş ve grafik olarakda Şekil 4.3 de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. ϵ 'nin Çeşitli Değerlerine Karşı (V/K) nın Hesabı.

ϵ	$F(\epsilon) = \epsilon^4 (1-\epsilon)$
0.40	0.015
0.50	0.031
0.60	0.052
0.70	0.072
0.80	0.082
0.90	0.065
1.00	0.000

Şekil 4.3 den $\alpha = 0.24$ ve $n = 3.03$ elde edilir. (4.11)ve (4.23) bağıntıları bu değerlere göre,

$$F(\epsilon) \approx 0.24 \epsilon^{3.03} ; 0.40 \leq \epsilon \leq 0.64 \quad (4.24)$$

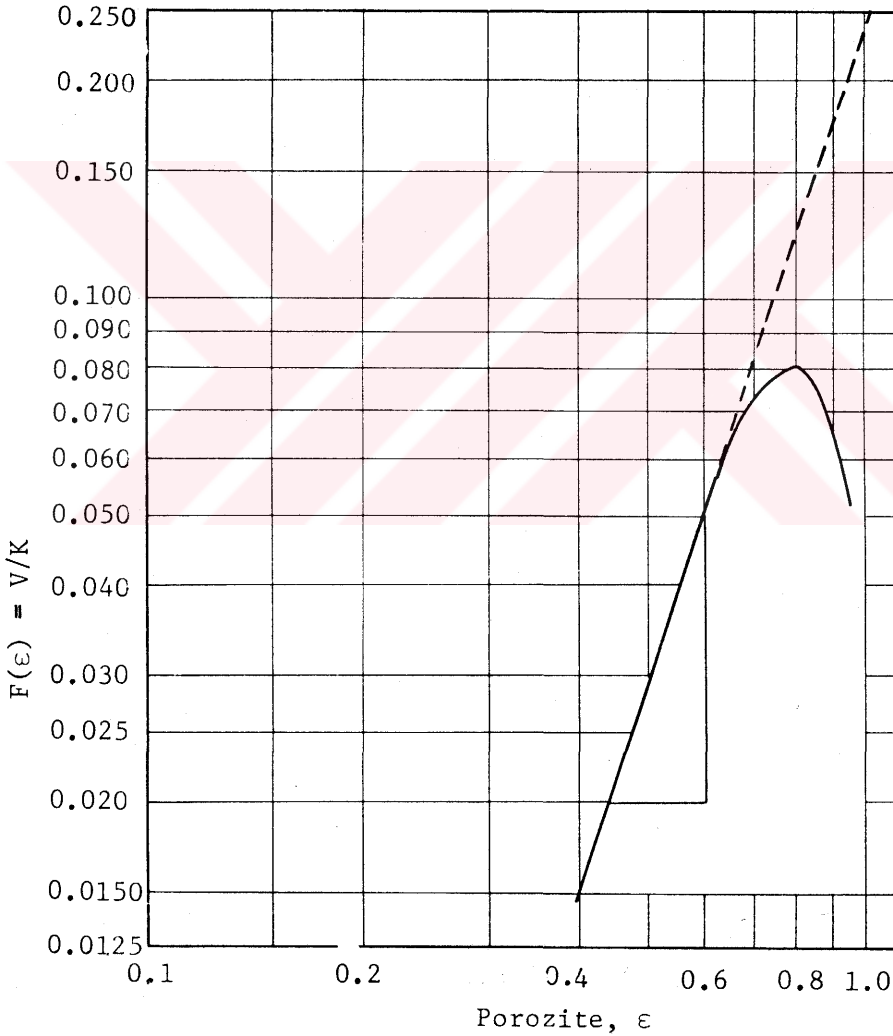
$$V \cong \alpha_K \epsilon^n \cong 0.24 \left\{ \frac{\gamma \cdot d^2}{25.6\mu} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) \right\} \epsilon^{3.08} \quad (4.25)$$

$$\alpha = 0.24 ; \quad K = \frac{\gamma d^2}{25.6\mu} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right)$$

olur. (4.25) denklemi (1.7) bağıntısıyla karşılaştırılırsa,

$$n = 3.08$$

$$V_i = 0.24 K \text{ elde edilir.}$$



Şekil 4.3. (4.23) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu.

Muslu (1971, 1976) lineer akım bölgesi için aşağıdaki bağıntıları vermiştir(59),(60).

$$v = 0.0438 \frac{\omega}{\psi_1} f(\epsilon) \frac{\gamma_d^2}{\mu} J \quad (4.26)$$

$$f(\epsilon) = \frac{0.6338 - (1-\epsilon)^{1/3} + 0.3709 (1-\epsilon)}{(1-\epsilon)} \quad (4.27)$$

Buna göre,

$$k = 0.0438 \frac{\omega}{\psi_1} f(\epsilon) \quad (4.28)$$

veya

$$k = \frac{\omega}{\psi_1} k_i = \omega' k_i \quad (4.29)$$

olur. Burada k_i ideal şekilde dağılmış küresel malzeme yığınlarına ait boyutsuz katsayıyı gösterir. Yani,

$$k_i = 0.0438 \cdot f(\epsilon) \quad (4.30)$$

ω ve ψ_1 sırasıyla malzemenin yerleşmesi ve tane boyut dağılımı ile ilgili katsayılar olup (4.26) bağıntısının çıkarıldığı şartlara uygun şekilde dizilmiş ideal küre yığınlarında ω ve ψ_1 katsayıları 1'e eşittir. Aksi halde diziliş şekline, tane biçim ve büyüklüklerinin dağılımına bağlıdır.

Filtre malzemesinin küre yığınlarından meydana geldiği kabul edilirse (4.26) bağıntısı,

$$v = 0.0438 f(\epsilon) \frac{\gamma_d^2}{\mu} J \quad (4.31)$$

haline gelir. Bu denklem J ye göre düzenlenip (4.1) bağıntısına eşitlenir,

$$J = \frac{\mu}{\gamma_d^2} \frac{1}{0.0438 f(\epsilon)} \quad v = \frac{\rho_t^{-\rho}}{\rho} (1-\epsilon) \quad (4.32)$$

ve V'ye göre yazılırsa,

$$v = 0.0438 \frac{\gamma_d^2}{\mu} \frac{\rho_t^{-\rho}}{\rho} (1-\epsilon) f(\epsilon) \quad (4.33)$$

olur. Bu ifadeden istifade ile $F(\epsilon)$ fonksiyonu

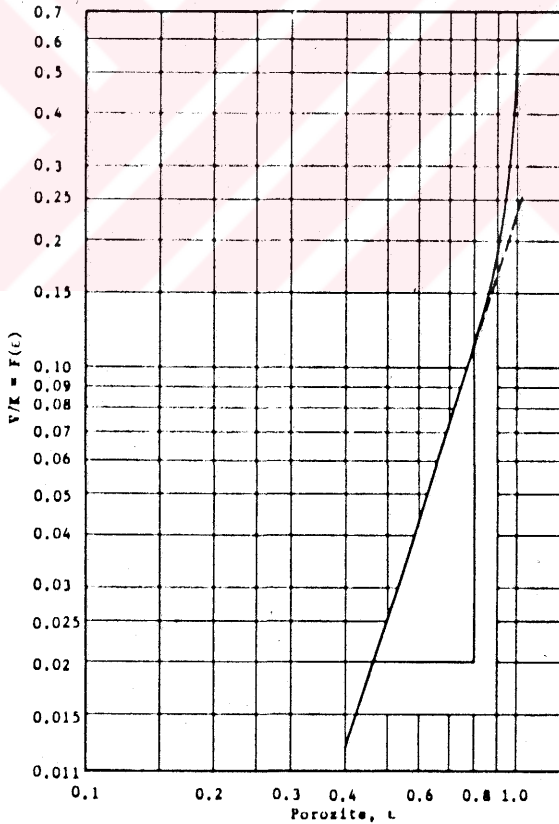
$$\frac{V}{K} = (1-\epsilon) \quad f(\epsilon) = F(\epsilon) \quad (4.34)$$

$$\frac{V}{K} = (1-\epsilon) \left\{ \frac{0.6338 - (1-\epsilon)^{1/3} + 0.3709(1-\epsilon)}{(1-\epsilon)} \right\} = F(\epsilon) \quad (4.35)$$

şeklinde hesaplanabilir. $F(\epsilon)$ fonksiyonunun değerleri Tablo 4.4 e yazılmış ve Şekil 4.4 de grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.4. ϵ 'nin Çeşitli Değerlerine Karşı (V/K) nın Hesabı.

ϵ	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
$V/K = F(\epsilon)$	0.013	0.025	0.045	0.075	0.123	0.206	0.634



Şekil 4.4. (4.35) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porosite fonksiyonu.

Şekil 4.4 den $\alpha = 0.23$ ve $n = 3.17$ bulunur. Buna göre (4.11) bağıntısı,

$$F(\epsilon) \approx 0.23 \epsilon^{3.17} \quad (4.36)$$

olur. Bu bağıntının geçerlilik bölgesi Şekil 4.4 den de görüleceği üzere $0.40 \leq \epsilon \leq 0.82$ dir. (4.36) denklemi (4.35) de yerine konunca,

$$v \approx 0.23 \left\{ 0.0438 \frac{\gamma_d^2}{\mu} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) \right\} \epsilon^{3.17} \quad (4.37)$$

$$\alpha = 0.23 \quad K = 0.0438 \frac{\gamma_d^2}{\mu} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right)$$

olur ve (1.7) bağıntısıyla karşılaştırılırsa,

$$n = 3.17 \\ V_i = 0.23 K$$

elde edilir.

Filtre malzemesi içindeki nonlineer akım için de çeşitli araştırmacılar muhtelif denklemler geliştirmişlerdir. Bazı araştırmacılar boru akımı için geçerli olan denklemlerden istifade etmiştir. Mesela Fair ve Hatch (1933) boru akımı için çıkarılan Darcy-Weisbach denklemine benzer bir ifade olarak,

$$J = \frac{C'}{R} \frac{U^2}{g} = \frac{C'}{\frac{\epsilon}{1-\epsilon} \psi \frac{d}{6}} \frac{U^2}{g} \quad (4.38)$$

bağıntısını vermişlerdir(56), (57). Burada R, filtre malzemesinin kapiler borulardan müteşekkil olduğu kabulüne göre hidrolik yarıçapı ve ψ küreselliği göstermekte olup, ψ küresel malzeme için 1 dir. C' katsayısının (1/5) den daha büyük değerler aldığını iddia etmişlerdir. (4.38) denkleminde $6C' = C''$ ve U nun değeri (V/ϵ) olarak yerine konursa,

$$J = C'' \left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \right) \left(\frac{1}{\psi d} \right) \left(\frac{V^2}{g} \right) \quad (4.39)$$

elde edilir. Ergun ve Orningtaneli malzeme içindeki akımla ilgili olarak,

$$C'' = 150 \frac{1-\epsilon}{Re_1} + 1.75 \quad (4.40)$$

denklemini vermişlerdir(61), (56). Burada Reynolds sayısı,

$$Re_1 = \psi \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu}$$

tarzında tariflenmiş olup (4.40) bağıntısı (4.39) da yerine konur,

$$J = (150 \frac{1-\epsilon}{\psi \frac{\rho V d}{\mu}} + 1.75) \left(\frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \right) \left(\frac{1}{\psi d} \right) \left(\frac{V^2}{g} \right) \quad (4.41)$$

ve düzenlenirse,

$$J = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu}{\psi^2 \rho d^2 g} V + 1.75 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \frac{1}{\psi d} \frac{V^2}{g} \quad (4.42)$$

elde edilir. Bu bağıntı literatürde Ergun denklemi olarak bilinmektedir.

Bu denklem flüdize yatağa ait (4.1) bağıntısına eşitlenirse,

$$J = \frac{150(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu}{\psi^2 \rho d^2 g} V + 1.75 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \frac{1}{\psi d} \frac{V^2}{g} = \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) (1-\epsilon) \quad (4.43)$$

bulunur. Gerekli kısaltmalar yapılırsa V ye göre 2 ci dereceden bir denklem ortaya çıkar,

$$1.75 \frac{1}{\psi d g} \frac{1}{\epsilon^3} V^2 + 150 \frac{\mu}{\psi^2 d^2 g \rho} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} V - \frac{\rho_t - \rho}{\rho} = 0 \quad (4.44)$$

Bu denklemin köklerini teşkil eden V geri yıkama hızı için,

$$V_{1,2} = \frac{-\frac{150\mu}{\psi^2 d^2 g \rho} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \pm \sqrt{\frac{150^2 \mu^2}{\psi^4 d^4 g^2 \rho^2} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^6} + 4 \frac{1.75}{\psi d g} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho}\right) \frac{1}{\epsilon^3}}}{2 \frac{1.75}{\psi d g} \frac{1}{\epsilon^3}} \quad (4.45)$$

yazılabilir ve düzenlenirse,

$$V = V_1 = \frac{-150\mu}{3.5 \psi d \rho} (1-\epsilon) + \sqrt{\frac{150^2 \mu^2 (1-\epsilon)^2}{3.5^2 \psi^2 d^2 \rho^2} + \frac{7}{3.5^2} \psi d g \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho}\right) \epsilon^3} \quad (4.46)$$

elde edilir. Sabit terimleri K ile göstermek suretiyle önceki ifadelerde yapıldığı gibi (4.46) bağıntısını (V/K) şeklinde yazmak mümkün olamamaktadır. Bu sebeple ρ ve μ nün 20°C su sıcaklığındaki değerleri ve $d = 0.25$ mm ve $d = 0.50$ mm lik iki ayrı kum çapı için Tablo 4.5 deki sonuçlar hesaplanmıştır.

Tablo 4.5. İki Ayrı Tane Çapı İçin ϵ 'nin Çeşitli Değerlerine Karşı Hesaplanan Geri Yıkama Hızları ($\psi = 1$, $\rho_t = 2.65$ gr/cm³, $\rho = 0.9982$ gr/cm³, $\mu = 0.01002$ gr/cm.sn).

d = 0.25 mm		d = 0.50 mm	
ϵ	V (cm/sn)	ϵ	V (cm/sn)
0.40	0.07	0.40	0.28
0.50	0.17	0.50	0.63
0.60	0.36	0.60	1.23
0.70	0.72	0.70	2.17
0.80	1.43	0.80	3.45
0.90	2.74	0.90	5.02
1.00	4.82	1.00	6.81

Yukarda verilen tabloya bağlı olarak (4.46) bağıntısı Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 da grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 4.5 den, $d = 0.25$ mm için,

$$V_i = \alpha K = 3.1$$

$$n = 4.19$$

ve Şekil 4.6 dan da $d = 0.50$ mm için,

$$V_i = \alpha K = 8$$

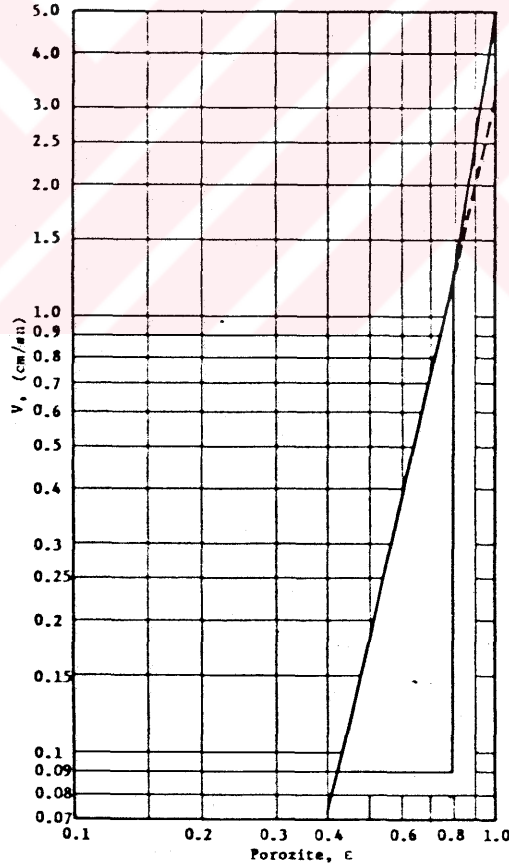
$$n = 3.64$$

elde edilmektedir. Buna göre (4.12) bağıntısı

$$V \approx 3.1 \varepsilon^{4.19} \quad (d = 0.25 \text{ mm için}) \quad (4.47)$$

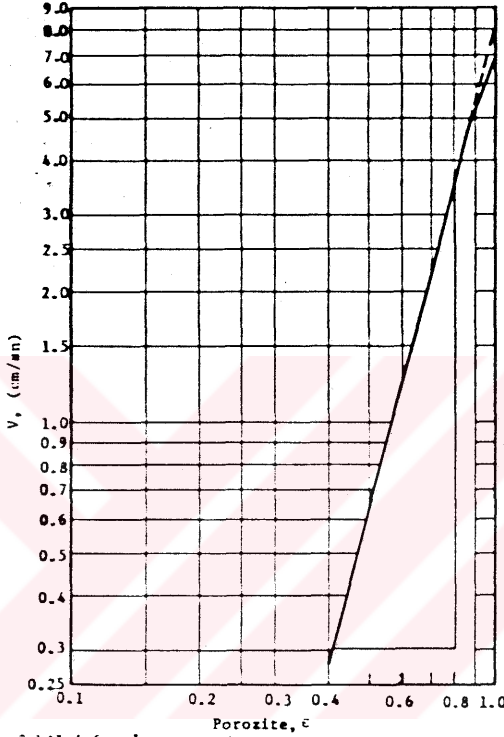
$$V \approx 8 \varepsilon^{3.64} \quad (d = 0.50 \text{ mm için}) \quad (4.48)$$

olur. (4.47) ve (4.48) bağıntılarının geçerlilik bölgeleri sırasıyla $0.40 \leq \varepsilon \leq 0.80$, $0.40 \leq \varepsilon \leq 0.88$ şeklinde ifade edilebilir.

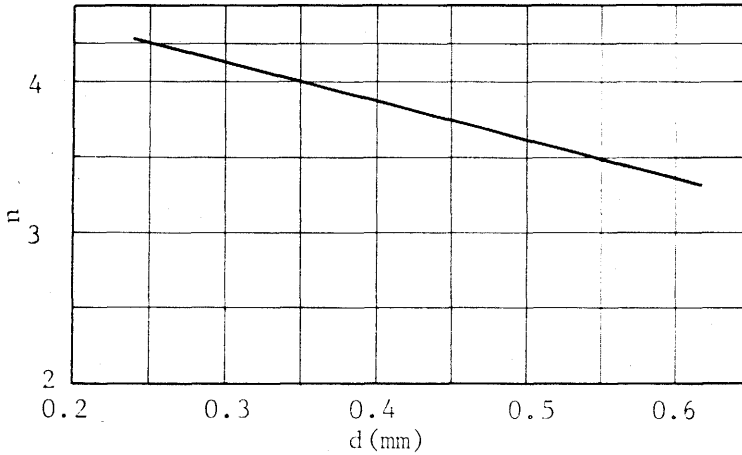


Şekil 4.5. ε 'nin çeşitli değerlerine karşı hesaplanan (4.46) bağıntısı ($d = 0.25$ mm için).

Görüldüğü üzere nonlineer akım halinde n değeri tane çapı ile bir parça değişmektedir. Bu değişimi tesbit etmek için yukarıdaki işlemler değişik çaplarla tekrarlanmış ve n ile d arasındaki bağıntı Şekil 4.7 de gösterildiği gibi tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. ϵ 'nın çeşitli değerlerine karşı hesaplanan (4.46) bağıntısı ($d = 0.50$ mm için).



Şekil 4.7. n 'in d ile değişimi.

Huisman nonlinearer bölge için hidrolik eğim ifadesini,

$$J = 150 \frac{v^{0.8}}{g} \frac{(1-\epsilon)^{1.8}}{\epsilon^3} \frac{v^{1.2}}{d^{1.8}} \quad (4.49)$$

olarak vermiştir(22), (56). Daha önce (3.5) bağıntısıyla verilen Huisman denklemindeki C' nün 150 olduğu böylece görülmüş olur. (4.49) bağıntısı (4.1) denkleminde eşitlenir ve V ye göre düzenlenirse,

$$150 \frac{v^{0.8}}{g} \frac{(1-\epsilon)^{1.8}}{\epsilon^3} \frac{v^{1.2}}{d^{1.8}} = \frac{(\rho_t - \rho)}{\rho} (1-\epsilon) \quad (4.50)$$

$$V = \left\{ \frac{1}{150} \frac{g}{v^{0.8}} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) d^{1.8} \right\}^{1/1.2} \frac{\epsilon^{3/1.2}}{(1-\epsilon)^{0.8/1.2}} \quad (4.51)$$

elde edilir. Bu bağıntıdaki sabitler, daha önce olduğu gibi K ile gösterilirse F(ε) fonksiyonu,

$$\frac{V}{K} = \frac{\epsilon^{3/1.2}}{(1-\epsilon)^{0.8/1.2}} = F(\epsilon) \quad (4.52)$$

olur. F(ε) fonksiyonunun hesaplanan değerleri Tablo 4.6 ya yazılmış ve grafik olarakda Şekil 4.8 de gösterilmiştir.

Tablo 4.6. ε'nun Çeşitli Değerlerine Karşı (V/K) nın Hesabı

ε	$F(\epsilon) = \frac{\epsilon^{3/1.2}}{(1-\epsilon)^{0.8/1.2}}$
0.40	0.143
0.50	0.281
0.60	0.52
0.70	0.92
0.80	1.68
0.90	3.59
1.00	∞

Şekil 4.8 den $\alpha = 3$ ve $n = 3.32$ elde edilir ve (4.11) ve (4.52) bağıntıları sırasıyla,

$$F(\epsilon) \cong 3.00 \epsilon^{3.32} ; 0.40 \leq \epsilon \leq 0.70 \quad (4.53)$$

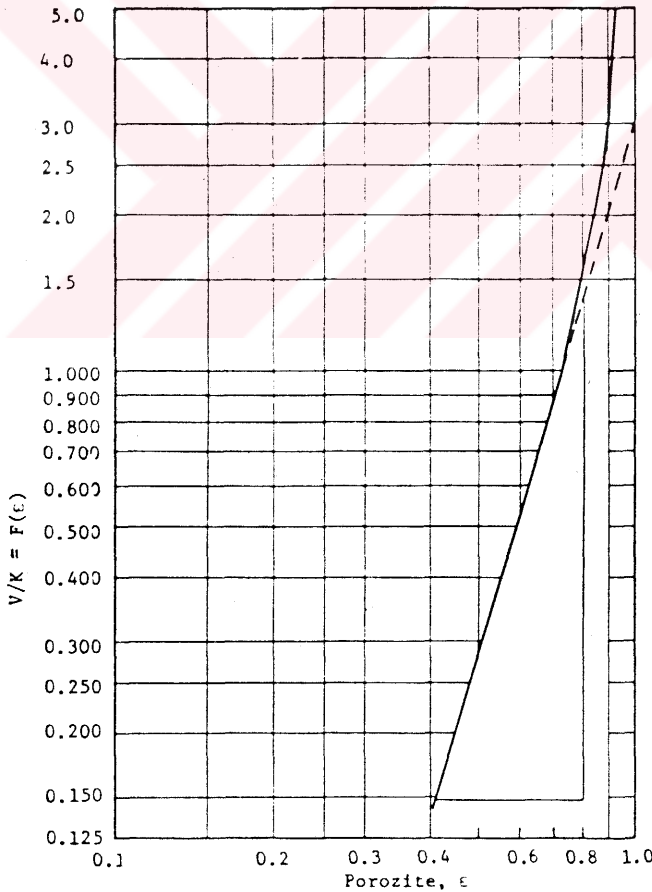
$$V \cong \alpha K \epsilon^n = 3 \left\{ \frac{1}{150} \frac{g}{\sqrt{0.8}} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) d^{1.8} \right\}^{1/1.2} \epsilon^{3.32} \quad (4.54)$$

$$\alpha = 3 ; K = \left\{ \frac{1}{150} \frac{g}{\sqrt{0.8}} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) d^{1.8} \right\}^{1/1.2}$$

olur. (4.54) bağıntısı (1.7) denklemiyle karşılaştırılırsa,

$$n = 3.32$$

$$V_i = 3 K \quad \text{elde edilir.}$$



Şekil 4.8. (4.52)bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu.

Muslu (1970, 1976, 1976) sınır tabakası teorisini kullanmak suretiyle boşluklu malzemedeki nonlinear akım için,

$$J = \frac{\lambda}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (4.55)$$

$$\lambda = \frac{\bar{\psi}}{\omega^2} \frac{12.06 C_D}{(1-\epsilon)^{1/3} F_1^2(Re_S, \epsilon)} \quad (4.56a)$$

$$Re' = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (4.56b)$$

$$Re' = 0.353 \omega (1-\epsilon)^{2/3} F_1(Re_S, \epsilon) Re_S \quad (4.56c)$$

denklemlerini vermiştir(57), (58), (60). $Re_S \leq 125$ olması halinde sonuçlar C_D katsayılarının nümerik hesabında yapılan hata sınırları içinde Darcy kanununa uyar, yani lineer akım bölgesine düşer. Bu ifadelerde geçen $\bar{\psi}$ katsayısı Reynolds sayısının, malzeme boyutunun ve şeklinin fonksiyonudur. λ sürtünme katsayısıdır. ω malzemenin yerleşmesi ile alakalıdır. C_D bir taneye ait direnç katsayısıdır. Re_S sınırsız ortamdaki akımda tek bir küre için Reynolds sayısıdır. $F_1(Re_S, \epsilon)$ Reynolds sayısının ve porozitenin fonksiyonu olan büyüklüktür.

Muslu lineer akım bölgesi için verdiği (4.26) numaralı bağıntıda geçen ve tane boyut dağılımını karakterize eden ψ_1 ile (4.56) bağıntısında geçen $\bar{\psi}$ katsayıları arasında,

$$\bar{\psi} = \psi_1 F_2(Re_S) \quad (4.57)$$

münasebetini vermiştir. $F_2(Re_S)$ Reynolds sayısının fonksiyonu olan büyüklüktür. Bu bağıntı (4.56a) denkleminde yerine konursa,

$$\lambda = \frac{\psi_1}{\omega^2} \frac{12.06 C_D \cdot F_2(Re_S)}{(1-\epsilon)^{1/3} F_1^2(Re_S, \epsilon)} \quad (4.58)$$

elde edilir. İdeal şekilde dizilmiş küre yığınlarında $\omega = \psi_1 = 1$ olduğu daha önce belirtilmiştir. Bu durumda (4.58) bağıntısı küresel malzeme için,

$$\lambda = \frac{12.06 C_D \cdot F_2(Re_S)}{(1-\epsilon)^{1/3} F_1^2(Re_S, \epsilon)} \quad (4.59)$$

haline gelir. Bu denklemde geçen $C_D \cdot F_2(Re_s)$ çarpımının çeşitli Re_s sayılarına tekabül eden değerleri Tablo 4.7 de ve yine aynı bağıntıda geçen $F_1(Re_s, \epsilon)$ fonksiyonunun çeşitli ϵ ve Re_s değerlerine karşı olan tekabülleri de Tablo 4.8 de verilmektedir.

Tablo 4.7. Değişik Re_s İçin $C_D \cdot F_2(Re_s)$ Değerleri(57).

Re_s	60	80	100	125	150	200	250	300	400
$C_D \cdot F_2(Re_s)$	1.210	1.056	0.947	0.845	0.777	0.666	0.595	0.542	0.472
Re_s	600	800	1000	2000	4000	6000	8000	10000	20000
$C_D \cdot F_2(Re_s)$	0.440	0.430	0.432	0.435	0.447	0.449	0.450	0.448	0.416

Tablo 4.8. Re_s ve ϵ 'nin Fonksiyonu Olan $F_1(Re_s, \epsilon)$ Değerleri(60).

Re_s	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48
60	0.029219	0.037825	0.045592	0.056526	0.069216	0.084507	0.101910	0.123924	0.146833	0.173183	0.204990	0.240405
80	0.034441	0.043057	0.051636	0.066048	0.081184	0.098413	0.119009	0.142649	0.169589	0.201213	0.237520	0.277238
100	0.038993	0.048685	0.060518	0.074344	0.091366	0.111091	0.131982	0.159921	0.190703	0.225115	0.263985	0.308972
150	0.048630	0.060485	0.077175	0.092246	0.112471	0.136221	0.163868	0.195707	0.232083	0.273377	0.319984	0.372354
200	0.056578	0.070218	0.087176	0.106143	0.129908	0.157091	0.188426	0.224248	0.264840	0.310599	0.361916	0.419333
250	0.063409	0.078561	0.096916	0.118715	0.144408	0.174167	0.208352	0.247827	0.291506	0.340687	0.395478	0.457330
300	0.063462	0.085922	0.105854	0.129228	0.157267	0.188769	0.225618	0.266891	0.312036	0.365660	0.422997	0.487137
400	0.079666	0.097959	0.120637	0.146975	0.177710	0.213344	0.252412	0.299829	0.348691	0.404490	0.465521	0.532767
600	0.095207	0.116489	0.142470	0.172810	0.207594	0.247384	0.292261	0.341658	0.396415	0.456505	0.527546	0.591445
800	0.106594	0.129845	0.158196	0.190930	0.228504	0.271076	0.318621	0.371125	0.428504	0.490646	0.557589	0.628155
1000	0.115377	0.140066	0.170045	0.196349	0.244301	0.288866	0.338358	0.393101	0.451811	0.514906	0.582237	0.653152
2000	0.140950	0.169386	0.204496	0.240037	0.289262	0.359065	0.393159	0.453238	0.511905	0.576212	0.643875	0.715200
4000	0.162636	0.194843	0.233724	0.277945	0.326911	0.379633	0.345182	0.493622	0.554877	0.619184	0.686847	0.758170
6000	0.173312	0.207331	0.248270	0.294454	0.344824	0.398075	0.453932	0.512372	0.573627	0.637934	0.705597	0.776922
8000	0.179977	0.215250	0.257564	0.304848	0.355785	0.409158	0.465015	0.523455	0.584710	0.649017	0.716680	0.788005
10000	0.184770	0.220835	0.264118	0.312142	0.363207	0.416688	0.472545	0.530985	0.592240	0.656547	0.724210	0.795535
20000	0.197143	0.235605	0.281407	0.330449	0.381725	0.435206	0.491063	0.549503	0.610758	0.675065	0.742728	0.814053
40000	0.206510	0.241003	0.294235	0.343409	0.394685	0.448166	0.504023	0.562463	0.623718	0.688025	0.751688	0.827013
60000	0.210811	0.252447	0.299872	0.349108	0.400384	0.453865	0.509722	0.568162	0.629417	0.693724	0.761387	0.832712
80000	0.213447	0.255731	0.303265	0.352501	0.403777	0.457258	0.513115	0.571555	0.632810	0.697117	0.764780	0.836105

Üniform ve küresel malzemelerde $Re_s < 125$ ve $Re_s > 6000$ için $F_2(Re_s) = 1$ dir(58). Bu iki hal için (4.59) denklemi,

$$\lambda = \frac{12.06 C_D}{(1-\epsilon)^{1/3} \cdot F_1^2(Re_s, \epsilon)} ; Re_s < 125 \quad (4.60)$$

ve

$$Re_s > 6000$$

olur. $125 \leq Re_s \leq 6000$ aralığında (4.59) bağıntısı kullanılacaktır.

(4.55) ve (4.56) bağıntılarından bulunan J hidrolik eğimi flüidize yatağa ait yük kaybını veren (4.1) ifadesine eşitlenip V ye göre düzenlenirse,

$$J = \frac{\lambda}{d} \frac{V^2}{2g} = \frac{\rho_t - \rho}{\rho} (1-\epsilon) \quad (4.61)$$

$$V = \left\{ 2gd \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) \right\}^{1/2} \frac{(1-\epsilon)^{1/2}}{\lambda^{1/2}} \quad (4.62)$$

elde edilir. Burada,

$$K = \left\{ 2gd \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) \right\}^{1/2} \quad (4.63)$$

(4.62) bağıntısı K cinsinden yazılırsa,

$$\frac{V}{K} = \frac{(1-\epsilon)^{1/2}}{\lambda^{1/2}} = F(\epsilon) \quad (4.64)$$

olur. λ nın (4.59) ve (4.60) denklemlerindeki değerleri (4.64) bağıntısında yerine konmak suretiyle V/K hesaplanacaktır. (4.59) bağıntısıyla verilen λ değeri (4.64) denkleminde yerine konursa,

$$\frac{V}{K} = \frac{(1-\epsilon)^{1/2}}{\left\{ \frac{12.06 \cdot C_D \cdot F_2(Re_s)}{(1-\epsilon)^{1/3} \cdot F_1^2(Re_s, \epsilon)} \right\}^{1/2}} \quad (4.65)$$

elde edilir. Seçilen Re_s değeri için Tablo 4.7 den alınan

$C_D \cdot F_2(Re_s)$ fonksiyonu ve her Re_s için ε nun değişik değerlerine tekabül eden $F_1(Re_s, \varepsilon)$ Tablo 4.8 den alınarak (4.65) de yerine konmak suretiyle hesap yapılmıştır. Bir örnek olmak üzere $Re_s = 60$ için hesaplar gösterilmiştir:

$Re_s = 60$ için Tablo 4.7 den $C_D \cdot F_2(Re_s) = 1.210$ bulunur. (4.65) denkleminde $C_D \cdot F_2(Re_s) = 1.210$ konulursa,

$$\frac{V}{K} = \frac{(1-\varepsilon)^{1/2}}{\left\{ \frac{(12.06)(1.210)}{(1-\varepsilon)^{1/3} F_1^2(Re_s, \varepsilon)} \right\}^{1/2}}$$

olur. Tabii kum yığınlarında porozite 0.40 civarında olduğundan $\varepsilon > 0.38$ için işlem yapılmıştır. Bu sebeple $Re_s = 60$ için Tablo 4.8 den $\varepsilon \geq 0.38$ e tekabül eden $F_1(Re_s, \varepsilon)$ değerleri alınır ve yukardaki denklemde her $\varepsilon, F_1(Re_s, \varepsilon)$ sayı çifti yerine konursa,

$\varepsilon = 0.38$ için	$V/K = 0.019$
$\varepsilon = 0.40$ için	$V/K = 0.023$
$\varepsilon = 0.42$ için	$V/K = 0.027$
$\varepsilon = 0.44$ için	$V/K = 0.031$
$\varepsilon = 0.46$ için	$V/K = 0.036$
$\varepsilon = 0.48$ için	$V/K = 0.041$

elde edilir. Diğer Re_s sayıları için benzer tarzda yapılan hesapların sonuçları Tablo 4.9 da topluca verilmiş ve Şekil Ek.1.1 ilâ Şekil Ek.1.18 de de grafik olarak gösterilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen α ve n değerleri Tablo 4.10 da ve n nin Re_s e bağlı olarak değişimide Şekil 4.9 da grafik olarak sunulmuştur.

Tablo 4.10 dan da görüleceği üzere n, Re_s in bir fonksiyonudur. $Re_s \leq 125$ için akım lineer bölgede kaldığından Tablo 4.10 da bu Reynolds sayılarına tekabül eden n değerlerinin C_D katsayılarının hesabında yapılan nümerik hataların tolerans sınırı içinde olmak üzere daha önce Şekil 4.4 de bulunan n değerinin ($\bar{n} = 3.17$) civarında değiştiği görülmektedir.

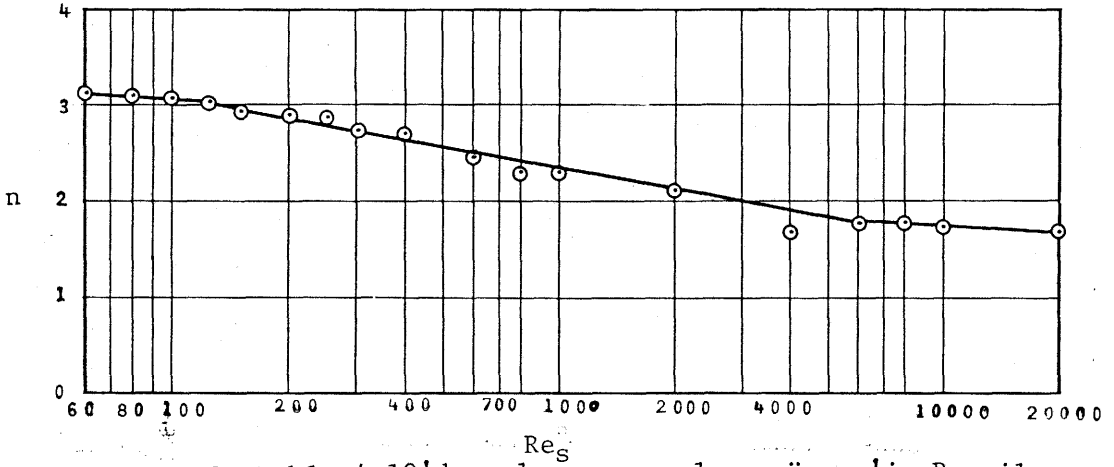
$Re_s > 125$ için akım nonlineer bölgeye girer. Bu halde n değeri Re_s büyüdükçe 2.96 dan 1.72 ye kadar azalmaktadır.

Tablo 4.9. Çeşitli Re_s Sayıları İçin, ϵ 'nin Değişik Değerlerine Karşı Hesaplanan $V/K = F(\epsilon)$ Fonksiyonu.

$Re_s = 60$	$Re_s=80$	$Re_s=100$	$Re_s=125$	$Re_s=150$	$Re_s=200$	$Re_s=250$	$Re_s=300$	$Re_s=400$
ϵ	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K
0.38	0.019	0.024	0.028	0.034	0.039	0.048	0.057	0.064
0.40	0.023	0.028	0.034	0.040	0.046	0.056	0.066	0.074
0.42	0.027	0.033	0.039	0.046	0.053	0.065	0.076	0.085
0.44	0.031	0.038	0.045	0.053	0.061	0.075	0.086	0.097
0.46	0.036	0.044	0.052	0.061	0.069	0.085	0.098	0.110
0.48	0.041	0.050	0.059	0.069	0.079	0.096	0.110	0.123
								0.144
$Re_s = 600$	$Re_s=800$	$Re_s=1000$	$Re_s=2000$	$Re_s=4000$	$Re_s=6000$	$Re_s=8000$	$Re_s=10000$	$Re_s=20000$
ϵ	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K	V/K
0.38	0.092	0.102	0.108	0.125	0.108	0.142	0.145	0.148
0.40	0.106	0.116	0.123	-	0.151	0.157	0.160	0.163
0.42	0.120	0.131	0.138	0.156	0.166	0.172	0.175	0.177
0.44	-	0.146	0.153	0.171	0.181	0.186	0.189	0.192
0.46	0.150	0.162	0.169	0.186	0.196	0.201	0.204	0.207
0.48	0.166	0.178	0.185	0.202	0.211	0.216	0.219	0.221
								0.235

Tablo 4.10. Şekil Ek.1.1 - Şekil Ek.1.18 den Elde Edilen α ve n Değerleri (Değişik Re_s ler İçin).

Re_s	α	n
60	0.42	3.16
80	0.49	3.08
100	0.57	3.08
125	0.64	3.04
150	0.70	2.96
200	0.84	2.90
250	0.94	2.89
300	0.97	2.74
400	1.10	2.70
600	1.05	2.46
800	1.01	2.31
1000	1.02	2.30
2000	0.98	2.10
4000	0.74	1.69
6000	0.82	1.80
8000	0.82	1.80
10000	0.82	1.74
20000	0.83	1.72



Şekil 4.9. Tablo 4.10'dan alınan sonuçlara göre n 'in Re_s ile değişim grafiği.

(4.11) ifadesi (4.65) de yerine konursa,

$$V = \alpha \cdot K \cdot \epsilon^n \quad (4.12)$$

veya

$$V = \alpha \left\{ 2gd \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) \right\}^{1/2} \epsilon^n \quad (4.66)$$

yazılabilir. Bu denklemde α ve n nin değişik Re_s e karşı gelen değerleri Tablo 4.10 dan alınabilir.

Tablo 4.10 daki değerler sınır tabakası teorisi kullanılarak elde edilmiş olmakla beraber Tablo 1.1 de verilen Richardson ve Zaki'nin ampirik sonuçları ile bir uyum göstermektedir. Aradaki fark, dağılan deney noktalarına uygun bir doğru geçirilirken yapılmış hatalardan ileriye gelmektedir.

4.3. Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde taneli malzeme içinde birim boydaki yük kaybını veren çeşitli araştırmacılara ait lineer ve nonlineer akım bölgesine ait değişik bağıntılardan ve flüdize yatağa ait yük kaybı denkleminin istifade etmek suretiyle geri yıkama hızını veren değişik denklemler elde edilmiştir. Bu denklemler, kulla-

nılan filtre malzemesinin ve akışkanın değişik fiziksel parametrelerinin fonksiyonudur. Bu parametreler porozite, tane boyutu, tane özgül kütlesi, akışkan özgül kütlesi, akışkan viskozitesi olup bütün denklemlerde geçmektedir. Bu parametrelerden farklı olarak Ergun denkleminde malzemenin küreselliğini gösteren ψ sayısı ve Muslu'nun lineer ve nonlineer akım bölgesi için vermiş olduğu denklemlerde de sırasıyla malzemenin yerleşmesini ve tane boyut dağılımını karakterize eden ω ve ψ_1 katsayıları vardır. Ayrıca Muslu'nun nonlineer akıma ait denklemlerinde geçen $\bar{\Psi}$; $F_2(Re_S)$; $F_1(Re_S, \epsilon)$ büyüklükleride olaya etkileyen hidrolik faktörleri karakterize etmektedir.

Yukarda verilen ve geri yıkama hız ifadelerinde geçen parametrelere bakıldığında hızın aynı zamanda akışkan sıcaklığınada bağlı olduğu görülmektedir. Tasfiye tesislerinde filtrelerin geri yıkanması sırasında belli bir genleşme miktarını sağlamak için yaz aylarında daha büyük bir hızın uygulanması gerekmektedir. Aşağıda, geliştirilen denklemlerden (4.13) ifadesini kullanmak suretiyle, bu durum bir örnekle gösterilmiştir:

Bir kum filtreye ait dane çapı $d = 0.08$ cm dir. Bu filtrede genleşmiş yatak porozitesinin $\epsilon = 0.75$ olması için 25°C ve 40°C su sıcaklıklarındaki gerekli geri yıkama suyu hızını bulunuz.

$$\begin{aligned} 25^\circ\text{C su sıcaklığında } \rho_{su} &= 0.997 \text{ gr/cm}^3 \\ \mu_{su} &= 0.0089 \text{ gr/cm.sn} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 40^\circ\text{C su sıcaklığında } \rho_{su} &= 0.9922 \text{ gr/cm} \\ \mu_{su} &= 0.00653 \text{ gr/cm.sn} \end{aligned}$$

$$V \approx 0.4 \cdot 0.00809 \cdot \frac{d^2 \gamma}{\mu} \left(\frac{\rho_t - \rho}{\rho} \right) \epsilon^{1.980} \quad (4.13)$$

Yukarıda verilen değerler bu bağıntıda yerine konunca sırasıyla

$$V = 2.13 \text{ cm/sn } (25^\circ\text{C de})$$

$$V = 2.92 \text{ cm/sn } (40^\circ\text{C de})$$

elde edilir.

Geliştirilen hız ifadeleri minimum flüdizasyon hızını ve yük kaybının sabit kaldığı flüdize yatağın çeşitli safhalarındaki hızları bulmak için kullanılır. Bu hız denklemlerinde ϵ

yerine sabit yatak porozitesi konulursa minimum flüidizasyon hızı yaklaşık olarak bulunabilir. Bu hızın hesabı yatağın genleşmesi için gerekli minimum debinin bilinmesi bakımından önemlidir.

Bu bölümde elde edilen geri yıkama hız ifadelerinden yararlanılarak $V/K = F(\epsilon)$ şeklinde porozite fonksiyonları da geliştirilmiştir. Bu fonksiyonun logaritmik ölçekli bir dik koordinat sisteminde işaretlenmesi suretiyle elde edilen noktaların pratik olarak $F(\epsilon) \approx \alpha \epsilon^n$ denklemiyle ifade edilebileceği görülmüş ve V/K fonksiyonu $V/K\alpha \approx \epsilon^n$ tarzında yazılmıştır. Bu ifade son haliyle üniform boyutlu malzeme için Richardson ve Zaki tarafından verilmiş olan $V/V_i = \epsilon^n$ denkleminde benzemiş olup her iki bağıntının karşılaştırılmasıyla V_i ve n değerleri bulunmuştur. Buradan yatak genleşme katsayısı n nin lineer ve nonlinear akım bölgeleri için değişik değerleri elde edilmiştir. Ergun denkleminin kullanıldığı ve nonlinear akım bölgesine ait (4.46) bağıntısı yardımıyla hesaplanan n değeri tane çapı ile biraz değişmekte olup bu yönüyle diğer n lerden farklıdır.

Muslu'nun nonlinear akım bölgesi için verdiği denklemlerden (4.55) ve (4.56a) bağıntılarının kullanılmasıyla geliştirilen (4.64) numaralı V/K ifadesi Re_s in fonksiyonudur. Bu nedenle Tablo 4.10 da görülen yatak genleşme katsayıları da Re_s in fonksiyonudur. Muslu Re_s i sınırsız ortamdaki akımda tek bir küre için Reynolds sayısı olarak tariflemiş olup aynı tarif Tablo 1.1 de Richardson ve Zaki'ye ait n ifadelerindeki Re_s içinde geçerlidir. Bu bakımdan Tablo 1.1 deki (1.8), (1.9), (1.10), (1.11), (1.12) bağıntılarından hesaplanan n değerleri Muslu'ya ait Tablo 4.10 daki ve Şekil 4.9 daki n değerleri ile mukayese edildiğinde bir uyum bulunduğu görülmektedir. Böylece yatak genleşme katsayısı n nin geri yıkama olayında hidrolik bir faktör olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır.

BÖLÜM V

YATAK GENLEŞMESİNİN HESABI İÇİN UYGUN
BİR MATEMATİK MODELİN ARAŞTIRILMASI5.1. Filtrelerde Genleşmenin Hesabı İçin Uygun Bağıntılarının
Çıkarılması

Geri yıkamaya tabi tutulmuş bir filtre yatağında, uygulanan geri yıkama hızının logaritması ile, genleşmiş yatağın porozitesinin logaritması arasında $\log V = \log V_i + n \log \epsilon$ şeklinde lineer bir bağıntının olduğu daha önceki bölümlerde belirtilmiştir. Şekil 3.2 den de görüleceği üzere bu lineer bağıntının eğimi, n ile gösterilmekte olan yatak genleşme katsayısıdır. Tablo 1.1 de açıklandığı üzere bazı araştırmacılar $V/V_i = \epsilon^n$ yerine $V/V_s = \epsilon^n$ ifadesini kullanmışlardır. Bu denklemlerdeki n katsayısı için literatürde çeşitli bağıntı ve büyüklükler tarif edilmiştir (Tablo 1.1'e bkz.). Kısım 1.2 de Tablo 1.1 de verilen ve bu Tablo dışında açıklanan diğer denklemlerin bir kısmı küresel bir kısmı ise tabii malzeme için çıkarılmış olup çok sayıda bağıntının teklif edilmiş olması problemin tam olarak çözülmemiş olduğunu göstermektedir. Bu sebeple aşağıda tarafımızdan gerek tabii ve gerekse küresel malzeme için tatbik edilebilen genel bir bağıntı geliştirilecek ve deney neticeleri ile karşılaştırılacaktır.

Hareket noktası olarak Tablo 1.1 de Richardson ve Zaki(6) tarafından küresel malzeme için verilmiş olan n değerlerinden istifade edilecektir. Bilindiği üzere geri yıkamanın çoğunlukla türbülanslı akım bölgesinde olacağını gözönüne almak suretiyle,

$$n_{\text{küresel}} = (4.45 + 18 \frac{d}{D}) \text{Re}_s^{-0.1} \quad (1.10)$$

$$n_{\text{küresel}} = 4.45 \text{Re}_s^{-0.1} \quad (1.11)$$

bağıntıları yazılabilir. Cleasby ve Fan(9) küresel olmayan malzemeye bu denklemleri tatbik etmek için, dinamik şekil faktörü olan DSF ve küreselliği gösteren ψ değerlerini de bu bağıntılara ayrı ayrı dahil etmişlerdir. Bu metodla elde edilen ve küresel olmayan malzemeye ait olan n_{model} ile deney sonuçlarından elde edilen $n_{\text{gerçek}}$ arasında bir korelasyon mevcuttur. Bu çalışmada ise bu korelasyondan daha iyi bir korelasyon elde edebilmek için küresel olmayan malzemeye ait birbirinden farklı iki ayrı n_{model} ifadesi geliştirilmiştir. Bu modellerden birinde V_s/V_n diğ erinde de d_h/d_n oranları alınmış olup küresel malzemeler için bu oranlar 1'e eşittir.

Rastgele bir şekle haiz ve iki elek arasında kalan uniform boyutlu malzemenin deney sonucunda (1.7) bağıntısına göre elde edilen genleşme katsayısını $n_{\text{gerçek}}$, bu malzemeye ait eşdeğer tane çapını d_n ve V_s 'i kullanmak suretiyle küresel malzeme için hesaplanmış olan genleşme katsayısını da $n_{\text{küresel}}$ notasyonları ile gösterilsin. Küresel malzemeye ait $n_{\text{küresel}}$ 'i küresel olmayan malzemeye ait $n_{\text{gerçek}}$ 'e bağlamak için, $n_{\text{küresel}}$ 'in yukarda belirtilen V_s/V_n ile ve d_h/d_n ile çarpılması gerektiğini gözönüne alarak,

$$n_{\text{gerçek}} = n_{\text{küresel}} \left(\frac{d_h}{d_n} \right)^a \quad (5.1)$$

$$n_{\text{gerçek}} = n_{\text{küresel}} \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^{a'} \quad (5.2)$$

yazılabilir. İki elek arasındaki bir malzeme için laboratuarda tesbit edilebilecek d_n ve V_s değerlerinden yararlanmak suretiyle $n_{\text{küresel}}$ hesaplanabilir. Malzemenin deney yaparak değişik geri yıkama hızlarındaki genleşmesine bağlı olarak $\log V$ - $\log \epsilon$ diyagramı çizilir ve meydana gelen doğrunun eğimi regresyan analiziyle bulunur. Elde edilen n değeri deney neticelerine bağlı olarak bulunduğu için (5.1) ve (5.2) denklemlerindeki $n_{\text{gerçek}}$ değerini teşkil eder (Tablo 5.2 ye bkz.). d_h/d_n ve V_s/V_n oranlarının da bulunmasından sonra denklemlerde üs olarak geçen a ve a' değerleri kolayca hesaplanabilir. (5.1) ve (5.2) bağıntılarını sağlayan bu a ve a' parametreleri o şekilde değişkenlerin fonksiyonu olmalıdır ki, bu değişkenlere bağlı olan ifadelerden çözülen yeni a ve a' değerleri yukarda bahsedilen denklemlere konduğunda elde edilen n değerleri, deneyle bulunan $n_{\text{gerçek}}$ değerlerine mümkün olduğu kadar yakın olsun. Bu yakınlığın derecesi r korelasyon katsayısı ile ifade edilir. Bu n değerleri yukardaki (5.1) ve (5.2) denklemlerinden hesaplanmış olduğundan $n_{\text{gerçek}}$ değerleri ile aralarında belirli bir hata

farkı bulunacaktır. İşte bu n değerleri n_{model} değerleri olarak alınacaktır. Bu durumda (5.1) ve (5.2) bağıntıları aşağıdaki tarzda ifade edilebilir.

$$n_{\text{model}} = n_{\text{küresel}} \left(\frac{d_h}{d_n} \right)^a \quad (5.3)$$

$$n_{\text{model}} = n_{\text{küresel}} \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^{a'} \quad (5.4)$$

(5.3) ve (5.4) ifadelerinin elde edilmesinde, aşağıda görüleceği üzere 9 numaralı referansda verilmiş olan değişik boyut ve tipteki malzemelere ait bilgiler gözönüne alınmıştır. Referans (9) dan alınan bu bilgiler ve $n_{\text{gerçek}}$ değerleri Tablo 5.1 ve Tablo 5.2 de verilmektedir.

Tablo 5.1. Çeşitli Filtre Malzemelerine Ait Bilgiler(9).

Malzeme Cinsi	Tabii Kum No.1 ⁺				Antrasit No.1 ⁺				Kırma Kum No.1 [*]	Antrasit No.2 ⁺		Tabii Kum No.2 ⁺
Malzemeyi Sınırlayan Elek Numarası	10/12	14/16	18/20	30/35	5/6	6/7	7/8	12/14	18/22	25/30	18/22	25/30
Malzemeyi Geçiren Elek Delik Çapı (mm)	2.0	1.1	1.00	0.59	4.00	3.36	2.83	1.68	0.853	0.599	0.853	0.599
Malzemeyi Tutan Elek Delik Çapı (mm)	1.68	1.19	0.84	0.50	3.36	2.83	2.38	1.41	0.699	0.500	0.699	0.500
d_n (mm)	1.962	1.463	1.006	0.598	3.663	3.115	2.826	1.516	0.782	0.526	0.815	0.505
ρ_t (g/cm ³)	2.65	2.65	2.65	2.65	1.73	1.73	1.73	1.70	2.62	2.62	1.46	1.46
V_g 25°C de (cm/sn)	17.13	16.35	12.58	8.17	12.25	11.12	10.46	6.95	8.21	6.03	3.94	2.83
Re_n 25°C de	20	266	143	54.7	503	388	331	118	71.5	35.3	35.7	15.9
DSF	0.459	0.524	0.580	0.680	0.198	0.199	0.188	0.258	0.410	0.488	0.466	0.695

⁺ Amerikan Standard Elek Serisi Kullanılmıştır.

^{*} İngiliz Standard Elek Serisi Kullanılmıştır.

Tablo 5.2. Değişik Filtre Malzemesinin Değişik Boyutları İçin 25°C Su Sıcaklığında Deneyisel Olarak Bulunan $n_{gerçek}$ Değerleri(9).

Malzemeyi sınırlayan eleme numarası	Su sıcaklığı: °C	$n_{gerçek}$
Tabii Kum No.1		
10-12	25	2.629
14-16	25	2.998
18-20	25	3.169
30-35	25	3.384
Antrasit No.1		
5-6	25	2.834
6-7	25	2.670
7-8	25	2.808
12-14	25	3.916
Kırma Kum No.1		
18-22	25	3.801
25-30	25	4.049
Antrasit No.2		
18-22	25	4.380
25-30	25	4.498
Tabii Kum No.2		
18-22	25	3.212

Tablo 5.1 de verilen malzemelerle yapılan flüidizasyon deneylerinde iç çapı 101.6 mm ve 52 mm olan kolonların kullanıldığı 9 nolu referansda belirtilmektedir.

Tablo 5.1 de verilen bilgilerin ve (1.10), (1.11) denklemlerinin yardımıyla (5.1) ve (5.2) bağıntılarındaki $n_{küresel}$ 'i tespit etmek mümkündür. Hesap sonuçları Tablo 5.3 de verilmiştir. Bu değerlerin dışında, (d_h/d_n) ve (V_s/V_n) oranlarını hesaplamak için, (2.5), (2.6), (2.7) ve (2.8) denklemlerinden ve Tablo 2.1 ve Tablo 5.1 den istifade edilmiştir.

Önce (2.5) denklemi vasıtasıyla $C_D Re_n^2$ hesaplanarak Tablo 2.1 den buna tekabül eden Re_n alınmış ve (2.6) bağıntısıyla da V_n hesaplanmıştır. Daha sonra (2.7) ifadesiyle (C_D/Re) bulunmuş ve Tablo 2.1 de buna karşı gelen Re alınarak (2.8) denklemiyle d_h hesaplanmıştır. (Tablo 5.4 ve Tablo 5.5 e bkz.). Tablo 2.1 deki değerler için lineer enterpolasyon yapılamıyacağına dikkat etmek gerekir.

Tablo 5.1 den alınan V_s ve d_n değerleri yardımıyla hesaplanan V_s/V_n ve d_h/d_n oranları da Tablo 5.4 ve Tablo 5.5 e yazılmıştır. Artık bunlardan sonra Tablo 5.2, Tablo 5.3, Tablo 5.4 ve Tablo 5.5 yardımıyla (5.1) ve (5.2) denklemlerindeki a ve a' 'yü hesaplamak mümkündür. Çünkü bu denklemlerde a ve a' 'nün dışındaki bütün büyüklükler hesaplanmış bulunmaktadır. Elde edilen a ve a' 'değerleri Tablo 5.6 da toplu olarak gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Tablo 5.1 de Verilen Bilgileri Kullanarak Hesaplanan $\eta_{küresel}$ Değerleri.

Malzemeyi Sınırlayan Elekt Numarası	$Re_g (25^{\circ}C için)$	$\eta_{küresel}$
<i>Tabii Kum No.1</i>		
10-12	420	2.432
14-16	266	2.546
18-20	143	2.817
30-35	54.7	3.053
<i>Antrasit No.1</i>		
5-6	503	2.389
6-7	388	2.452
7-8	331	2.491
12-14	118	2.929
<i>Kırma Kum No.1</i>		
18-22	715	3.079
25-30	35.3	3.243
<i>Antrasit No.2</i>		
18-22	35.7	3.310
25-30	15.9	3.507
<i>Tabii Kum No.2</i>		
18-22	101.7	2.988

Tablo 5.4. Hesaplanan V_n Değerleri ve V_g/V_n Oranları.

Malzemeyi Sınırlayan Elekt Numarası	$C_D Re_n^2$	Re_n	$V_n (cm/sn)$	V_g/V_n
<i>Tabii Kum No.1</i>				
10-12	205538.3	630	28.66	19.13/28.66
14-16	85217.48	378	23.06	16.35/23.06
18-20	27707	188	16.68	12.58/16.68
30-35	5819.68	67.5	10.08	8.17/10.08
<i>Antrasit No.1</i>				
5-6	593113.26	1150	28.03	12.25/28.03
6-7	364734.81	870	24.93	11.12/24.93
7-8	272360.02	740	23.38	10.46/23.38
12-14	42045.98	248	14.60	6.95/14.60
<i>Kırma Kum No.1</i>				
18-22	12777.96	113	12.90	8.21/12.90
25-30	3888.64	51.1	8.67	6.03/8.67
<i>Antrasit No.2</i>				
18-22	4126.45	53.5	5.86	3.94/5.86
25-30	981.69	19.7	3.48	2.83/3.48
<i>Tabii Kum No.2</i>				
18-22	16712.92	136	14.28	10.75/14.28

Tablo 5.5. Hesaplanan d_h Değerleri ve d_h/d_n Oranları.

Malzemenin Sınırlayan Elekt Numarası	C_D/Re	Re	d_h (cm)	d_h/d_n (mm/mm)
<i>Tabif Kum No.1</i>				
10-12	0.00277	252	0.1176	1.176/1.962
14-16	0.00443	182	0.0994	0.994/1.463
18-20	0.00972	106	0.0752	0.752/1.006
30-35	0.03550	45	0.0492	0.492/0.598
<i>Antrasit No.1</i>				
5-6	0.00467	177	0.1289	1.289/3.663
6-7	0.00624	144	0.1156	1.156/3.115
7-8	0.00750	127	0.1084	1.084/2.826
12-14	0.02557	55.7	0.0715	0.715/1.516
<i>Kırma Kum No.1</i>				
18-22	0.03435	46	0.0500	0.500/0.782
25-30	0.08669	25.5	0.0378	0.378/0.526
<i>Antrasit No.2</i>				
18-22	0.08865	25	0.0566	0.566/0.815
25-30	0.23972	13.8	0.0435	0.435/0.505
<i>Tabif Kum No.2</i>				
18-22	0.01558	78	0.0648	0.648/0.850

Tablo 5.6. a ve a' değerleri.

Malzemenin Sınırlayan Elekt Numarası	(5.1) Denklemi İçin Hesaplanan "a" Değerleri	(5.2) Denklemi İçin Hesaplanan "a'" Değerleri
<i>Tabif Kum No.1</i>		
10-12	-0.1520	-0.1925
14-16	-0.4227	-0.4754
18-20	-0.4043	-0.4171
30-35	-0.5277	-0.4901
<i>Antrasit No.1</i>		
5-6	-0.1636	-0.2064
6-7	-0.0859	-0.1055
7-8	-0.12497	-0.1489
12-14	-0.3863	-0.3911
<i>Kırma Kum No.1</i>		
18-22	-0.4712	-0.4664
25-30	-0.6718	-0.6113
<i>Antrasit No.2</i>		
18-22	-0.7682	-0.7053
25-30	-1.6679	-1.2036
<i>Tabif Kum No.2</i>		
18-22	-0.2666	-0.2547

Çeşitli malzemelere ve deney şartlarına göre ortaya çıkan a ve a' değerlerinin hangi parametrelerin fonksiyonu olduğunu da tespit etmek gerekir ki, daha öncede ifade edildiği üzere $n_{gerçek}$ ve n_{model} arasında iyi bir korelasyon elde edilebilsin.

Bu çalışmada,

$$a = f \{Re_s, (d_h/d_n)\} \quad (5.5)$$

$$a' = F \{Re_s, (V_s/V_n)\} \quad (5.6)$$

şeklinde iki fonksiyonun geçerli olduğu kabul edilmiş, f ve F fonksiyonlarının tayini için IBM Application Program System/360'a ait çoklu bir lineer regresyon paket programı uygulanmıştır. Bu program regre adındaki bir ana program ile data adlı özel bir giriş alt programı ve corre, order, minv ve multtr adlı dört ayrı alt programdan meydana gelmektedir. Bütün bu programlar Ek.3 de verilmiştir (5.5) ve (5.6) bağıntılarına en uygun fonksiyonların aşağıda verilen ifadeler şeklinde olduğu bulunmuştur.

$$\log(-a) = b + c \log Re_s + d \log(d_h/d_n) \quad (5.7a)$$

veya

$$(-a) = 10^b \cdot Re_s^c \cdot (d_h/d_n)^d \quad (5.7b)$$

$$\log(-a') = b + c \log Re_s + d \log(V_s/V_n) \quad (5.8a)$$

veya

$$(-a') = 10^b \cdot Re_s^c \cdot (V_s/V_n)^d \quad (5.8b)$$

(5.7a) bağıntısına ait $\log Re_s$ ve $\log(d_h/d_n)$ ve (5.8a) ifadesi içinde $\log Re_s$ ve $\log(V_s/V_n)$ değerleri bağımsız, $\log a$ ve $\log a'$ değerleri de söz konusu denklemlere ait bağımlı değişkenler olmak üzere giriş datası olarak IBM kartlarına işlenmiştir. Giriş bilgisi Tablo 5.1, Tablo 5.4, Tablo 5.5 ve Tablo 5.6 dan yararlanmak suretiyle hazırlanmış olup, Tablo 5.7 ve Tablo 5.8 de verilmiştir.

Regresyonu icra eden Ek.3 deki program yardımıyla (5.7) ve (5.8) denklemlerindeki b , c ve d katsayıları bulunarak, a ve a' için,

Tablo 5.7. Çoklu Lineer Regresyon İçin Giriş Bilgisi.

$\log a$	a	Re_s	$\log Re_s$	(d_h/d_n)	$\log(d_h/d_n)$
-0.8182	0.1520	420	2.623	1.176/1.962	-0.2223
-0.3740	0.4227	266	2.425	0.994/1.463	-0.1679
-0.3933	0.4043	143	2.155	0.752/1.006	-0.1264
-0.2776	0.5277	54.7	1.738	0.492/0.598	-0.0847
-0.7862	0.1636	503	2.702	1.289/3.663	-0.4536
-1.0660	0.0859	388	2.589	1.156/3.115	-0.4305
-0.9032	0.12497	331	2.520	1.084/2.826	-0.4161
-0.4131	0.3863	118	2.072	0.715/1.516	-0.3264
-0.3268	0.4712	71.5	1.854	0.500/0.782	-0.1942
-0.1728	0.6718	35.3	1.548	0.378/0.526	-0.1435
-0.1145	0.7682	35.7	1.553	0.566/0.815	-0.1583
+0.2222	1.6679	15.9	1.201	0.435/0.505	-0.0648
-0.5741	0.2666	101.7	2.007	0.648/0.850	-0.1178

Tablo 5.8. Çoklu Lineer Regresyon İçin Giriş Bilgisi.

$\log a'$	a'	Re_s	$\log Re_s$	(V_s/V_n)	$\log(V_s/V_n)$
-0.7156	0.1925	420	2.623	19.13/28.66	-0.1756
-0.3229	0.4754	266	2.425	16.35/23.06	-0.1493
-0.3800	0.4171	143	2.155	12.58/16.68	-0.1225
-0.3097	0.4901	54.7	1.738	8.17/10.08	-0.0912
-0.6853	0.2064	503	2.702	12.25/28.03	-0.3595
-0.9767	0.1055	388	2.589	11.12/24.93	-0.3506
-0.8271	0.1489	331	2.520	10.46/23.38	-0.3493
-0.4077	0.3911	118	2.072	6.95/14.60	-0.3224
-0.3312	0.4664	71.5	1.854	8.21/12.90	-0.1962
-0.2137	0.6113	35.3	1.548	6.03/8.67	-0.1577
-0.1516	0.7053	35.7	1.553	3.94/5.86	-0.1724
+0.0805	1.2036	15.9	1.201	2.83/3.48	-0.0898
-0.5940	0.2547	101.7	2.007	10.75/14.28	-0.1233

$$a = -10^{0.81439} Re_s^{-0.5445} (d_h/d_n)^{0.6500} \quad r = 0.9273 \quad (5.7)$$

a

$$a = -6.5221 Re_s^{-0.5445} (d_h/d_n)^{0.6500}$$

$$a' = -10^{0.61458} Re_s^{-0.4468} (V_s/V_n)^{0.6644} \quad r = 0.8919 \quad (5.8)$$

a

$$a' = -4.1170 Re_s^{-0.4468} (V_s/V_n)^{0.6644}$$

ksiyonları elde edilmiştir. Korelasyon katsayıları da denklemlerin yanında görülmektedir. a ve a' 'yı veren bu bağıntılarla elde edilmesinden sonra (1.10) ve (1.11) denklemlerinin lanılmasıyla, daha önce genel şekli (5.3) ve (5.4) denklemiyle gösterilmiş olan (n) genleşme katsayısına ait aşağıdaki değerler bulunmuştur:

$$n_{\text{model}} = n_{\text{küresel}} (d_h/d_n)^a \quad (5.3)$$

$$n = (4.45 + 18 \frac{d}{D}) \text{Re}_s^{-0.1} (\frac{d_h}{d_n})^{-6.5221} \text{Re}_s^{-0.5445} (d_h/d_n)^{0.6500} \quad (5.9)$$

$$n = 4.45 \text{Re}_s^{-0.1} (d_h/d_n)^{-6.5221} \text{Re}_s^{-0.5445} (d_h/d_n)^{0.6500} \quad (5.10)$$

ve

$$n_{\text{model}} = n_{\text{küresel}} (V_s/V_n)^{a'} \quad (5.4)$$

$$n = (4.45 + 18 \frac{d}{D}) \text{Re}_s^{-0.1} (V_s/V_n)^{-4.1170} \text{Re}_s^{-0.4468} (V_s/V_n)^{0.6644} \quad (5.11)$$

$$n = 4.45 \text{Re}_s^{-0.1} (V_s/V_n)^{-4.1170} \text{Re}_s^{-0.4468} (V_s/V_n)^{0.6644} \quad (5.12)$$

Re_s Reynolds sayısına bağlı olarak (5.9), (5.11) denklemlerinin geçerlilik bölgesi $15.9 < \text{Re}_s < 200$ ve (5.10), (5.12) bağıntılarının da geçerlilik bölgesi $200 < \text{Re}_s < 503$ dür.

Bu denklemleri kullanmak suretiyle elde edilen n değerleri, mukayese için, $n_{\text{gerçek}}$ değerleri ile beraber Tablo 5.9 da verilmiştir.

(d_h/d_n) parametresini ihtiva eden modele göre tahmin edilen n değerleri ile $n_{\text{gerçek}}$ değerleri arasındaki lineer regresyon denklemi,

$$n_{\text{gerçek}} = -0.0669 + 1.0276 n_{\text{model}} ; r = 0.9762 \quad (5.13)$$

şeklindedir. (V_s/V_n) parametresini ihtiva eden n_{model} ile $n_{\text{gerçek}}$ arasındaki regresyon bağıntısı da

$$n_{\text{gerçek}} = -0.10145 + 1.03866 n_{\text{model}} ; r = 0.9791 \quad (5.14)$$

olarak bulunmuştur.

(5.13) ve (5.14) bağıntılarından da görüleceği üzere korelasyon katsayıları hayli yüksektir. Bu, $n_{\text{gerçek}}$ ile n_{model} arasında iyi bir yaklaşımın olmasını sağlayacak tarzda (5.9), (5.10), (5.11) ve (5.12) denklemleri içinde ortaya konmuş olan a ve a'

Tablo 5.9. $n_{gerçek}$ ve n_{model} Değerleri.

Elek boyutu	Sıcaklık $^{\circ}C$	$n_{gerçek}$	Tahmin edilen(n) $\{(d_h/d_n) \text{ modeli ile}\}$	Tahmin edilen(n) $\{(V_s/V_n) \text{ modeli ile}\}$
<u>Tabii Kum No.1</u>				
10-12	25	2.629	2.659	2.649
14-16	25	2.998	2.796	2.794
18-20	25	3.169	3.130	3.128
30-35	25	3.384	3.466	3.462
<u>Antrasit No.1</u>				
5-6	25	2.834	2.685	2.699
6-7	25	2.670	2.798	2.808
7-8	25	2.808	2.872	2.880
12-14	25	3.916	3.663	3.655
<u>Kırma Kum No.1</u>				
18-22	25	3.801	3.811	3.778
25-30	25	4.049	4.1625	4.11805
<u>Antrasit No.2</u>				
18-22	25	4.380	4.326	4.268
25-30	25	4.498	4.265	4.350
<u>Tabii Kum No.2</u>				
18-22	25	3.212	3.368	3.378

bağıntılarının nelerin fonksiyonu olduğunu tesbit edilmiş olduğunu göstermektedir.

5.2. Geliştirilen Matematik Model Yardımıyla Boyut İtibariyle Dereceli Filtre Malzemesinde Yatak Genleşmesinin Hesabı

Bu modelin uygulaması aşağıda adım adım verilmiştir:

1. Çeşitli çapta tane ihtiva eden derecelenmiş filtre malzemesinin, elek analizi yapılarak elde edilen sonuçlardan malzeme üniform boyutlu tabakalara bölünür. Her tabakanın ağırlığı, ortalama tane boyutu, eşdeğer tane çapı ve başlangıç kalınlığı bulunur.

2. Malzemeye ait sabit yatak porozitesi, malzeme özgül kütlesi ve her tabakaya ait d_h/d_n ve V_s/V_n oranlarının teşkili için d_h , d_n , V_s , V_n bulunur. d_h ve V_n in bulunuşu Kısım 1.2 de verilmiş olup d_n ,

$$d_n = (6 W / N \pi \rho_t)^{1/3} \quad (5.15)$$

formülü ile elde edilir. Bu ifadede N belli bir miktar malzemedeki tane sayısı olup diğer büyüklükler daha önce tanımlanmıştır. V_s , ya bir kolon içinde tanelerin engelsiz çökelme hızını ölçerek bulunur, veya DSF'nin bazı tabakalar için enterpolasyonla bulunan değerlerinden istifade ederek (2.21) no.lu

$$DSF = a \left(\frac{V_s}{V_n} \right) + b \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^2$$

formülden geri hesaplamak suretiyle elde edilir.

$$3. \text{ Her bir tabaka için } Re_s = \frac{\rho V_s d_n}{\mu} \text{ hesaplanır.}$$

4. Re_s 'e bağlı olarak her bir tabakaya ait n yatak genişleme katsayısı hesaplanır. Bu hesabın yapılabilmesi için (5.9), (5.10) veya (5.11), (5.12) bağıntılarıyla verilen ifadeler kullanılır.

$$5. V/V_i = \varepsilon^n \text{ ifadesindeki } V_i, (3.24) \text{ no.lu}$$

$$\frac{V_i}{V_s} = 0.90 (DSF)^{-0.262}$$

denklemleriyle hesaplanır.

6. Bu adımda, seçilen bir V geri yıkama hızı için her bir tabakanın genişlemiş haldeki porozitesi $V/V_i = \varepsilon^n$ formülüyle bulunur.

$$7. (1.30) \text{ numaralı}$$

$$l_o(1-\varepsilon_o) = l(1-\varepsilon)$$

bağıntısıyla, her bir tabaka için gözönüne alınan geri yıkama hızına tekabül eden,

$$\frac{1}{l_o} = \frac{(1-\varepsilon_o)}{(1-\varepsilon)} \quad (5.16)$$

$1/l_o$ oranları teşkil edilir.

8. Her bir tabakanın genleşmiş haldeki kalınlığı,

$$l = \frac{1}{l_0} \cdot l_0 \quad (5.17)$$

ifadesi ile hesaplanır.

9. Filtreyi teşkil eden diğer tabakalar için de, yukarda verilen hesap adımları aynı V geri yıkama hızı için tekrarlanıp, (5.17) formülüyle l değerleri bulunur. Bu şekilde hesaplanan l lerin toplanmasıyla, seçilen bir V geri yıkama hızına tekabül eden genleşmiş yatak kalınlığı bulunmuş olur. Bu işlemler, değişik geri yıkama hızlarındaki genleşmiş filtre yatak kalınlığını bulmak için tekrarlanır.

5.3. Yatak Genleşmesinin Hesabıyla İlgili Bilgisayar Programı

Kısım 5.2 de yatak genleşmesinin hesabında görüleceği üzere 8 nci adımda gözönüne alınan bir tabakanın çeşitli geri yıkama hızlarındaki kalınlığı ve 9 cu adımda da boyut itibarıyla derecelenmiş filtrenin her bir tabakasının değişik geri yıkama hızlarındaki kalınlıklarının bulunması sözkonusudur. Bu adımların elle hesaplanması zaman alıcı olduğundan, Fortran IV dilinde yazılan programlarla icra edilmiştir. Bu çalışmada bulunan ve (5.9), (5.10), (5.11), (5.12) denklemleriyle ifade edilen n genleşme katsayısının, kullanılan kum ve kömür malzemeye tatbiki dolayısıyla 4 program mevcut olup bunlar Ek 2 de verilmiştir. Programlar İ.T.Ü. Elektronik Hesap Bilimleri Enstitüsü'nün IBM 4331 numaralı makinalarında icra edilmiştir.

BÖLÜM VI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Giriş

Deneysel çalışmalar, geliştirilen matematik model yardımıyla hesaplanan değişik geri yıkama hızlarındaki filtre yatak yüksekliklerinin doğruluğunu ortaya koymak maksadıyla yapılmıştır. Bu bölümde deney düzeni ve teçhizatı ile yapılan deneyler ele alınmış ve deney sonuçları değerlendirilmiştir.

Bütün deneyler A.B.D. Iowa State Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Çevre Sağlığı Kürsüsü laboratuvarlarında yapılmıştır.

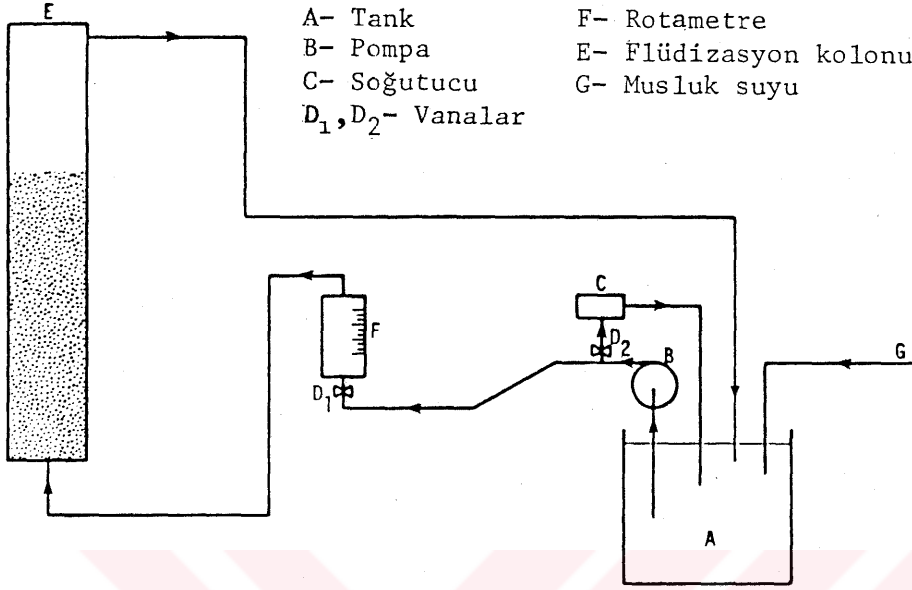
6.2. Deney Techizatı ve Kullanılan Malzemeler

Deneyde kullanılan flüdizasyon sistemi şematik olarak Şekil 6.1 de verilmiştir.

Sistemdeki rotametreye ait kalibrasyon eğri denklemleri Tablo 6.1 de verilmiştir.

Tablo 6.1. Rotametre Kalibrasyon Denklemleri

Su Sıcaklığı °C	Rotametre Okuması % a	Determinasyon Katsayısı r^2
10	$- 2.25 + 0.182 Q$	1
30	$- 1.88 + 0.179 Q$	1
10-30	$- 2.01 + 0.180 Q$	1



Şekil 6.1. Deney sisteminin genel şeması.

Bu çalışmada, Tabloda gösterilen sonuncu regresyon denklemi kullanılmış olup, Q nun birimi cm^3/sn ve a da % olarak rotametre okumasını göstermektedir. Sistemdeki flüdizasyon kolonu detayları Şekil Ek. 4.1 ve Şekil Ek. 4.2 de gösterilmektedir.

Deneylerde Amerika'da Northern Çakıl Şirketi tarafından üretilen Iowa Muscatine kumu ile 1 numaralı karbonit filtre kömürü malzemeleri kullanılmıştır. Her iki malzemede boyut itibarıyla dereceli olup, küresel değildir. Malzemenin elenmesinde Amerikan standard elekleri kullanılmıştır.

6.3. Yapılan Deneyler

Deneylerin bir kısmı filtre malzemesine ait fiziksel özellikleri tespit etmek için yapılmıştır ki bunlar matematik modelin uygulanmasında kullanılmaktadır. Deneylerin diğer bir kısmında flüdizasyon kolonu içindeki filtre malzemesinin belli bir su sıcaklığında ve değişik geri yıkama hızlarındaki genleşmesini ortaya koymak için yapılmıştır.

6.3.1. Elek Analizi ve Tane Boyutunun Tesbiti

Elek analizi, malzemenin boyut dağılımını bilmek ve boyut itibariyle dereceli olan malzemeyi üniform boyutlu tabakalara ayırmak için gerekmektedir. Tane boyutu için aritmetik ortalama, geometrik ortalama ve hacimce eşdeğer tane çapı olarak üç ayrı çap tespit edilmiş olup, bunlar çeşitli hesap kademelerinde kullanılmıştır. Elek analizinin yapılabilmesi için ASTM Standard Test Metodları uygulanmıştır(53), (54). Elek analiz sonuçları Tablo Ek. 4.1, Tablo Ek.4.2 ve Tablo Ek. 4.3 de verilmiştir. Tablo Ek. 4.1 ve Tablo Ek. 4.2 den istifade etmek suretiyle tanenin d_a aritmetik ortalama ve d_g geometrik ortalama çapları bulunmuştur. Eşdeğer hacimli tane çapı d_n ise, kum için 14-16, 35-40, 40-50 numaralı elekler ve kömür için de 7-8, 40-50 numaralı elekler arasında kalan malzeme için deneyle bulunmuştur. Bunun için bu elekler arasında kalan malzemelerden 50 adet temsil edici tane alınarak tartılmıştır. Geometrik ortalama tane çapı ile eşdeğer hacimli tane çapı arasında lineer bir bağıntının varlığı literatürden(55) tespit edilmiş olduğundan (Şekil Ek.4.3 e bkz), yukarıda belirtilen eleklerin dışında kalan diğer elekler arasındaki malzemelere ait d_n bu esasa dayandırılarak, Şekil Ek 4.4 ve Şekil Ek. 4.5 den tespit edilmiştir. d_a , d_g ve d_n değerleri toplamı Tablo Ek. 4.4 de verilmektedir.

6.3.2. Özgül Kütle Tayini

Filtre malzemesine ait özgül kütle, suyun yer değiştirme- si tekniği ile ölçülmüş olup kum için 2.65 gr/cm^3 , kömür için de 1.78 gr/cm^3 bulunmuştur.

6.3.3. Sabit Yatak Porozitesi

Sabit yatak porozitesi, flüidizasyon kolonu içindeki malzemeyi belli bir genişlemeye tabi tuttukdan sonra, geri yıkama vanasını ani olarak kapatarak malzemenin serbestçe çökmesine bağlı olarak bulunmuştur. Bu şekilde ölçüme kolon tekniği denmektedir. Serbest çökmeyi müteakiben malzeme yüksekliği okunmuştur. Flüidizasyon kolonu içindeki belirli yüksekliğe tekabül eden kum ve kömürün ağırlıkları sırasıyla 7024.15 gr ve 4226.8 gr dır. Malzeme ağırlığı ve kolonun içindeki yüksekliği belli iken,

$$\epsilon_o = \frac{l_o A' - W / \rho_t}{l_o A'} \quad (6.1)$$

bağıntısı ile verilen sabit yatak porozitesi hesaplanmış ve kum filtre için 0.4634, kömür filtre için de 0.5525 bulunmuştur.

6.3.4. Tane Serbest Çökelme (Engelsiz Çökelme) Hızı

V_s tane serbest çökelme hızı, Re_s Reynolds sayısının ve n genleşme katsayısının hesabı için gereklidir. Elek analiz sonuçlarını veren Tablo Ek. 4.1 ve Tablo Ek. 4.2 deki kum için 14-16, 35-40 ve 40-50 numaralı; kömür için 7-8 ve 40-50 numaralı elekler arasında kalan malzemeye ait serbest çökelme hızı deneyle bulunmuştur. Bu tablolarda görülen diğer elekler arasında kalan malzemeler için ise bu hız DSF dinamik şekil faktörünü veren (2.21) numaralı denklemden istifade ile hesapla tesbit edilmiştir.

Deneyle hızın ölçümü için, 12.7 cm çapında ve 150 cm yüksekliğinde içi durgun su ile dolu bir kolon kullanılmıştır. Yukarıda verilen elekler arasındaki her bir gruptan onu temsil edici 50 adet tane alınmış 1 veya 2 gün su içinde bırakılarak tamamen ıslanmaları sağlanmıştır. Kolon üzerindeki 100 cm lik mesafeyi 50 tanenin tek tek ne kadar sürede aldığı ölçülerek serbest çökelme hızı için ortalama bir değer bulunmuştur. Deneyler sırasında kolon boyunca su sıcaklığının üniform kalmasına dikkat edilmiştir.

Tablo Ek. 4.5 de deneyle bulunan serbest çökelme hızları topluca verilmiştir.

6.3.5. Dinamik Şekil Faktörü

Dinamik şekil faktörü (DSF), Tablo Ek. 4.4 de görülen kum ve kömür filtre malzemesinin her bir üniform boyutlu tabakası için tesbit edilmiştir. Tablo Ek. 4.5 de tane boyutları verilmiş olan malzemelere ait DSF değerleri, d neyle tesbit olunmuş olan V_s tane serbest çökelme hızlarından yararlanarak ve (2.21) numaralı DSF bağıntısını kullanarak hesap edilmiştir. Hesaplanan değerler 9 No.lu literatürden alınanlarla birlikte Şekil Ek. 4.6 üzerine işaret edilmiştir. Bu noktalar için tek bir

lineer bağıntı verilebilir ise de iki ayrı tip malzemenin üniformluğunun farklı olması dikkate alınarak iki ayrı doğru çizgi kabul edilmiş ve ara değerler lineer interpolasyonla bulunmuştur. Benzer şekilde kömür için de Şekil Ek. 4.7 elde edilmiştir.

Şekil Ek. 4.6 ve Şekil Ek.4.7 den okunan DSF değerleri Tablo Ek. 4.6 ve Tablo Ek. 4.7 de verilmiştir. Tablo Ek. 4.6 da kuma ait 35-40 ($d_a = 0.460$ mm) ve 40-50 ($d_a = 0.360$ mm) numaralı elekler arasındaki malzeme için görülen iki DSF den üstteki hesapla bulunan, altındaki ise Şekil Ek. 4.6 da doğru üzerinden okunan değeri göstermektedir.

DSF, (2.21) bağıntısında V_s ve V_n değerlerinin aynı sıcaklıkta alınması sebebiyle sıcaklıktan bağımsız bir parametredir.

6.3.6. Kum ve Kömür Filtre Malzemesi Kullanarak Yapılan Geri Yıkama Deneyleri

Daha öncede belirtildiği üzere deney yaparak filtre malzemesini genleştirmenin gayesi, elde edilen deney sonuçlarına bağlı olarak çizilen filtre yatak yüksekliklerine ait eğrileri, matematik modelle tahmin edilen sonuçlar ile mukayese etmek içindir.

Bu deneylerde kullanılan flüdizasyon kolonunun çapı 10.16 cm, yüksekliği 2.44 m olup pleksiglasdan yapılmıştır. Kullanılan malzeme, daha önce de belirtildiği üzere Iowa Muscatine kumu ile 1 numaralı karbonit filtre kömürüdür.

Tartarak ağırlığı daha önceden bilinen malzeme yukarda anlatılan flüdizasyon kolonu içine konmuş ve 24 saat su içinde bekletilmiştir. Daha sonra malzeme 10 dakika süreli geri yıkamaya tabî tutularak içinde kalmış havanın böylece dışarıya atılması sağlanmıştır.

Deneyler sırasında su sıcaklığı 24°C ile 26°C arasında değişmiş olup ortalama olarak sıcaklık 25°C de kabul edilebilir.

Her deneyde sırasıyla yapılan okumalar ve gözlemler şunlar olmuştur:

- a) Su sıcaklığı
- b) Akım hızı
- c) Filtre yatak yüksekliği
- d) Flüdize olan yatağın davranışı

Gerek kum ve gerekse de kömür filtre malzemesi için elde edilen deney sonuçları Tablo 6.2, Tablo 6.3, Tablo 6.4, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6 da verilmiştir.

Tablo 6.2. Kum Filtre Yatağına Ait Genleşme Deney Sonuçları
(Ortalama Su Sıcaklığı: 25°C; Kum Malzemenin Ağırlığı = 7024 gr).

Z Olarak Rotometre Okunması	Geri Yıkama Hızı V(cm/sn)	Genleşmiş Kum Yatak Derinliği l(cm)			
		1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
00	0.00	61.00	61.7	61.5	61.4
10	0.82	65.0-65.5	65.8	65.5	65.5
15	1.17	71.1	71.9	71.1-72.4	71.6
20	1.51	77.5-77.7	78.5	78.2	78.1
22	1.64	79.8	80.0	79.8	79.9
25	1.85	84.0	84.6	84.8	84.5
30	2.19	92.2	91.4	91.7	91.8
35	2.53	98.8-99.1	100.3	99.3	99.5
40	2.88	107.4	108.6	107.4	107.6
45	3.22	115.1-115.6	115.6-116.3	116.3	115.9
50	3.56	124.2-124.7	124.7	125.7	125.0
55	3.90	135.9-136.7	136.7-136.9	136.1-136.7	136.5
60	4.24	149.9-150.6	149.6-151.1	149.9-151.4	150.4
65	4.59	168.4-168.9	167.1-167.6	167.6-168.4	168.0
69	4.86	181.6-182.9	181.6-182.9	182.9-183.9	182.6
70	4.93	188.0*15.2*	187.5*15.2*	191.8*15.2*	189.1*15.2*
		cm	cm	cm	cm

(*) Tanelerin seyrek olarak dağıldığı tabaka kalınlığı.

Tablo 6.3. Kum Filtre Yatağına Ait Genleşme Deney Sonuçları
(Ortalama Su Sıcaklığı: 25°C ; Kum Malzemenin Ağırlığı = 6692 gr)

Z Olarak Rotometre Okumaları	Geri Yıkama Hızı V(cm/sn)	Genleşmiş Kum Filtre Yatak Derinliği l(cm)
00	0.00	58.4
10	0.82	61.0
15	1.17	66.8
20	1.51	72.1
25	1.85	77.7
30	2.19	83.8
35	2.53	90.4
40	2.88	96.5
45	3.22	106.4
50	3.56	111.3±0.5
55	3.90	122.2±0.5
60	4.24	134.1±0.5
65	4.59	148.1±1.3
70	4.93	163.3±15.3*cm
75	5.27	183.6±30.5*cm

(*) Tanelerin seyrek olarak dağıldığı tabaka kalınlığı.

Tablo 6.4. Kömür Filtre Yatağına Ait Genleşme Deney Sonuçları
(Ortalama Su Sıcaklığı 25°C ; Kömür Malzemenin
Ağırlığı = 4226.8 gr).

% Olarak Rotametre Okumaları	Geri Yıkama Hızı V(cm/sn)	Genleşmiş Kömür Yatak Derinliği 1(cm)			
		1. Deney	2. Deney	3. Deney	Ortalama
00	0,00	66,0	65,1	65,4	65,5
10	0,82	67,6	66,7	67,6	67,3
15	1,17	74,0	71,8	73,3	73,0
18	1,37	75,0	75,0	76,0	75,3
20	1,51	80,6	79,4	79,4	79,8
25	1,85	89,2	86,4	87,9	87,8
28	2,05	91,1	91,1	91,4	91,2
30	2,19	97,2(104,1)	94,6	96,8	96,2
35	2,53	108,3(139,7)	104,1	107,3	106,6
38	2,74	110,5	113,7	113,7	112,6
40	2,88	120,0(139,7)	114,9	120,0(137,2)	118,3
45	3,22	135,3(177,8)	128,3	132,7(167,6)	132,1
48	3,42	135,3	135,3	139,1	136,6
50	3,56	158,1(182,9)	141,6	153,0(190,5)	151,0
55	3,90	183,5(213,4)	165,7(182,9)	181,5(213,4)	177,6
60	4,24	198,8 ^a	196,2 ^a	198,8 ^a	198,0 ^a

(*) Bu yüksekliklerin üzerinde tanelerin seyrek olarak dağıldığı bir tabaka mevcuttur.

Tablo 6.5. Kömür Filtre Yatağına Ait Genleşme Deney
Sonuçları (Bu Tabloda Az Yoğun Tabaka
Dikkate Alınmıştır).

Geri Yıkama Hızı V(cm/sn)	Genleşmiş Kömür Filtre Yatak Derinliği (Ortalama Değer) 1(cm)
0.00	65.5
0.82	67.3
1.17	73.0
1.37	75.3
1.51	79.8
1.85	87.8
2.05	91.2
2.19	96.2
2.53	106.6
2.74	112.6
2.88	138.5
3.22	172.7
3.56	186.7
3.90	203.2
4.24	>203.2

Tablo 6.6. Kömür Filtre Yatağına Ait Genleşme Deney Sonuçları (Ortalama Su Sıcaklığı 25°C ; Kömür Malzeme Ağırlığı = 4226.8 gr).

% Olarak Rotometre Okuması	Geri Yıkama Hızı V(cm/sn)	Genleşmiş Kömür Filtre Yatak Derinliği l(cm)
00	0.00	66.0
10	0.82	67.9
15	1.17	71.8
20	1.51	76.8
25	1.85	86.0
30	2.19	95.3
35	2.53	106.0
40	2.88	118.1
45	3.22	130.2
50	3.56	141.0
55	3.90	165.1

Suların filtrasyonunda kullanılan seri filtrelerdeki malzeme kalınlığı 75 cm civarında olduğu için bu çalışmada da, yukarıda verilen tablolardan da görüleceği üzere statik haldeki yatak kalınlığı, tasfiye tesislerindeki yatak kalınlığı kadar alınmıştır. Statik haldeki yatak kalınlıkları yatağın 10 dakika süre ile genişletirilip geri yıkama vanasının aniden kapanması ile elde edilmiştir. Kolon tekniği olarak bilinen bu metoddan gaye filtre taneleri arasındaki sıkışmayı önlemektir.

6.4. Geri Yıkama ile İlgili Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 6.2 de neticeleri görülen kum filtre yatağına ait genleşme deneylerinde, hızın 3.22 cm/sn den büyük değerlerinde yatağın üst seviyesinin çok az bir dalgalanma gösterdiği gözlenmiştir. Bu sebeple, tablodan da anlaşılacağı üzere bu ve daha büyük hızlara tekabül eden herbir deneydeki yatak yükseklikleri için verilen iki sayının ortalaması o hızlara karşı gelen yükseklik olarak itibar edilmiştir. Her üç deneyin ortalaması yatak yüksekliği için esas alınmıştır. Tablo 6.2 deki kum malzemenin ağırlığı 7024 gr dır. Değişik malzeme ağırlığının kullanılmasıyla elde edilen bir diğer deney sonucu da, örnek teşkil etmesi bakımından Tablo 6.3 de verilmiştir. Bu tabloda gö-

rülen + ve - işaretleri ortalama yatak yüksekliği etrafındaki dalgalanmaları göstermektedir. Gerek Tablo 6.2 de ve gerekse Tablo 6.3 de, yüksek hızlarda tanelerin az yoğun olarak dağıldığı bir tabakanın kalınlığı ayrıca belirtilmiştir.

Kömür filtre malzemesi için de kum malzemede olduğu gibi birden fazla geri yıkama deneyi yapılmış olup deney sonuçları Tablo 6.4, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6 da verilmiştir. Tablo 6.4 ve Tablo 6.5 deki ortalama yatak yükseklikleri Tablo 6.4 deki 3 deneyden elde edilmiştir.

Tablo 6.4 de yüksek hızlarda, yatak yüksekliği için biri parantez içinde olmak üzere iki değer verilmiştir. Bunlardan birinci sayı malzemenin çok konsantre halde bulunduğu genleşmiş yatağın üst seviyesini, parantez içindeki ikinci değer ise malzemenin çok seyreltik olarak bulunduğu tabakanın üst seviyesini göstermektedir. Büyük hızlarda ortalama yatak yüksekliği hesabında, Tablo 6.4 de yukarıda belirtilen birinci sayı ve Tablo 6.5 de de parantez içindeki ikinci sayı dikkate alınmıştır. Bu şekilde tespit edilen iki ayrı yatak derinliğinin sonuçlar üzerindeki etkisi Bölüm 7 de incelenecektir.

Yüksek hızlarda, kuma nazaran daha az yoğun olan kömürün flüidizasyon kolonunun üst tarafından kolon dışına çıkıp çıkmadığını tespit için sonuçları Tablo 6.6 da görülen bir deney daha yapılmıştır. Deneyi müteakiben malzeme kolondan çıkarılıp kurutulduktan sonra, tekrar elek analizi yapılarak Tablo Ek.4.1 deki orijinal elek analiz sonuçları ile karşılaştırılmış olup 0.590 mm ve daha küçük boyutlu tanelerin kolon dışına kaçtığı, ancak bunun çok önemsiz mertebede olduğu tesbit edilmiştir. Geri yıkama suyu hızının 4.24 cm/sn den büyük olması halinde kolon dışına kaçabilecek miktarın önemli mertebeye ulaşması söz konusu olabilir. Bu gibi hallerde bu problemin önüne geçmek için üniformluk katsayısı küçük olan malzemenin kullanılması tavsiye edilir.

Sonuçları Tablo 6.6 da verilen deney yapılırken hızın 2.88 cm/sn ye ulaştığı anda genleşen yatak üzerinde tanelerin çok seyrek olarak dağıldığı bir tabaka görülmüş olup, bazı taneler yükselirken bazılarının düştüğü tespit edilmiştir. Bu halde porozitenin 0.90 civarında olduğu tahmin edilmektedir.

BÖLÜM VII

GELİŞTİRİLEN MODELİN DENEY

SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

7.1. Giriş

Bu bölümde, Bölüm V de geliştirilen matematik model yardımıyla, bu çalışmada kullanılan kum ve kömür filtrelerle ait değişik geri yıkama hızlarındaki yatak yükseklikleri hesap edilecek ve Bölüm VI da verilen deney sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Ayrıca, bu karşılaştırmaya bağlı olarak geliştirilen model değerlendirilecektir.

7.2. Filtre Yatak Genleşmesinin Hesabı ve Deney Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Bölüm V de filtre genleşme katsayısını veren denklemler çıkarılmış ve bunların kullanılmasıyla genleşmiş yatak kalınlığının adım adım hesabı verilmiştir. Bu adımlar dikkate alındığında önce boyut itibarıyla üniform olmayan filtre malzemesinin üniform boyutlu tabakalara ayrılması ve bunlarla ilgili fiziksel bazı özelliklerin belirtilmesi gerekmektedir. Tablo 7.1 ve Tablo 7.2 de verilen bu özellikler genleşmiş yatak kalınlığının hesabında kullanılacaktır. Tablolardan da görüleceği üzere Tablo Ek. 4.1 ve Tablo Ek. 4.2 deki elek analiz sonuçlarına bakarak bu çalışmada kullanılan kum ve kömür filtre malzemeleri sırasıyla üniform boyutlu 7 ve 13 adet tabakaya ayrılmıştır.

Filtre yatağının genleşmesinde (5.9), (5.10), (5.11) ve (5.12) bağıntılarıyla verilen yatak genleşme katsayısı n belirlendikten sonra (1.7) ve (1.30) no.lu,

$$\frac{V}{V_i} = \epsilon^n \quad (1.7)$$

Tablo 7.1. Kum Yatağın Karakteristikleri.

Amerikan Standard Elek No.su	Elek Açıklığı (mm)	Her Bir Elek Üzerinde Kalan Malzeme Miktarı (gr)	Gözönüne Alınan Tabakaların Sayısı	Gözönüne Alınan Tabakaların Ağırlığı (%)	Gözönüne Alınan Tabakaların Ağırlığı (gr)	Gözönüne Alınan Tabakalara Ait Ortalama Çap d_a (mm)	Gözönüne Alınan Tabakalara Ait Sabit Yatak Kalınlıkları l_o (cm)	Gözönüne Alınan Tabakalara Ait Sabit Yatak Porozitesi ϵ
12	1.68	0.1						
14	1.41	0.1						
16	1.19	0.3						
18	1.00	4.5	1	2.53	177.9162	1.095	1.542	
20	0.841	41.2	2	20.87	1466.0335	0.9205	12.722	
25	0.707	61.0	3	30.90	2170.5841	0.7740	18.836	
30	0.590	50.4	4	25.54	1793.4004	0.6485	15.563	
35	0.500	26.4	5	13.37	939.4004	0.5450	8.150	
40	0.420	10.5	6	5.32	373.6245	0.4600	3.243	
50	0.300	2.8	7	1.47	103.1911	0.3600	0.896	
Dip		0.1					Toplam: 61	
		Toplam: 197.4						0.4634

^a 61 cm yüksekliğindeki malzemenin toplam ağırlığı 7024.15 gr dır.

^b Ağırlıkları az olanlar toplanarak tek bir tabaka gibi ele alınmıştır.

Tablo 7.2. Kömür Yatağın Karakteristikleri.

Amerikan Standard Elek No.su	Elek Açıklığı (mm)	Her Bir Elek Üzerinde Kalan Malzeme Miktarı (gr)	Gözönüne Alınan Tabakaların Sayısı	Gözönüne Alınan Tabakaların Ağırlığı (%)	Gözönüne Alınan Tabakaların Ağırlığı (gr)	Gözönüne Alınan Tabakalara Ait Ortalama Çap d_a (mm)	Gözönüne Alınan Tabakalara Ait Sabit Yatak Kalınlıkları l_o (cm)	Gözönüne Alınan Tabakalara Ait Sabit Yatak Porozitesi ϵ
6	3.35	.						
7	2.83	3.0	1	1.52	64.0745	3.090	0.994	
8	2.36	6.1	2	3.08	130.2852	2.595	2.018	
10	2.00	16.6	3	8.39	354.5469	2.180	5.493	
12	1.68	32.4	4	16.37	692.0075	1.840	10.723	
14	1.41	32.5	5	16.42	694.1433	1.545	10.754	
16	1.19	29.9	6	15.11	638.6119	1.300	9.894	
18	1.00	26.6	7	13.44	568.1297	1.095	8.803	
20	0.841	24.1	8	12.17	514.7337	0.9205	7.977	
25	0.707	13.5	9	6.82	288.3362	0.7740	4.468	
30	0.590	7.4	10	3.74	158.0510	0.6485	2.451	
35	0.500	3.1	11	1.57	66.2103	0.5450	1.027	
40	0.420	1.4	12	0.707	29.9013	0.4600	0.463	
50	0.300	0.8	13	0.657	27.7654	0.3600	0.430	
Dip		0.5					Toplam: 65.5	
		Toplam: 197.9						0.5525

^a 65.5 cm yüksekliğindeki malzemenin toplam ağırlığı 4226.8 gr dır.

$$l_o(1-\epsilon_o) = l(1-\epsilon) \quad (1.30)$$

denklemleri ve Tablo 7.1 ve Tablo 7.2 yardımıyla herbir tabakaya ait çeşitli V geri yıkama hızlarındaki ϵ porozitesi ve l tabaka kalınlığı hesaplanmıştır. Daha sonra filtre yatağını meydana getiren her bir tabakanın, belli bir geri yıkama hızına tekabül eden, genişmiş kalınlıkları toplanarak o hızdaki filtre yatak yüksekliği elde edilmiştir. Bütün bu işlemlerin yapılabilmesi için (5.9), (5.10), (5.11), (5.12) ve (1.7) bağıntılarında geçen d_n , Re_s , d_h , V_s , V_n , V_i parametrelerinin her bir tabaka için hesaplanarak belirlenmesi gerekmiş olup bunların sonuçları Tablo 7.3, Tablo 7.4, Tablo 7.5 ve Tablo 7.6 da sabit tabaka porozite ve kalınlıklarıyla birlikte topluca verilmiştir. Bu parametreler daha önce tanımlanmıştır.

Tablo 7.3. Kum Filtre Yatağının Değişik Tabakalarına Ait Bazı Hesap Sonuçları.

Tabaka Sayısı	d_n (mm)	Re_s	V_s (cm/sn)	V_n (cm/sn)	V_i (cm/sn)	ϵ_o	l_o (cm)
1	1.120	171.13	13.64	18.57	14.43	0.4634	1.542
2	0.970	134.27	12.36	16.10	12.77	0.4634	12.722
3	0.840	106.25	11.29	14.24	11.47	0.4634	18.837
4	0.720	78.97	9.79	12.03	9.80	0.4634	15.563
5	0.630	61.39	8.69	10.49	8.63	0.4634	8.150
6	0.533	45.20	7.57	8.96	7.44	0.4634	3.243
7	0.416	27.27	5.85	6.82	5.70	0.4634	0.896

Tablo 7.4. Kum Filtre Yatağının Değişik Tabakalarına Ait Bazı Hesap Sonuçları.

Tabaka Sayısı	d_n (mm)	Re_s	d_h (mm)	V_i (cm/sn)	ϵ_o	l_o (cm)
1	1.120	171.13	0.818	14.43	0.4634	1.542
2	0.970	134.27	0.759	12.77	0.4634	12.722
3	0.840	106.25	0.679	11.47	0.4634	18.837
4	0.720	78.97	0.584	9.81	0.4634	15.563
5	0.630	61.39	0.523	8.63	0.4634	8.150
6	0.533	45.20	0.460	7.44	0.4634	3.243
7	0.416	27.27	0.362	5.70	0.4634	0.896

Tablo 7.5. Kömür Filtre Yatağının Değişik Tabakalarına Ait Bazı Hesap Sonuçları.

Tabaka Sayısı	d_n (mm)	Re_s	V_s (cm/sn)	V_n (cm/sn)	V_i (cm/sn)	ε_o	l_o (cm)
1	2.900	359.69	11.07	24.87	15.22	0.5525	0.994
2	2.476	282.55	10.19	21.99	13.72	0.5525	2.018
3	2.160	231.17	9.55	19.96	12.65	0.5525	5.493
4	1.860	182.33	8.75	17.85	11.43	0.5525	10.723
5	1.610	143.52	7.96	15.91	10.29	0.5525	10.754
6	1.400	111.86	7.13	14.03	9.14	0.5525	9.894
7	1.200	84.96	6.32	12.27	8.04	0.5525	8.803
8	1.040	65.06	5.58	10.73	7.06	0.5525	7.977
9	0.900	48.24	4.78	9.13	6.03	0.5525	4.468
10	0.780	36.93	4.23	8.01	5.30	0.5525	2.451
11	0.665	26.49	3.55	6.71	4.44	0.5525	1.027
12	0.580	20.18	3.11	5.85	3.87	0.5525	0.463
13	0.459	12.20	2.37	4.47	2.95	0.5525	0.430

Tablo 7.6. Kömür Filtre Yatağının Değişik Tabakalarına Ait Bazı Hesap Sonuçları.

Tabaka Sayısı	d_n (mm)	Re_s	d_h (mm)	V_i (cm/sn)	ε_o	l_o (cm)
1	2.900	359.69	1.096	15.22	0.5525	0.994
2	2.476	282.55	0.9989	13.72	0.5525	2.018
3	2.160	231.17	0.962	12.65	0.5525	5.493
4	1.860	182.33	0.867	11.43	0.5525	10.723
5	1.610	143.52	0.779	10.29	0.5525	10.754
6	1.400	111.86	0.7008	9.14	0.5525	9.894
7	1.200	84.96	0.6356	8.04	0.5525	8.803
8	1.040	65.06	0.5595	7.06	0.5525	7.977
9	0.900	48.24	0.4851	6.03	0.5525	4.468
10	0.780	36.93	0.4236	5.30	0.5525	2.451
11	0.665	26.49	0.384	4.44	0.5525	1.027
12	0.580	20.18	0.3391	3.87	0.5525	0.463
13	0.459	12.20	0.2782	2.95	0.5525	0.430

Yukarda belirtilen hesaplar dahilinde bir örnek teşkil etmesi bakımından aşağıda kum filtrenin, $V = 1.51 \text{ cm/sn}$ geri yıkama hızındaki genleşmiş yatak kalınlığının hesabı örnek olarak verilmektedir:

1 numaralı tabaka için hesap : Tablo 7.1 de bu tabakanın ağırlık yüzdesi %2.53 olup, bunun ağırlık olarak değeri (Kum filtre malzemesinin toplam ağırlığı 7024.15 gr olmak üzere)

$$(7024.15 \text{ gr})(\%2.53) = 177.91 \text{ gr}$$

dır. Tablo Ek. 4.4 den, bu tabakanın hacimce eşdeğer dane çapı d_n , 1.120 mm olarak alınmıştır. Tabaka kalınlığının, ağırlık yüzdesi ile orantılı olacağı esas alınarak bu tabakanın sabit kalınlığı,

$$(\%2.53)(61 \text{ cm}) = 1.542 \text{ cm}$$

61 cm : Statik (sabit) haldeki toplam filtre yatak kalınlığı.

olarak bulunur.

(6.1) bağıntısı yardımıyla

$$\epsilon_o = \frac{l_{oA}' - W/\rho_t}{l_{oA}'} = \frac{(1.542)(81.032) - \frac{177.91}{2.65}}{(1.542)(81.032)}$$

$$\epsilon_o = 0.4634$$

elde edilir. Burada : A' , 10.16 cm çapındaki flüdizasyon kolonunun enkesit alanı (81.032 cm²) dir.

Buraya kadar verilen işlemler diğer tabakalar için de yapılmış olup Tablo 7.1 de verilmiştir. Bölüm VI daki deneyler 25°C su sıcaklığında yapılmış olduğundan, hesapla bulunan sonuçların deney neticeleriyle mukayese edilebilmesi için burada aynı su sıcaklığı gözönüne alınmıştır. Buna göre,

$$\rho = 0.997 \text{ gr/cm}^3$$

(su için)

$$\mu = 0.0089 \text{ gr/cm.sn}$$

değerleri (2.5) ifadesinde d_n ile birlikte yerine konursa,

$$C_D Re_n^2 = \frac{4}{3} \frac{d_n^3 g \rho (\rho_t - \rho)}{\mu^2} \quad (2.5)$$

$$C_D Re_n^2 = \frac{4(0.112)^3 981 \cdot 0.997 (2.65 - 0.997)}{(0.0089)^2}$$

$$C_D Re_n^2 = 38234$$

elde edilir. Tablo 2.1 den bu değer karşılığı olarak,

$$Re_n = 233$$

bulunur ve (2.6) bağıntısı yardımıyla d_n çapını haiz küresel dane çökme hızı

$$V_n = \frac{Re_n \mu}{d_n \rho} \quad (2.6)$$

$$V_n = \frac{(233)(0.0089)}{(0.112)(0.997)} = 18.57 \text{ cm/sn}$$

olarak hesaplanır. Hacimce d_n çaplı küreye eşdeğer olan herhangi bir şekle haiz tanenin çökme hızı V_s de (2.21) bağıntısı için geçerli olan $a_i + b_i = 1$ ifadesi ve (2.26), (2.21) bağıntılarından,

$$a_i + b_i = 1$$

$$b_i / a_i = Re_n \quad (2.26)$$

$$b_i / a_i = 233$$

$$a_i = 0.0043$$

$$b_i = 0.996$$

$$DSF = a_i \left(\frac{V_s}{V_n} \right) + b_i \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^2 \quad (2.21)$$

$$DSF = 0.540 \quad (\text{Tablo Ek. 4.6 dan})$$

$$0.540 = 0.0043 \left(\frac{V_s}{18.57} \right) + 0.996 \left(\frac{V_s}{18.57} \right)^2$$

$$V_s = 13.64 \text{ cm/sn}$$

olarak hesaplanır. V_s serbest çökme hızına bağlı olarak,

$$Re_s = \frac{\rho V_s d_n}{\mu} = \frac{(0.997)(13.64)(0.112)}{0.0089} = 171.13$$

$$Re_s = 171.13$$

$$\frac{V_i}{V_s} = 0.90 \quad DSF^{-0.262} \quad (3.24)$$

$$V_i = (0.90)(13.64)(0.540)^{-0.262}$$

$$V_i = 14.427 \text{ cm/sn}$$

elde edilir. d_h eşdeğer hidrolik çapın bulunabilmesi için önce C_D/Re değerinin hesaplanması gerekir.

$$C_D/Re = \frac{4g(\rho_t - \rho)\mu}{3\rho^2 V_s^3} \quad (2.7)$$

$$C_D/Re = \frac{(4)(981)(2.65 - 0.997)(0.0089)}{3(0.997)^2(13.64)^3}$$

$$C_D/Re = 0.0076$$

Tablo 2.1 den buna karşı gelen Re değeri olarak,

$$Re = 125$$

bulunur ve (2.8) bağıntısıyla, d_h

$$d_h = \frac{Re\mu}{V_s\rho} \quad (2.8)$$

$$d_h = \frac{(125)(0.0089)}{(13.64)(0.997)} = 0.0818 \text{ cm}$$

$$d_h = 0.818 \text{ mm}$$

elde edilir. Bu hesaplar sonucunda bulunan V_n , V_s , Re_s , V_i , d_h değerleri Tablo 7.3 ve Tablo 7.4 de kum filtreyi teşkil eden 7 tabakadan birincisine ait sonuçlar olarak verilmiştir. Yukarıdaki hesaplar benzer tarzda diğer tabakalar için de yapılmış, elde edilen sonuçlar Tablo 7.3 ve Tablo 7.4 de gösterilmiştir. Genleşmiş yatak yüksekliğinin hesabında, lüzumlu olan yatak genleşme katsayısı n için geliştirilen modellerden (5.9) ve (5.10) numaralı bağıntıların kullanılması halinde kum için Tablo 7.4 den ve kömür için de Tablo 7.6 dan; (5.11), (5.12) denklemlerinin kullanılması halinde ise kum için Tablo 7.3 den, kömür için de Tablo 7.5 den istifade edilmektedir. Burada verilmekte olan örnekte (5.11), (5.12) bağıntıları kullanılmıştır. Buna göre hesaba devam edilirse $Re_s = 171.13$ değerine karşı gelen n için (5.11) bağıntısı kullanılarak,

$$n = (4.45 + 18 \frac{d}{D}) Re_s^{-0.1} (V_s/V_n)^{-4.1170} Re_s^{-0.4468} (V_s/V_n)^{0.6644}$$

$$d = d_h = 1.120 \text{ mm}$$

$$D = \text{Flüdizasyon kolonu çapı} = 101.6 \text{ mm}$$

$$n = (4.45 + 18 \frac{1.120}{101.6}) (171.13)^{-0.1}.$$

$$\left(\frac{13.64}{18.57}\right)^{-4.1170} (171.13)^{-0.4468} (13.64/18.57)^{0.6644}$$

$$n = 3.084$$

bulunur. Sırasıyla (1.7) ve (1.30) denklemleri yardımıyla,

$$\frac{V}{V_i} = \epsilon^n \rightarrow \epsilon = \left(\frac{V}{V_i}\right)^{1/n}$$

$$\epsilon = \left(\frac{1.51}{14.43}\right)^{1/3.084} = 0.481$$

genleşmiş tabaka kalınlığı,

$$\frac{1}{l_0} = \frac{1-\epsilon_0}{1-\epsilon} = \frac{1-0.4634}{1-0.4810} = 1.0339$$

$$l = \frac{1}{l_0} \cdot l_0 = (1.0339)(1.542) = 1.5946 \text{ cm}$$

elde edilir. Benzer tarzda Tablo 7.1 ve Tablo 7.3 de görülen diğer 6 tabaka için de $V = 1.51 \text{ cm/sn}$ değerindeki geri yıkama hızı için l değerleri hesaplanarak bunların toplamı alınır,

Tabaka Sayısı	n	ϵ	$l \text{ (cm)}$
1. Tabaka	3.08416	0.481	1.5946
2. Tabaka	3.13638	0.506	13.8265
3. Tabaka	3.19336	0.530	21.5040
4. Tabaka	3.28425	0.566	19.2346
5. Tabaka	3.36822	0.596	10.8253
6. Tabaka	3.47584	0.632	4.7306
7. Tabaka	3.70407	0.699	1.5945
			$\Sigma l = 73.31 \text{ cm}$

bulunur. Hesaplanan $\Sigma l = 73.31 \text{ cm}$ değeri, kum yatağın $V = 1.51 \text{ cm/sn}$ geri yıkama hızına tekabül eden, genleşmiş yatak yüksekliğidir.

Bu işlemler kömür filtre malzemesi için de yapılmıştır.

Yukardaki örneğin akışı içinde belirtildiği üzere kum ve kömür filtreye ait çeşitli geri yıkama hızlarındaki yatak yüksekliğini, n için verilen (5.9), (5.10) veya (5.11), (5.12) denklemlerini kullanarak bu iki ayrı modele göre hesaplamak mümkün olduğundan kum ve kömür filtre malzemelerine ait her bir tabakanın çeşitli hızlardaki kalınlıkları ile aynı bir hızdaki toplam filtre yatak kalınlıklarına ait hesap yapan programlar Ek.2 de verilmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere bu işlemlerin elle yapılması zaman alıcı olduğundan, İ.T.Ü. Bilgi İşlem Merkezinde Ek. 2 deki bilgi sayar programları icra edilmiş olup Tablo 7.3, Tablo 7.4, Tablo 7.5 ve Tablo 7.6 daki doneler programların icrasında giriş bilgisi olarak verilmiştir.

Bu programlar kum ve kömür filtre yataklarının değişik geri yıkama hızları için icra edilerek elde edilen toplam filtre

derinliklerinin, Bölüm VI daki deney sonuçlarıyla karşılaştırılması Tablo 7.7, Tablo 7.8, Tablo 7.9, Tablo 7.10 ve Tablo 7.11 de verilmiştir. Aynı kum filtreye ait Tablo 7.7 ve Tablo 7.8 deki hesapla bulunan yatak yükseklikleri Tablo 7.7 için (5.11), (5.12) ve Tablo 7.8 için de (5.9), (5.10) bağıntıları ile verilen modellere göre hesaplanmış olup bu tablolardaki deney sonuçları Tablo 6.2 den alınmıştır. Aynı kömür filtreye ait Tablo 7.9 ve Tablo 7.11 deki hesapla bulunan yatak yükseklikleri, Tablo 7.9 için (5.11), (5.12) ve Tablo 7.11 için de (5.9), (5.10) denklemleriyle verilen modellere göre hesaplanmış olup bu tabakalardaki deney neticeleri de Tablo 6.4 den alınmıştır. Tablo 7.10 da kömür filtreye ait olup teorik yatak yüksekliği hesabında (5.11), (5.12) nolu model kullanılmış, deney sonuçları da Tablo 6.5 den alınmıştır. Tablo 7.7 ve Tablo 7.8 deki sonuçlar Şekil 7.1 ve Şekil 7.2 de; Tablo 7.9, Tablo 7.10, Tablo 7.11 deki sonuçlar da sırasıyla Şekil 7.3, Şekil 7.4 ve Şekil 7.5 de grafik olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada uygulanan hız aralığı da yukardaki tablo ve şekillerde görülmektedir. Geri yıkama suyu hızının sıfır olması halinde, (1.7) bağıntısına göre porozite sıfır olmaktadır. Bu mümkün olamayacağı için, $V = 0$ da hesapla bulunan 1 değeri deneydeki sabit yatak kalınlığına eşit alınmış ve yukardaki tablolarda bu şekilde verilmiştir.

Geri yıkama deneyleri sırasında, çok yoğun haldeki malzemenin üzerinde tanelerin az yoğun olarak dağıldığı tabakanın bulunması hali kömürde kuma nazaran daha fazla tespit edildiğinden Şekil 7.3 ve Şekil 7.5 de deney sonuçlarında az yoğun tabaka olmadan, Şekil 7.4 deki deney sonuçlarında ise az yoğun tabakanın da bulunması halinde teorik sonuçlarla mukayesesi yapılmıştır.

Ek. 2.1, Ek.2.2, Ek.2.3 ve Ek.2.4 de verilen programların icraat sonuçları incelenmiş, kum ve kömür malzemelerin bazı tabakalarında, porozitenin ϵ_0 ile gösterilen (Kum tabaka için $\epsilon_0 = 0.4634$, Kömür için $\epsilon_0 = 0.5525$) genleşmeden önceki sabit tabaka porozitesinden daha küçük olduğu, bazı tabakalarında ise 0.9 dan 1.0 e kadar değiştiği görülmüştür. Bu son durum bilhassa kömür malzemedede daha fazla gözlenmektedir. Genleşen tabakaya ait ϵ eğer ϵ_0 dan küçük olursa 1 genleşmiş tabaka kalınlığı l_0 ile gösterilen sabit haldeki tabaka kalınlığından küçük olur. Bu mümkün olamayacağı için, $\epsilon < \epsilon_0$ durumlarında programın icrası sırasında $l = l_0$ alınmıştır. ϵ nun 0.9 ile 1.0 arasındaki değerlerine tekabül eden genleşmiş tabaka kalınlığı (1) değerlerinin

deki artışlar, porozitenin 0.9 dan önceki değerlerine tekabül eden 1 ler arasındaki artıştan daha büyük çıkmaktadır. Bu gibi haller için bir sınırlama yapılmış, Ek 2.1, Ek 2.2, Ek 2.3 ve Ek 2.4 de verilen programlarda $\epsilon \geq 0.9$ a karşı gelen 1 değerleri yerine ϵ nun 0.9 olmadan bir önceki değerine tekabül eden 1 değeri aynen alınmıştır. Filtreye ait toplam genleşmiş yatak derinliği hesabında yukarda belirtilen durumu aşağıdaki örnek açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Geri yıkama suyu hızı $V = 2.88$ cm/sn iken kömür filtrenin toplam genleşmiş yatak derinliği bu sınırlamanın ışığı altında hesaplanmış Tablo 7.9 da da görüldüğü üzere 119.77 cm olarak bulunmuştur. Yukardaki programlardan Ek 2.1 de bu sınırlama yapılmadan elde edilen çözümde derinlik için 170.13 cm değeri bulunmuştur. Halbuki bu çalışmada yapılan deney sonucunda toplam yatak derinliği Tablo 7.9 da da görüldüğü gibi 118.30 cm olarak ölçülmüştür.

Bu mukayese neticesinde toplam filtre derinliğinin hesabında yukarda kabul edilen hususun esas alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu durum aşağıda da belirtildiği üzere literatürde de desteklenmektedir.

Al-Dibouni ve Garside(18) ile Wilhelm ve Kwauk(16) kendilerine ait çalışma neticelerini iki tarafı logaritmik eksen takımı üzerine (1.7) ile verilen $V/K = \epsilon^n$ fonksiyonu tarzında noktalamışlardır. Neticede bu bağıntının ϵ nun 0.9 dan büyük değerlerinde lineerlikten saptığını ve artan bir eğrilik gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bu durum yüksek hızlarda meydana gelmekte ve bu çalışmada olduğu gibi porozitenin, dolayısıyla buna bağlı olarak yatak derinliğinin de gerekenden büyük çıkmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle Al-Dibouni ve Garside, pek çok araştırmacının çalışmalarını $\epsilon > 0.9$ bölgesi dışına çıkarmadıklarını ve (1.7) bağıntısının $\epsilon < 0.9$ halinde kullanılması gerektiğini teklif etmişlerdir.

Tablo 7.7. Değişik Geri Yıkama Hızlarında Kum Filtre Yatağına Ait Hesap ve Deney Sonuçlarının Verdiği Yatak Yükseklikleri ((5.11), (5.12) No.lu Bağıntıları ile Verilen Modeller Kullanılmıştır; Su Sıcaklığı 25°C)

V (cm/sn)	Hesap Edilen Toplam Yatak Kalınlığı l(cm)	Deneyle Bulunan Yatak Kalınlığı l(cm)
0.00	61.40	61.4
0.82	62.43	65.5
1.17	67.03	71.6
1.37	70.69	—
1.51	73.31	78.1
1.64	75.75	79.9
1.85	79.77	84.5
2.19	86.51	91.8
2.53	93.66	99.5
2.88	101.56	107.6
3.22	109.93	115.9
3.56	119.15	125.0
3.90	128.58	136.5
4.24	139.07	150.4
4.59	151.26	168.0
4.86	161.87	182.6
4.93	164.82	189.1 + 15.2*

(*) Tanelerin seyrek olarak dağıldığı tabaka kalınlığı.

Tablo 7.8. Değişik Geri Yıkama Hızlarında Kum Filtre Yatağına Ait Hesap ve Deney Sonuçlarının Verdiği Yatak Yükseklikleri ((5.9), (5.10), Bağıntıları ile Verilen Modeller Kullanılmıştır; Su Sıcaklığı 25°C).

V (cm/sn)	Hesap Edilen Toplam Yatak Kalınlığı l(cm)	Deneyle Bulunan Yatak Kalınlığı l(cm)
0.00	61.40	61.4
0.82	62.52	65.5
1.17	66.99	71.6
1.37	70.64	—
1.51	73.26	78.1
1.64	75.70	79.9
1.85	79.72	84.5
2.19	86.46	91.8
2.53	93.60	99.5
2.88	101.50	107.6
3.22	109.86	115.9
3.56	119.09	125.0
3.90	128.51	136.5
4.24	138.99	150.4
4.59	151.18	168.0
4.86	161.78	182.6
4.93	164.73	189.1 + 15.2*

(*) Tanelerin seyrek olarak bulunduğu tabaka kalınlığı.

Tablo 7.9. Değişik Geri Yıkama Hızlarında Kömür Filtre Yatağına Ait Hesap ve Deney Sonuçlarının Verdiği Yatak Yükseklikleri ((5.11),(5.12) Bağıntıları ile Verilen Modeller Kullanılmıştır; Su Sıcaklığı 25°C).

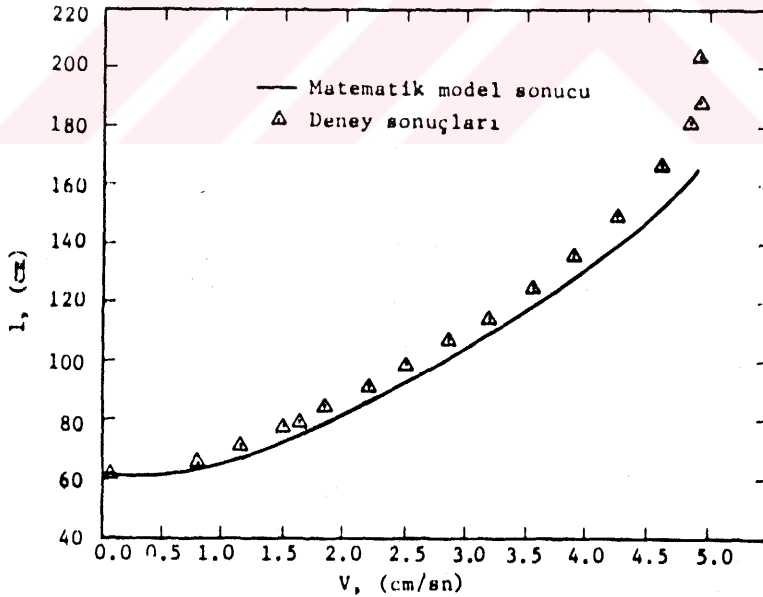
V (cm/sn)	Hesap Edilen Toplam Yatak Kalınlığı l(cm)	Deneyle Bulunan Yatak Kalınlığı l(cm)
0,00	65,50	65,5
0,82	69,23	67,3
1,17	74,43	73,0
1,37	78,29	75,3
1,51	81,36	79,8
1,64	84,38	—
1,85	89,54	87,8
2,19	98,74	96,2
2,53	108,87	106,6
2,88	119,77	118,3
3,22	132,00	132,1
3,56	143,96	151,0
3,90	154,59	177,6
4,24	166,85	198,0
4,59	181,74	—
4,86	190,28	—
4,93	192,66	—

Tablo 7.10. Değişik Geri Yıkama Hızlarında Kömür Filtre Yatağına Ait Hesap ve Deney Sonuçlarının Verdiği Yatak Yükseklikleri ((5.11),(5.12) No.lu Bağıntılarla Verilen Modeller Kullanılmıştır; Az Yoğun Tabaka Dikkate Alınmamıştır; Su Sıcaklığı 25°C).

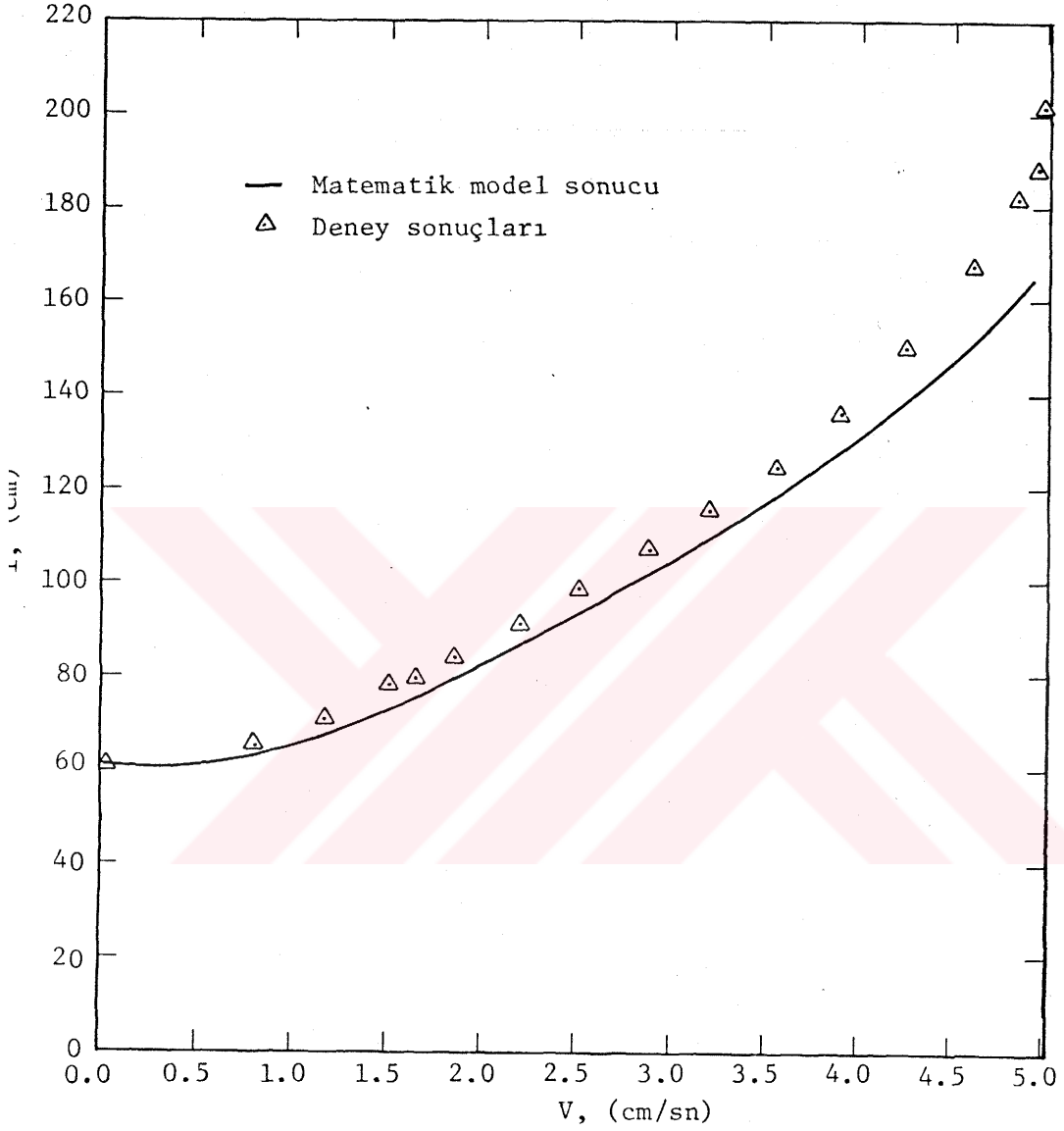
V (cm/sn)	Hesap Edilen Toplam Yatak Kalınlığı l(cm)	Deneyle Bulunan Yatak Kalınlığı l(cm)
0,00	65,50	65,5
0,82	69,23	67,3
1,17	74,43	73,0
1,37	78,29	75,3
1,51	81,36	79,8
1,85	89,54	87,8
2,19	98,74	96,2
2,53	108,87	106,6
2,88	119,77	138,5
3,22	132,00	172,7
3,56	143,96	186,7
3,90	154,59	203,2
4,24	166,85	> 203,2

Tablo 7.11. Değişik Geri Yıkama Hızlarında Kömür Filtre Yatağına Ait Hesap ve Deney Sonuçlarının Verdiği Yatak Yüksekliği ((5.9), (5.10) No.lu Bağantılarla Verilen Modeller Kullanılmıştır; Su Sıcaklığı 25°C).

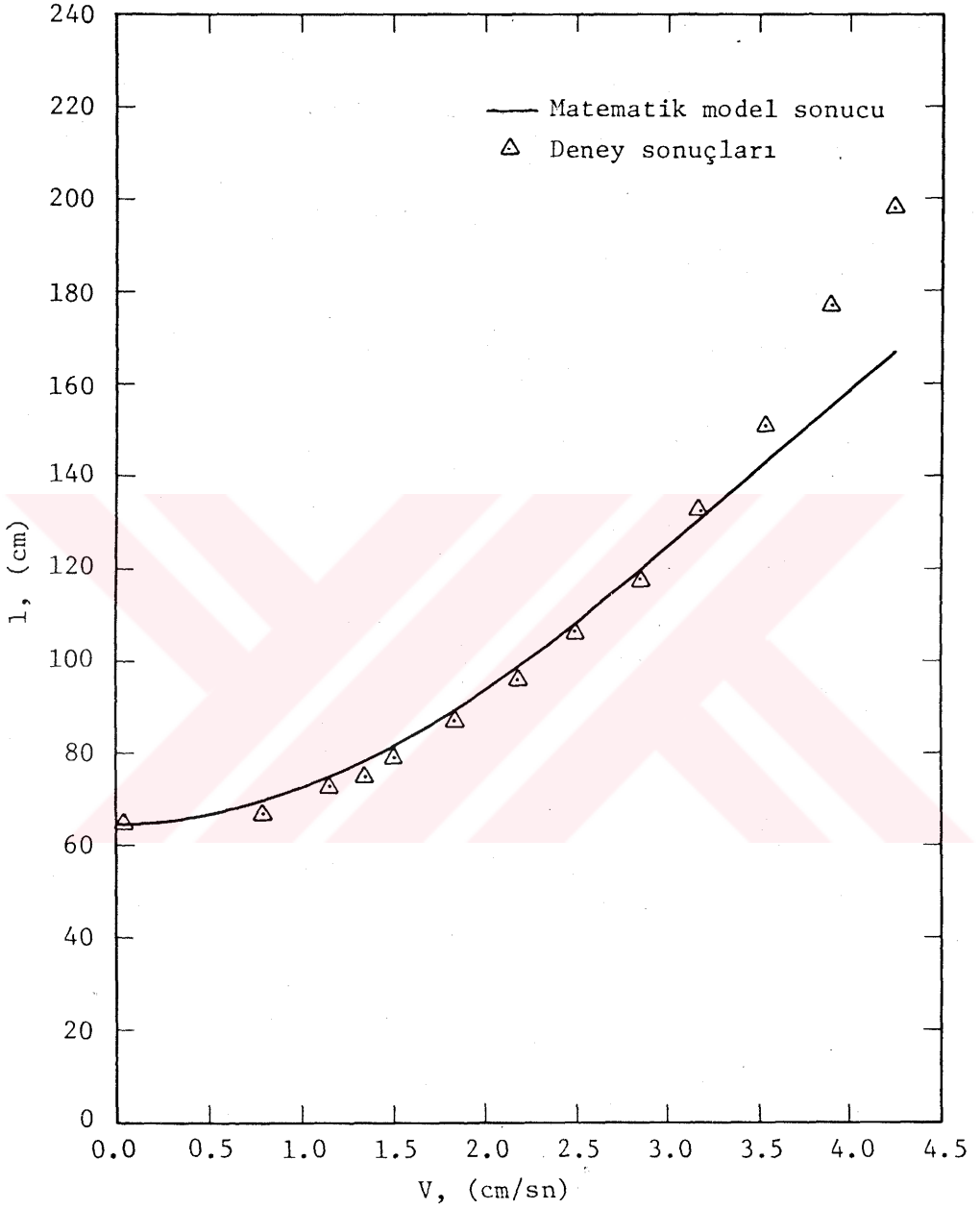
V (cm/sn)	Hesap Edilen Toplam Yatak Kalınlığı l (cm)	Deneyle Bulunan Yatak Kalınlığı l (cm)
0.00	65.50	65.5
0.82	69.55	67.3
1.17	74.89	73.0
1.37	78.82	75.3
1.51	81.43	79.8
1.64	84.48	—
1.85	89.70	87.8
2.19	98.55	96.2
2.53	108.79	106.6
2.88	119.79	118.3
3.22	132.16	132.1
3.56	144.20	151.0
3.90	154.87	177.6
4.24	167.19	198.0
4.59	182.14	—
4.86	190.69	—
4.93	193.08	—



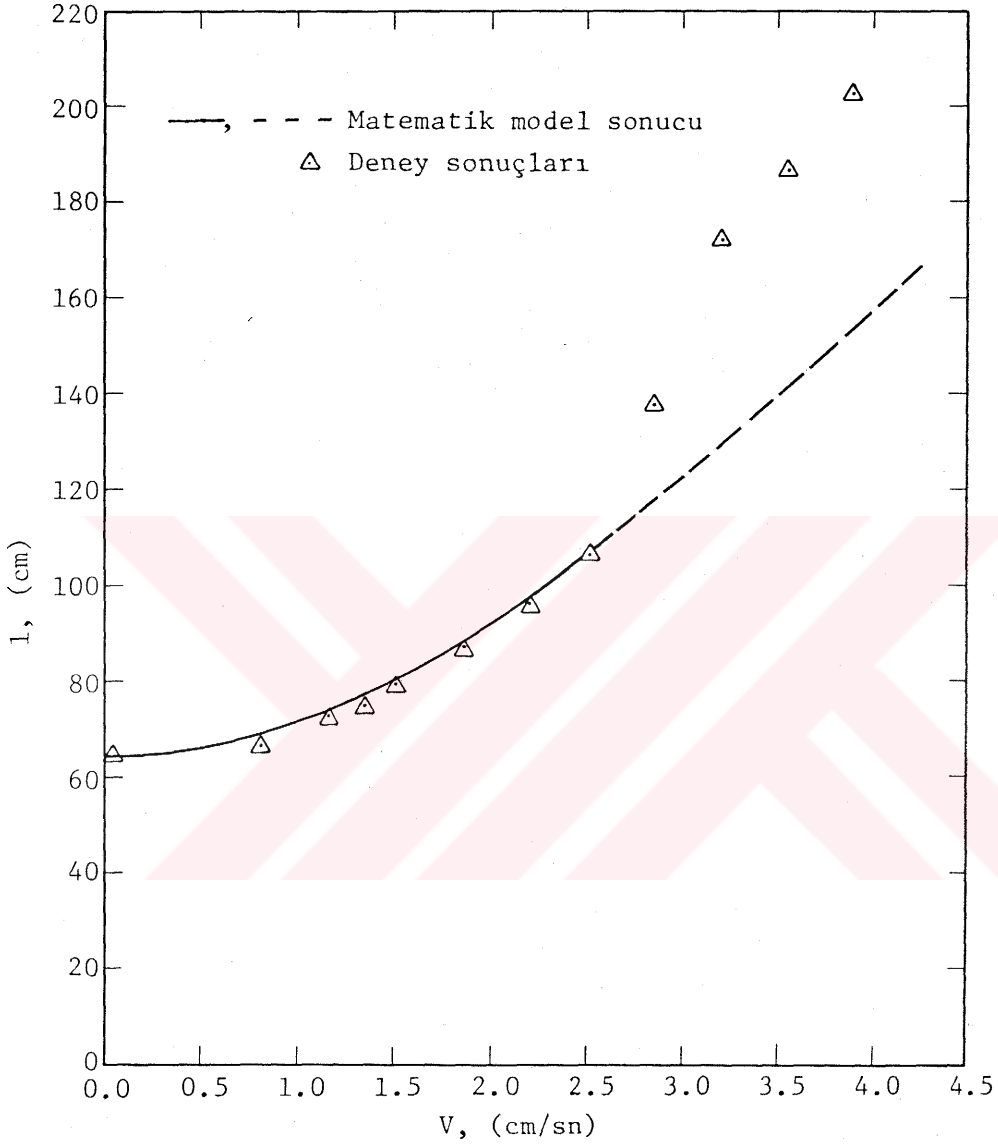
Şekil 7.1. Kum malzemedan mütewakkil filtreye ait, değişik geri yıkama hızlarında, matematik model ve deneyle bulunan genişlemiş yatak kalınlıkları (Su sıcaklığı 25°C ; Tablo 7.7 den istifade edilmiştir).



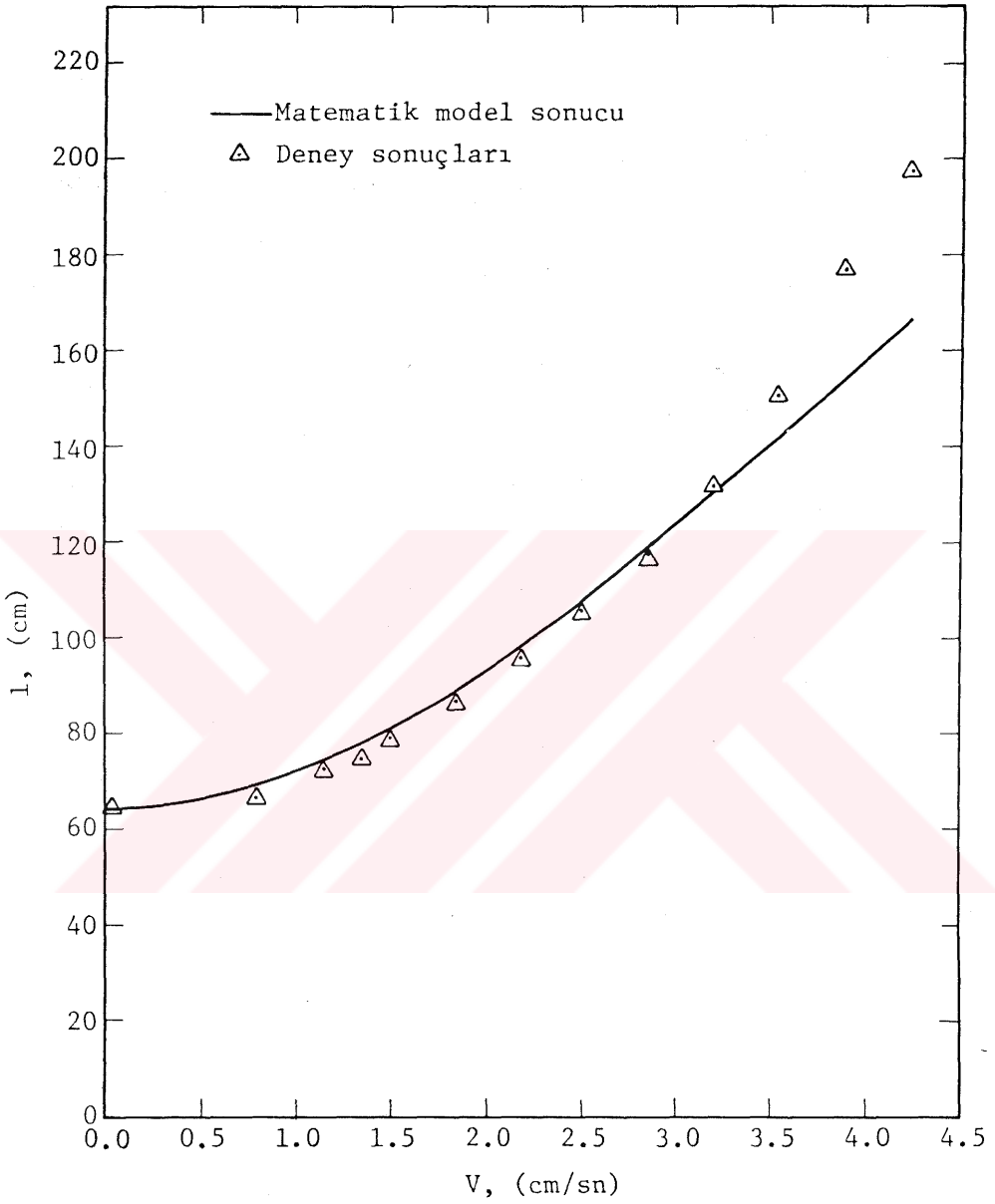
Şekil 7.2 Kum malzemeden müteşekkil filtreye ait, değişik geri yıkama hızlarında, matematik model ve deneyle bulunan genişmiş yatak kalınlıkları (Su sıcaklığı 25°C; Tablo 7.8 den istifade edilmiştir).



Şekil 7.3. Kömür malzemeden müteşekkıl filtreye ait, değişik geri yıkama hızlarında, matematik model ve deneyle bulunan genleşmiş yatak kalınlıkları (Su sıcaklığı 25°C; Tablo 7.9 dan istifade edilmiştir).



Şekil 7.4. Kömür malzemeden müteşekkıl filtreye ait, değişik geri yıkama hızlarında, matematik model ve deneyle bulunan genleşmiş yatak kalınlıkları (Su sıcaklığı 25°C; Tablo 7.10 dan istifade edilmiştir; Kesikii çizgiler pratikte karşılaşılmayan büyük genleşme bölgesinde teorik sonuçları göstermektedir).



Şekil 7.5. Kömür malzemeden müteşekkıl filtreye ait, değişik geri yıkama hızlarında, matematik model ve deneyle bulunan genişmiş yatak kalınlıkları (Su sıcaklığı 25°C; Tablo 7.11 den istifade edilmiştir).

Kum filtre için verilen Tablo 7.7 ve Tablo 7.8 incelendiğinde hesapla bulunmuş 1 değerlerinin birbirinin aynı olduğu sadece virgülden sonraki sayılarda değişiklik olduğu görülmektedir. Kömürde de aynı durum biraz daha farklı olmak üzere tesbit edilmiştir. Bu durumun n genleşme katsayısından ileri geldiği anlaşılmaktadır. (5.9) ve (5.10) denklemleriyle verilen n modeli ile (5.11) ve (5.12) bağıntılarıyla verilen n modelleri kum veya kömür filtre malzemelerinin genleşme hesabına uygulanırken karşılaştırıldığında, n 'in $n_{\text{küresel}}$ diye gösterilen kısmı her iki modelde de değişmediği görülmektedir. Ayrıca bu iki n modelinde d_h/d_n ve V_s/V_n parametrelerine üs olarak gelen a ve a' deki Re_s her iki model için de aynı olup d_h/d_n ve V_s/V_n oranları birbirine yakın çıkmakta ve a ile a' deki Re_s lerin üsleri ile d_h/d_n ve V_s/V_n değişkenlerinin üsleri arasında da fazla bir fark bulunmamaktadır. Filtrenin bu çalışmada olduğu gibi boyut itibarıyla dereceli malzemeden değilde uniform boyutlu malzemeden meydana gelmesi halinde yukarıda denklem numaraları verilen ayrı iki modelin kömüre uygulanmasında, hesaplanan 1 değerleri arasında biraz daha belirli bir fark görülmüştür.

Efektif çapı 0.53 mm ve uniformluk katsayısı 1.40 olan bir kum filtrede 2.75 cm/sn geri yıkama hızında %50 genleşmenin sağlanacağı ve bunun en iyi geri yıkama sonucunu verdiği referans (1) de belirtilmektedir. Referans (22) de de pratikteki uygulamalarda kum yatağın ince malzeme için %50, kaba malzeme için %30 olarak genleşmesi standard olmasına rağmen son senelerde daha küçük bir kum yatak genleşmesinin uygulandığı, bunun 0.8 mm ve 1.2 mm tane çapları için sırasıyla %20, %10 olduğu verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan kumun efektif çapı 0.52 mm ve uniformluk katsayısı 1.43 olup yukarıda referans (1) de verilen ince kumun özelliklerine uymaktadır. Şekil 7.1 den görüleceği üzere bu tip malzemede, referans (1) e göre, en iyi geri yıkama sonucunun alındığı %50 genleşmede hesapla tahmin edilen 1 değerinde deney sonuçlarına nazaran %6.5 nisbetinde bir hata olduğu görülmektedir. Buna mukabil, uygulanan en büyük geri yıkama hızı $V = 4.93$ cm/sn de 15.2 cm derinliğindeki az yoğun tabakanın da dikkate alınması halinde hata oranı %19.3 değerine ulaşmaktadır. Referans (1) ve (22) ye göre ince filtre malzemesi için pratikte uygulanan %50 genleşme halinde, modelin verdiği %6.5 civarındaki hata nisbeten küçük olup, %233 lük genleşme durumunda yapılan %19.3 lük hata ise, pratiktekine nazaran çok büyük genleşme şartları içerisinde olduğundan, kabul edilebilir sınırlar arasında kalmaktadır. Kömür filtre malzemesinde ise az

yoğun tabakanın dikkate alınmadığı Şekil 7.3 ve Şekil 7.5 de hızın 3.22 cm/sn değerine kadar hesap ve deneyle bulunan 1 değerinin hemen hemen birbirinin aynı olduğu, az yoğun tabakanın dikkate alındığı Şekil 7.4 de ise yukardaki hususun 2.53 cm/sn hız sınırına kadar sözkonusu olduğu görülmektedir. Şekil 7.3 ve Şekil 7.5 de 3.22 cm/sn hız değerine tekabül eden %102 genleşmeye kadar olan hata %4.0 den küçük olup genleşmenin %202 değerine ulaştığı en büyük hız değeri $V = 4.24$ cm/sn deki hatada %15.7 dir. Buna mukabil Şekil 7.4 de hızın 2.53 cm/sn olduğu değere karşı gelen %63 genleşmeye kadar en büyük hatanın %4 den küçük olduğu görülmekte ve bu şekle ait Tablo 7.10 da da hızın 4.24 cm/sn değerinde genleşmenin %210 dan ve buna karşı gelen hatanın da %17.9 dan büyük olduğu anlaşılmaktadır.

Kömür yatak için yukarda tesbit edilen hataların da kabul edilebileceği görülmektedir. Ancak %210 dan büyük genleşme hatasındaki hata nisbeti %17.9 un üzerinde olmakla beraber pratikte yatağın bu kadar yüksek mertebelere kadar genleştirilmesi sözkonusu değildir.

Sonuç olarak geliştirilen matematik modelin kum ve kömür filtre malzemelerinin genleşmiş yatak derinliklerinin hesaplanmasında genel olarak iyi sonuç verdiği, bunun bilhassa pratikteki genleşme sınırları içerisinde daha da uygun olduğu görülmüştür.

BÖLÜM VIII

SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen neticeler aşağıda özet halinde verilmiştir:

1. İçme suyu filtrelerinde geri yıkama hızını veren değişik bağıntılar araştırılmış ve kullanılan filtre malzemesi ile akışkanın porozite, Reynolds sayısı, özgül kütle, viskozite, tane boyutu, sıcaklık gibi fiziksel ve hidrolik parametrelerinin fonksiyonu olan değişik bağıntılar bulunmuştur.

2. Elde edilen geri yıkama hız ifadelerinden faydalanmak suretiyle geri yıkama hızını poroziteye bağlayan $V/K \cdot \alpha = \epsilon^n$ bağıntısı geliştirilmiş ve değişik V_i ve n sayıları elde edilmiştir. Nonlineer bölge için, Ergun denklemine göre bulunan n değerinin ise dane çapının fonksiyonu olduğu görülmüştür. Sınır tabakası teorisinin kullanıldığı ifadelerden faydalanılarak elde edilen n değerlerinin, sınırsız ortamdaki akımda tek bir küre için verilen Re_s Reynolds sayısının fonksiyonu olduğu ve bu n sayılarının Richardson ve Zaki'nin amprik sonuçları ile iyi bir uyum içinde bulunduğu tespit edilmiştir.

3. Filtre yatağının genleşmesinin hesabı için yatak genleşme katsayısı, n , ile ilgili olarak çoklu lineer regresyon metodu kullanılmış ve iki ayrı model geliştirilmiştir. Bunlardan birisi V_s/V_n , diğeri d_h/d_n şeklinde boyutsuz olan ve tane şeklini karakterize eden parametreler ihtiva etmektedir.

Geliştirilen bu modeller yardımıyla boyut itibariyle dereceli filtre malzemelerinin değişik hızlardaki yatak yüksekliklerinin hesabında kullanılabilecek bir metod verilmiştir. Ayrıca bu metod uniform boyutlu malzeme için de geçerlidir.

4. Laboratuarda, birinde Iowa Muscatine kumunun, diğerinde 1 numaralı karbonit filtre kömürünün bulunduğu iki ayrı uniformluk katsayısına haiz iki ayrı filtre malzemesinin değişik geri yıkama hızlarında ve belli bir su sıcaklığındaki yatak gen-

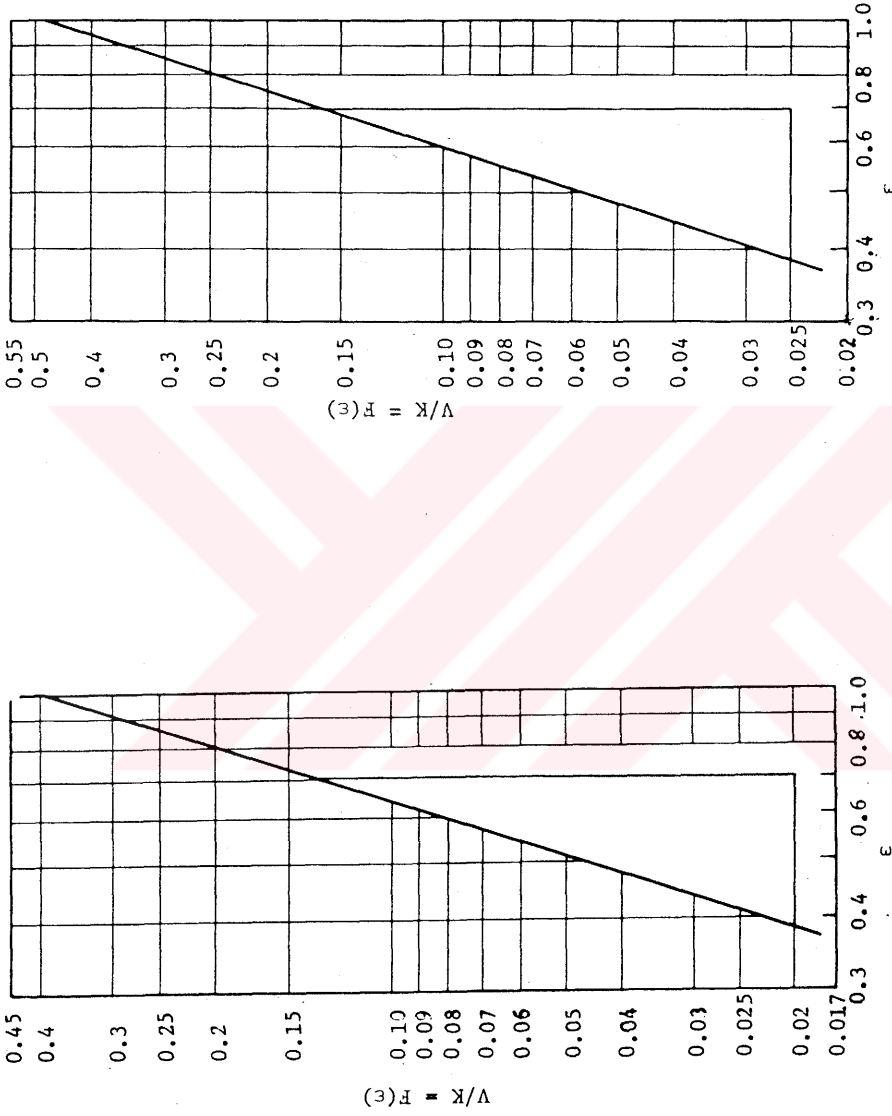
leşmelerine bağlı olarak yatak yükseklikleri ölçülmüş ve kuma nazaran daha az yoğun olan kömür malzemenin genleşmesi sırasında çok yoğun haldeki malzeme üzerinde tanelerin seyrek olarak dağıldığı bir tabaka görülmüştür. Bu çalışmada uygulanan geri yıkama hızından daha büyük hızların kömür yatak için kullanılması halinde malzeme kaybını önlemek için uniformluk katsayısı küçük olan malzemenin seçilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

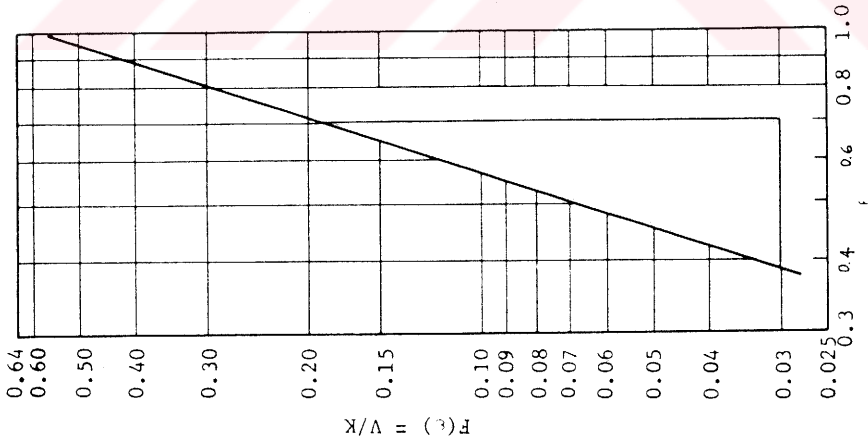
5. Yatak genleşmesinin hesabı için geliştirilen modeli kullanarak, deneyde ele alınan filtre malzemelerinin değişik geri yıkama hızlarındaki genleşmiş yatak yükseklikleri, yazılan bir bilgisayar programı yardımıyla hesap edilmiştir. Genleşme hesabı yapılırken kullanılan ve Richardson ve Zaki'ye ait olan $V/V_1 = \epsilon^n$ bağıntısının uygulanmasında $\epsilon < 0.9$ sınırlandırılmasının gerektiği tespit edilmiş ve bu hususun Al-Dibouni ve Garside ile Wilhelm ve Kwauk'un çalışma sonuçlarıyla da desteklendiği görülmüştür.

6. Geliştirilen model yardımıyla hesaplanan yatak yükseklikleri 3. maddede geçen iki ayrı n ifadesine göre de hemen hemen aynı sonuçları vermektedir.

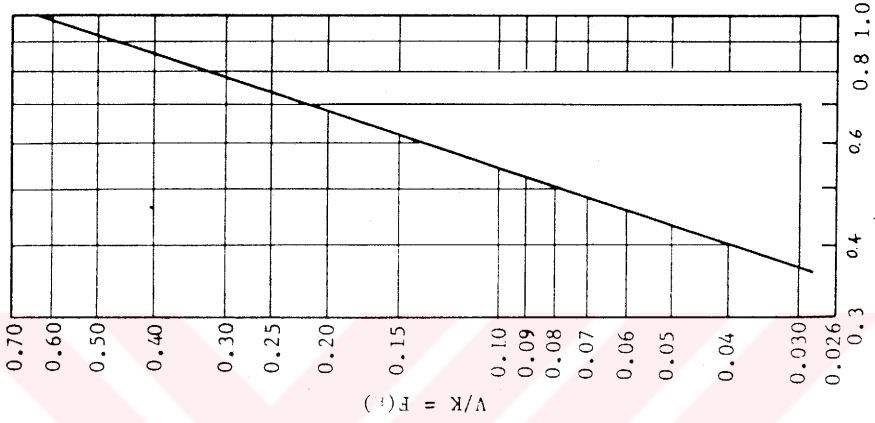
7. Teklif edilen modele göre hesaplanan yatak yükseklikleri, deney sonuçları ile karşılaştırılmış, bilhassa pratikte uygulanan ve %50 ye varan genleşme sınırları içinde aralarında çok iyi bir uyum olduğu tespit edilmiştir.

EKLER

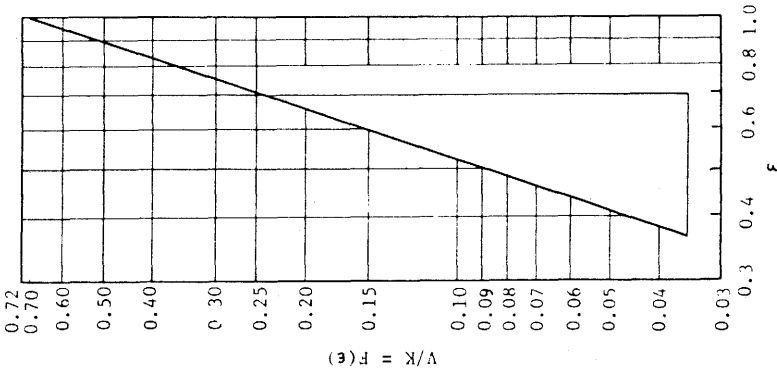




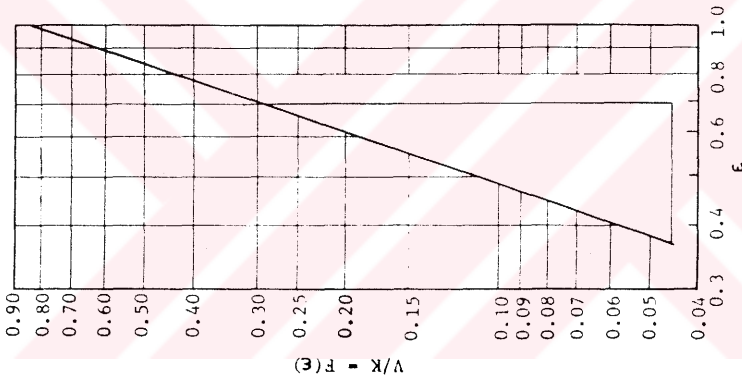
Şekil Ek.1.3. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu. ($Re_s = 100$).



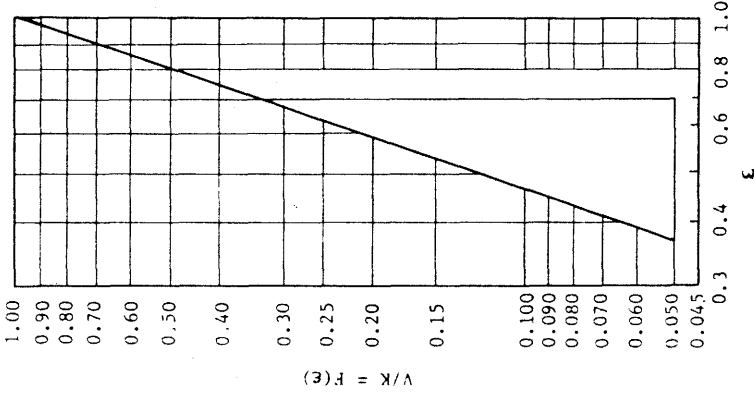
Şekil Ek.1.4. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 125$).



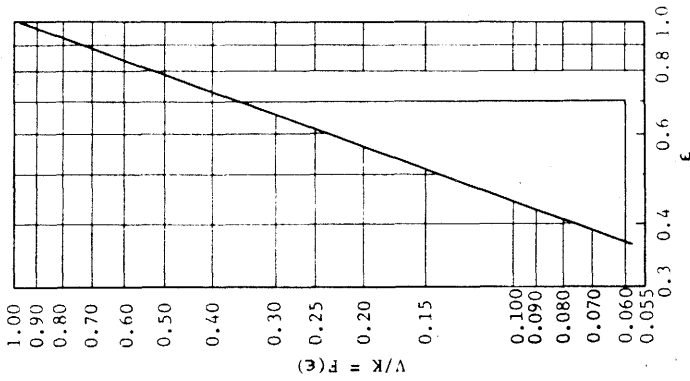
Sekil Ek.1.5. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 150$).



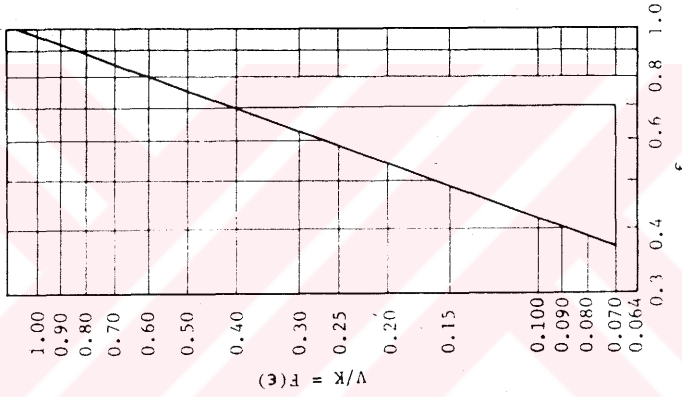
Sekil Ek.1.6. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 200$).



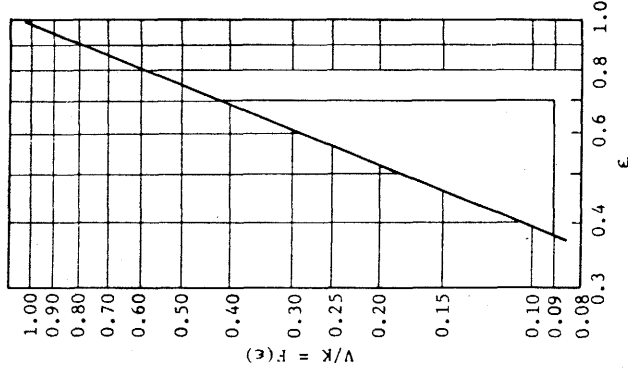
Sekil Ek.1.7. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 250$).



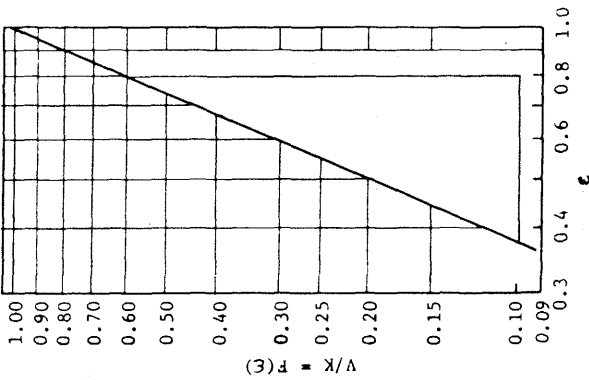
Şekil Ek.1.8. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 300$).



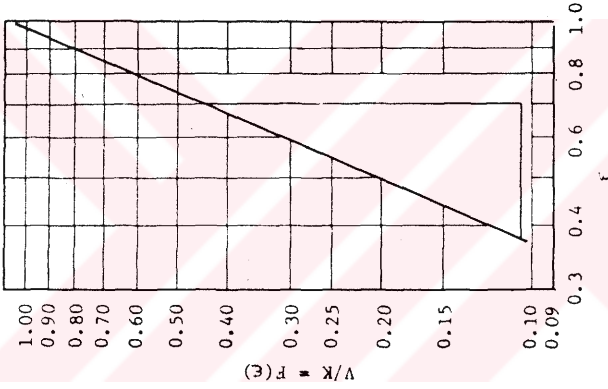
Şekil Ek.1.9. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 400$).



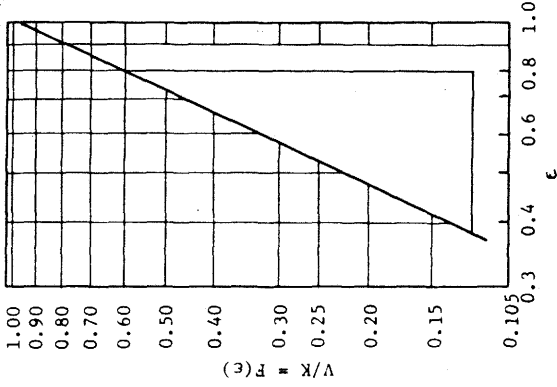
Şekil Ek.1.10. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 600$).



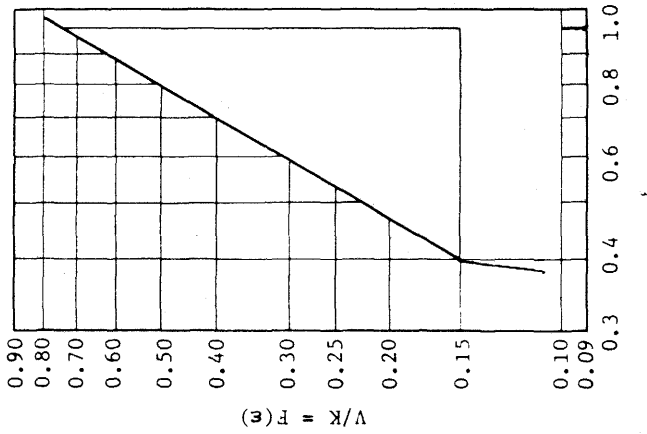
Şekil Ek.1.11. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 800$).



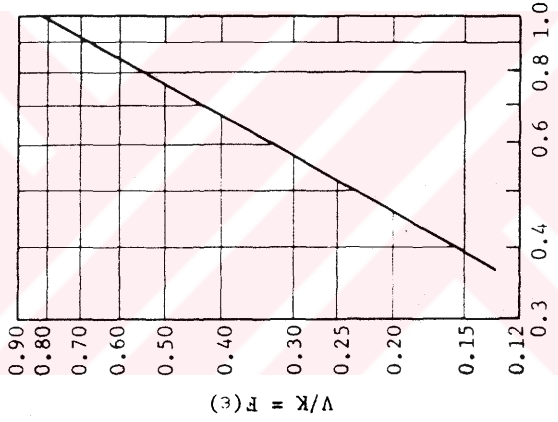
Şekil Ek.1.12. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 1000$).



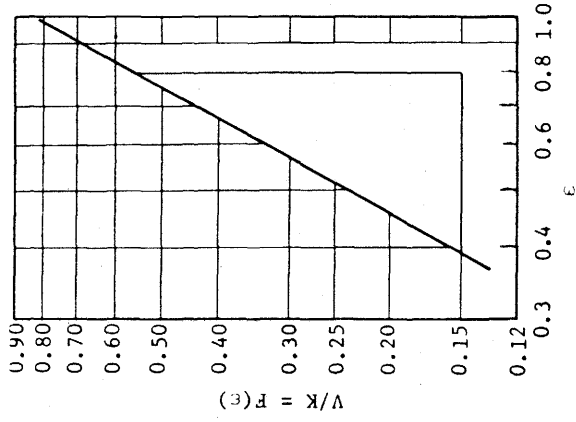
Şekil Ek.1.13. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 2000$).



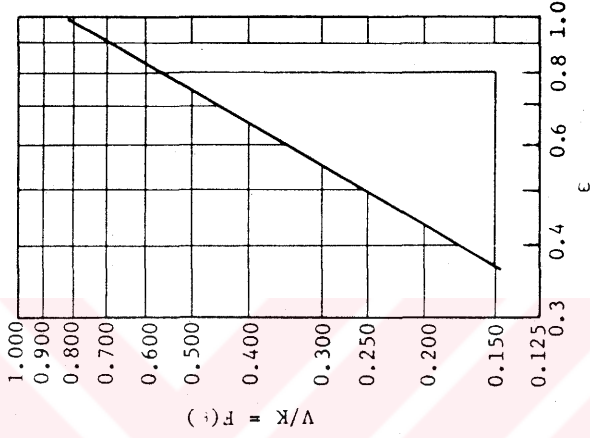
Şekil Ek.1.14. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 4000$).



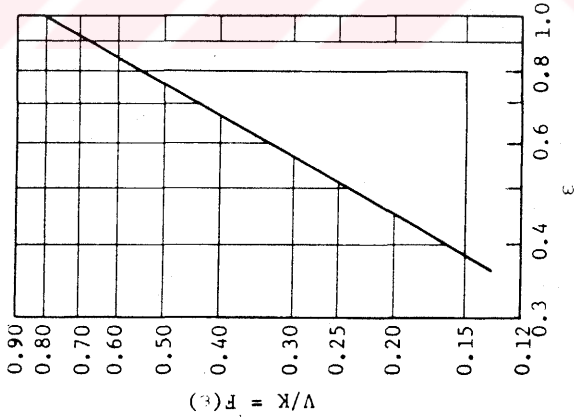
Şekil Ek.1.15. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 6000$).



Şekil Ek.1.16. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 8000$).



Şekil Ek.1.18. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 20.000$).



Şekil Ek.1.17. (4.64) bağıntısından hesaplanan $F(\epsilon)$ porozite fonksiyonu ($Re_s = 10.000$).

Ek. 2. Çeşitli Geri Yıkama Hızlarında, Tane Boyutu İtibariyle Dereceli Filtrelerde, Genleşmiş Yatak Yüksekliğini, Porozitesini ve Yatak Genleşme Katsayısını Veren Programlar.

Ek. 2.1. Programda n İçin (5.11) ve (5.12) Bağıntıları
Kullanılmıştır (Kömür İçin)

```

1 JOB          RUMAN
C PREDICTION OF EXPANSION OF FILTER BED IN STANDARD FORTRAN
C ATILLA AKKUYUNLU
  REAL DMEAN,REQ,VUS,VN,VI,EO,LO,A,N,L(56),E(56),VS(56),LR(56)
  REAL EE(13,16),LE(13,16),LO(13)
  READ(5,20) (VS(I), I=1,16)
20 FORMAT(11F7.4)
  J=0
66 J=J+1
  IF(J.EQ.14) GO TO 90
  READ(5,25,END=88) DMEAN,REQ,VUS,VN,VI,EO,LO
25 FORMAT(F6.4,F7.3,F5.2,F6.3,F6.3,F6.4,F7.5)
  WRITE(6,210) DMEAN,REQ,VUS,VN,VI,EO,LO
210 FORMAT(' DMEAN=',F6.4,'REQ=',F7.3,'VUS=',F5.2,'VN=',F6.3,'VI=',F6.
13,'EO=',F6.4,'LO=',F7.5)
  PRINT 27
27 FORMAT(1X,'EXPANDED BED DEPTH')
  A=-((4.117)*(REQ**(-0.4468))*((VUS/VN)**0.6544))
  IF((REQ.LT.503).AND.(REQ.GE.200)) GO TO 55
  N=(4.45*(13*DMEAN/101.5))*(REQ**(-0.1))*((VUS/VN)**A)
  PRINT 23,N
23 FORMAT(E13.7)
  GO TO 21
55 N=(4.45*(REQ**(-0.1))*((VUS/VN)**A))
  PRINT 24,N
24 FORMAT(E13.7)
21 WRITE(6,1000)
1000 FORMAT(/'-')
  LO(J)=LO
  DO 36 I=1,16
  E(I)=(VS(I)/VI)**(1/N)
  EE(J,I)=E(I)
  LR(I)=(1-EO)/(1-E(I))
  LI(I)=LR(I)*LO
  LE(J,I)=LI(I)
  IF(LE(J,I).LT.LO(J)) LE(J,I)=LO(J)
  IF(EE(J,I).GE.0.9) LE(J,I)=LE(J,I-1)
  PRINT 26, LE(J,1),EE(J,1)
26 FORMAT(E13.7)
36 CONTINUE
  GO TO 66
90 WRITE(6,500)
  DO 50 I=1,16
500 FORMAT(3(/))
  TOPL=0
  DO 40 J=1,13
  TOPL=TOPL+LE(J,1)
  WRITE(6,13) TOPL
40 CONTINUE
13 FORMAT(4X,F11.8)
89 STOP
  END

```

Ek.2.2. Programda n İçin (5.9) ve (5.10) Bağıntıları
Kullanılmıştır. (Kömür İçin).

```

1 JOB          NUMAN
C PREDICTION OF EXPANSION OF FILTER BED IN STANDARD FORTRAN
C ATILLA AKKOYUNLU
  REAL DMEAN,REQ,DH,DEQ,VI,F0,LO,A,N,L(56),F(56),VS(56),LR(56)
  REAL EE(13,16),LE(13,16),LO(13)
  READ(5,20) (VS(I), I=1,16)
20 FORMAT(11F7.4)
  J=0
66 J=J+1
  IF(J.EQ.14) GO TO 90
  READ(5,25,END=88) DMEAN,REQ,DH,DEQ,VI,F0,LO
25 FORMAT(F6.4,F7.3,F7.5,F6.4,F6.3,F6.4,F7.5)
  WRITE(6,210) DMEAN,REQ,DH,DEQ,VI,F0,LO
210 FORMAT(' DMEAN=',F6.4,' REQ=',F7.3,' DH=',F7.5,' DEQ=',F6.4,' VI=',F6.
13,' F0=',F6.4,' LO=',F7.5)
  PRINT 27
27 FORMAT(1X,'EXPANDED BED DEPTH')
  A=-(16.527118*(REQ**(-0.544511)*((DH/DEQ)**0.65001))
  IF((REQ.LT.50).AND.(REQ.GE.200)) GO TO 55
  N=(4.45*(18*DMEAN/101.6))*((REQ**(-0.1))*((DH/DEQ)**A))
  PRINT 23,N
23 FORMAT(E13.7)
  GO TO 21
55 N=(4.45*(REQ**(-0.1))*((DH/DEQ)**A))
  PRINT 24,N
24 FORMAT(E13.7)
21 WRITE(6,1000)
1000 FORMAT(/'-')
  LO(J)=LO
  DO 30 I=1,16
    E(I)=(VS(I)/VI)**(1/N)
    EE(J,I)=E(I)
    LR(I)=(1-EO)/(1-E(I))
    L(I)=LR(I)*LO
    LE(J,I)=L(I)
    IF(LE(J,I).LT.LO(J)) LE(J,I)=LO(J)
    IF(EE(J,I).GE.0.9) LE(J,I)=LE(J,I-1)
  PRINT 26, LE(J,I),EE(J,I)
26 FORMAT(2E16.7)
36 CONTINUE
  GO TO 66
90 WRITE(6,500)
  DO 50 I=1,16
500 FORMAT(3I/)
  TOPL=0
  DO 40 J=1,13
40 TOPL=TOPL+LE(J,I)
  WRITE(6,13) TOPL
50 CONTINUE
13 FORMAT(4X,F11.3)
86 STOP
  END

```

Ek.2.3. Programda n için (5.11) ve (5.12) Bağıntıları
Kullanılmıştır. (Kum için).

```

1000      'EXPANDED'
C PREDICTION OF EXPANSION OF FILTER BED IN STANDARD FORTRAN
C ATILLA AKKOYUNLU
      REAL DMEAN,REO,VUS,VN,VJ,E0,LO,A,N,L(56),E(56),VS(56),LR(56)
      REAL EE(7,16),LE(7,16),LO(7)
      READ(5,20) (VS(I), I=1,16)
20  FORMAT(11F7.4)
      J=0
66  J=J+1
      IF(J.EQ.8) GO TO 90
      READ(5,25,END=88) DMEAN,REO,VUS,VN,VJ,E0,LO
25  FORMAT(F6.4,F7.3,F5.2,F6.3,F6.3,F6.4,F7.5)
      WRITE(6,210) DMEAN,REO,VUS,VN,VJ,E0,LO
210  FORMAT('DMEAN=',F6.4,'REO=',F7.3,'VUS=',F5.2,'VN=',F6.3,'VJ=',F6.
13,'E0=',F6.4,'LO=',F7.5)
      PRINT 27
27  FORMAT(1X,'EXPANDED BED DEPTH')
      A=(14.1170)*(1+(1-0.44*(1))*(VUS/VN)**0.6644)
      IF((REO.LT.503).AND.(REO.GE.200)) GO TO 55
      N=(4.45+(18*DMEAN/101.6))*(REO*(-0.1))*(VUS/VN)**A)
      PRINT 23,N
23  FORMAT(E13.7)
      GO TO 21
55  N=(4.45*(REO*(-0.1))*(VUS/VN)**A)
      PRINT 24,N
24  FORMAT(E13.7)
21  WRITE(6,1000)
1000  FORMAT('/'-)
      LO(J)=LO
      DO 36 I=1,16
      E(I)=(VS(I)/VJ)**(1/N)
      EE(J,I)=E(I)
      LR(I)=(1-E0)/(1-E(I))
      L(I)=LR(I)*LO
      LE(J,I)=L(I)
      IF(LE(J,I).LT.LO(J)) LE(J,I)=LO(J)
      IF(EE(J,I).GE.0.9) LE(J,I)=LE(J,I-1)
      PRINT 26, LE(J,I),EE(J,I)
26  FORMAT(2E16.7)
36  CONTINUE
      GO TO 66
90  WRITE(6,500)
      DO 50 I=1,16
500  FORMAT(3I/1)
      TOPL=0
      DO 40 J=1,7
40  TOPL=TOPL+LE(J,I)
      WRITE(6,13) TOPL
50  CONTINUE
13  FORMAT(4X,F11.8)
88  STOP
      END

```

Ek.2.4. Programda n İçin (5.9) ve (5.10) Bağıntıları
Kullanılmıştır (Kum İçin).

```

1J08      TUMAN
C PREDICTION OF EXPANSION OF FILTER BED IN STANDARD FORTRAN
C ATILLA AKKOYUNLU
      REAL DMEAN,REQ,DH,DEQ,VI,EQ,LO,A,N,L(56),E(56),VS(56),LR(56)
      REAL EE(7,16),LE(7,16),LO(7)
      READ(5,20) (VS(I), I=1,16)
20 FORMAT(11F7.4)
      J=0
66 J=J+1
      IF(J.FQ.8) GO TO 90
      READ(5,25,END=88) DMEAN,REQ,DH,DEQ,VI,EQ,LO
25 FORMAT(F6.4,F7.3,F7.5,F6.4,F6.3,F6.4,F7.5)
      WRITE(6,210) DMEAN,REQ,DH,DEQ,VI,EQ,LO
210 FORMAT('DMEAN=',F6.4,'REQ=',F7.3,'DH=',F7.5,'DEQ=',F6.4,'VI=',F6.
13,'EQ=',F6.4,'LO=',F7.5)
      PRINT 27
27 FORMAT(1X,'EXPANDED BED DEPTH')
      A=-(16.5211)*(REQ**(-0.5445))*(1/DH/DEQ)**0.65001)
      IF((REQ.LT.503).AND.(REQ.GE.200)) GO TO 55
      N=(4.45+(16*DMEAN/101.61)*(REQ**(-0.1))*(1/DH/DEQ)**A)
      PRINT 23,N
23 FORMAT(E13.7)
      GO TO 21
55 N=(4.45*(REQ**(-0.1))*(1/DH/DEQ)**A)
      PRINT 24,N
24 FORMAT(E13.7)
21 WRITE(6,1000)
1000 FORMAT('/-' )
      LO(J)=LO
      DO 36 I=1,16
      L(I)=(VS(I)/VI)**(1/N)
      EE(J,I)=E(I)
      LR(I)=(1-EQ)/(1-E(I))
      L(I)=LR(I)*LO
      LE(J,I)=L(I)
      IF(LE(J,I).LT.LO(J)) LE(J,I)=LO(J)
      IF(EE(J,I).GE.0.9) LE(J,I)=LE(J,I-1)
      PRINT 26, LE(J,I),EE(J,I)
26 FORMAT(2E16.7)
36 CONTINUE
      GO TO 66
90 WRITE(6,500)
      DO 50 I=1,16
500 FORMAT(3(/))
      IOPL=0
      DO 40 J=1,7
40 TOPL=TOPL+LE(J,I)
      WRITE(6,13) TOPL
50 CONTINUE
13 FORMAT(4X,F11.8)
88 STOP
      END

```

Ek.3. Yatak Genleşme Katsayısını, n, Veren Çoklu Lineer Regresyon Programı ve Sonuçları.

```

DIMENSION XBAR(40),STD(40),D(40),RY(40),ISAVE(40),H(40),SB(40),T(4
10),W(40)
DIMENSION RX(1600)
DIMENSION R(820)
DIMENSION ANS(10)
1 FORMAT(A4,A2,I5,2I2)
2 FORMAT(25H1MULTIPLE REGRESSION      A4,A2//6X,14HSELECTION      12//
1)
3 FORMAT(9H0VARIABLE,5X,4HMEAN,6X,8HSTANDARD,6X,11HCORRELATION,4X,10
1HREGRESSION,4X,10HSTD. ERROR,5X,8HCOMPUTED/6H      NO.:1,8X,9HDEVIATIO
2N,7X,6X VS Y,7X,11HCOEFFICIENT,3X,12HOF REG.COEF.,3X,7HT VALUE)
4 FORMAT(1H ,14,6F14.5)
5 FORMAT(10H DEPENDENT)
6 FORMAT(1H0/10H INTERCEPT,10X,F16.5//23H MULTIPLE CORRELATION ,F13
1.5//23H STD. ERROR OF ESTIMATE,F13.5//)
7 FORMAT(1H0,21X,39HANALYSIS OF VARIANCE FOR THE REGRESSION//5X,19HS
OURCE OF VARIATION,7X,7HDEGREES,7X,14HSUM OF,10X,4HMEAN,12X,7HT VAL
2UE/30Z,10HOF FREEDOM,4X,7HSQUARES,9X,7HSQUARES)
8 FORMAT(10H ATTRIBUTABLE TO REGRESSION ,16,3F16.5/50H DEVIATION F
1ROM REGRESSION ,16,2F16.5)
9 FORMAT(1H ,5X,5HTOTAL,19X,16,F16.5)
10 FORMAT(36I2)
11 FORMAT(1H ,15X,18HTABLE OF RESIDUALS//9H CASE NO.:5X,7HY VALUE,5X,
110HY ESTIMATE,6X,8HRESIDUAL)
12 FORMAT(1H ,16,F15.5,2F14.5)
13 FORMAT(53H1NUMBER OF SELECTIONS NOT SPECIFIED. JOB TERMINATED.)
14 FORMAT(52H0THE MATRIX IS SINGULAR. THIS SELECTION IS SKIPPED.)
100 READ (5,1) PR,PR1,N,M,NS
IO=0
X=0.0
CALL CORR1 (N,M,IO,X,XBAR,STD,RX,R,D,B,T)
IF (NS) 109,108,105
106 WRITE (6,13)
GO TO 300
109 DO 200 I=1,NS
WRITE (6,2) PR,PR1,1
READ (5,10) NREST,NDEP,K,(ISAVE(J),J=1,K)
CALL ORDER (M,R,NDEP,K,ISAVE,RX,RY)
CALL MINV (RX,K,DET,B,T)
IF (DET) 112,110,112
110 WRITE (6,14)
GO TO 200
112 CALL MULTR (N,K,XBAR,STD,D,RX,RY,ISAVE,B,SB,T,ANS)
MM=K+1
WRITE (6,3)
DO 115 J=1,K
L=ISAVE(J)
115 WRITE (6,4) L,XBAR(L),STD(L),RY(J),B(J),SB(J),T(J)
WRITE (6,5)
L=ISAVE(MM)
WRITE (6,4) L,XBAR(L),STD(L)
WRITE (6,6) ANS(1),ANS(2),ANS(3)
WRITE (6,7)
L=ANS(8)
WRITE (6,8) K,ANS(4),ANS(6),ANS(10),L,ANS(7),ANS(9)
L=N+1
SUM=ANS(4)+ANS(7)
WRITE (6,9) L,SUM
IF (NREST) 200,200,120
120 WRITE (6,2) PR,PR1,1
WRITE (6,11)
MM=ISAVE(K+1)
DO 140 II=1,M
READ (13) (W(J),J=1,M)
SUM=ANS(1)
DO 130 J=1,K
L=ISAVE(J)
130 SUM=SUM+W(L)*B(J)
RISI=W(MM)-SUM
140 WRITE (6,12) II,W(MM),SUM,RISI
200 CONTINUE
GO TO 100
300 CONTINUE
STOP
END

```

Ek.3 (Devamı)

```

SUBROUTINE DATA (M,D)
  DIMENSION D(1)
1  FORMAT(3F9.5)
  READ (5,1) (D(I),I=1,M)
  RETURN
END

SUBROUTINE CORRE (N,M,I0,x,XBAR,STD,RX,R,B,D,T)
  DIMENSION X(1),XBAR(1),STD(1),RX(1),R(1),B(1),D(1),T(1)
  DO 100 J=1,M
    B(J)=0.0
    T(J)=0.0
100 K=(M*M+M)/2
    DO 102 I=1,K
      R(I)=0.0
      FN=N
      L=0
      IF(I0) 105,127,105
105 DO 106 J=1,M
        DO 107 I=1,N
          L=L+1
          T(J)=T(J)+X(L)
          XBAR(J)=T(J)
108 T(J)=T(J)/FN
          DO 115 I=1,N
            JK=0
            L=I-M
            DO 110 J=1,M
              L=L+N
              D(J)=X(L)-T(J)
110 B(J)=B(J)+D(J)
              DO 115 J=1,M
                DO 115 K=1,J
                  JK=JK+1
115 R(JK)=R(JK)+D(J)*D(K)
              GO TO 205
127 IF(N=M) 130,130,135
130 KK=M
              GO TO 137
135 KK=M
137 DO 140 I=1,KK
              CALL DATA (M,D)
              DO 140 J=1,M
                T(J)=T(J)+D(J)
                L=L+1
140 RX(L)=D(J)
                FKK=KK
                DO 150 J=1,M
                  XBAR(J)=T(J)
150 T(J)=T(J)/FKK
                L=0
                DO 160 I=1,KK
                  JK=0
                  DO 170 J=1,M
                    L=L+1
170 D(J)=RX(L)-T(J)
                    DO 180 J=1,M
                      B(J)=B(J)+D(J)

```

Ek.3 (Devamı).

```

DO 180 K=1,J
JK=JK+1
180 R(JK)=R(JK)+D(J)*D(K)
IF(N-KK) 205,205,185
185 KK=N-KK
DO 200 I=1,KK
JK=0
CALL DATA (M,D)
DO 190 J=1,M
XBAR(J)=XBAR(J)+D(J)
D(J)=D(J)-T(J)
190 R(J)=E(J)+D(J)
DO 200 J=1,M
DO 200 K=1,J
JK=JK+1
200 R(JK)=R(JK)+D(J)*D(K)

205 JK=0
DO 210 J=1,M
XBAR(J)=XBAR(J)/FN
DO 210 K=1,J
JK=JK+1
210 R(JK)=R(JK)-B(J)*B(K)/FN
JK=0
DO 220 J=1,M
JK=JK+J
220 STD(J)=SQRT(ABS(R(JK)))
DO 230 J=1,M
DO 230 K=J,M
JK=J+(K-K)/2
L=M*(J-1)+K
RX(L)=R(JK)
L=M*(K-1)+J
RX(L)=R(JK)
IF(STD(J)*STD(K)) 225,222,225
222 R(JK)=0.0
GO TO 230
225 R(JK)=R(JK)/(STD(J)*STD(K))
230 CONTINUE
FN=SQRT(FN-1.0)
DO 240 J=1,M
STD(J)=STD(J)/FN
L=M
DO 250 I=1,M
L=L+M+1
R(Y)=RX(L)
250 RETURN
END

SUBROUTINE ORDER (M,R,NDEP,K,ISAVE,RX,RY)
DIMENSION R(1),ISAVE(1),RX(1),RY(1)
NM=0
DO 130 J=1,K
L2=ISAVE(J)
IF(NDEP-L2) 122,123,123
122 L=NDEP+(L2-L2-L2)/2
GO TO 125
123 L=L2+(NDEP-NDEP-NDEP)/2
125 RY(J)=R(L)

```

Ek.3 (Devamı).

```

      DO 130 I=1,K
      L1=ISAVE(1)
      IF (L1=L2) 127,128,128
127  L=L1+(L2-L1)/2
      GO TO 129
128  L=L2+(L1-L2)/2
129  MM=MM+1
130  RX(MM)=R(L)
      ISAVE(K+1)=NDEP
      RETURN
      END

      SUBROUTINE MINV(A,N,D,L,M)
      DIMENSION A(1),L(1),M(1)
      D=1.0
      NK=-N
      DO 80 K=1,N
      NK=NK+N
      L(K)=K
      M(K)=K
      KK=NK+K
      BIGA=A(KK)
      DO 20 J=K,N
      I2=N+(J-1)
      DO 20 I=K,N
      IJ=I2+I
10  IF (ABS(BIGA)-ABS(A(IJ))) 15,20,20
15  BIGA=A(IJ)
      L(K)=I
      M(K)=J
20  CONTINUE
      J=L(K)

      IF (J=K) 35,35,25
25  KI=K-N
      DO 30 I=1,N
      KI=KI+N
      HOLD=A(KI)
      JI=KI+K+J
      A(KI)=A(JI)
30  A(JI)=HOLD
35  I=M(K)
      IF (I=K) 45,45,38
38  JF=N+(I-1)
      DO 40 J=1,N
      JK=NK+J
      JI=JF+J
      HOLD=A(JK)
      A(JK)=A(JI)
40  A(JI)=HOLD
45  IF (BIGA) 48,48,48
46  D=0.0
      RETURN
48  DO 55 I=1,N
      IF (I=K) 50,55,50
50  IK=NK+I
      A(IK)=A(IK)/(-BIGA)
55  CONTINUE

```

Ek.3 (Devamı).

```

DO 65 I=1,N
IK=NK+1
HOLD=A(IK)
IJ=J-N
DO 65 J=1,N
IJ=IJ+N
IF(I=K) 60,65,60
60 IF(J=K) 62,65,62
62 KJ=IJ-I+K
A(IJ)=HOLD*A(KJ)+A(IJ)
65 CONTINUE
KJ=K-N
DO 75 J=1,N
KJ=KJ+N
IF(J=K) 70,75,70
70 A(KJ)=A(KJ)/BIGA
75 CONTINUE
D=D+BIGA
A(KK)=1.0/BIGA
80 CONTINUE
K=N
100 K=(K-1)
IF(K) 150,150,105
105 I=L(K)
IF(I=K) 120,120,108
108 JC=N*(K-1)
JR=N*(I-1)
DO 110 J=1,N
JK=JO+J
HOLD=A(JK)
JI=JR+J
A(JK)=-A(JI)
110 A(JI)=HOLD
120 J=N(K)
IF(J=K) 100,100,125
125 KI=K-N
DO 130 I=1,N
KI=KI+N
HOLD=A(KI)
JI=KI-K+J
A(KI)=-A(JI)
130 A(JI)=HOLD
GO TO 100
150 RETURN
END

SUBROUTINE MULTR (N,K,XBAR,STD,D,RX,RY,ISAVE,B,SB,T,ANS)
DIMENSION XBAR(1),STD(1),D(1),RX(1),RY(1),ISAVE(1),B(1),SB(1),T(1)
1,ANS(1)
MM=K+1
DO 100 J=1,K
100 B(J)=0.0
DO 110 J=1,K
L1=K-(J-1)
DO 110 I=1,K
L=L1+I
110 B(J)=B(J)+RY(I)*RX(L)
RM=0.0
BO=0.0

```

Ek.3 (Devamı)

```

L1=ISAVE(MH)
DO 120 I=1,K
RM=RM+B(I)*RY(I)
L=ISAVE(I)
B(I)=B(I)*(STD(L1)/STD(L))
120 BQ=BQ+B(I)*XBAR(L)
BQ=XBAR(L1)-BQ
SSAR=RM/D(L1)
122 RM=SQRT(ABS(RM))
SSDR=D(L1)-SSAR
FN=N-K-1
SY=SSDR/FN
DO 130 J=1,K
L1=K*(J-1)+J
L=ISAVE(J)
125 SB(J)=SQRT(ABS((RX(L1)/D(L))*SY))
130 T(J)=B(J)/SB(J)
135 SY=SQRT(ABS(SY))
FK=K
SSARM=SSAR/FK
SSDRM=SSDR/FN
F=SSARM/SSDRM
ANS(1)=BQ
ANS(2)=RM
ANS(3)=SY
ANS(4)=SSAR
ANS(5)=FK
ANS(6)=SSARM
ANS(7)=SSDR
ANS(8)=FN
ANS(9)=SSDRM
ANS(10)=F
RETURN
END

```

Ek.3 (Devami).

MULTIPLE REGRESSION
SELECTION 1 ATILLA

VARIABLE NO.	MEAN	STANDARD DEVIATION	CORRELATION X VS Y	REGRESSION COEFFICIENT	STD. ERROR OF REG. COEFF.	COMPUTED T VALUE
1	-2.07592	0.48008	-0.91264	-0.92445	0.13267	-4.12301
DEPENDENT	-0.22358	0.33836	0.78854	0.65003	0.48497	1.39801
3	-0.46135	0.35866				

INTERCEPT 0.81439
MULTIPLE CORRELATION 0.92732
STD. ERROR OF ESTIMATE 0.14705

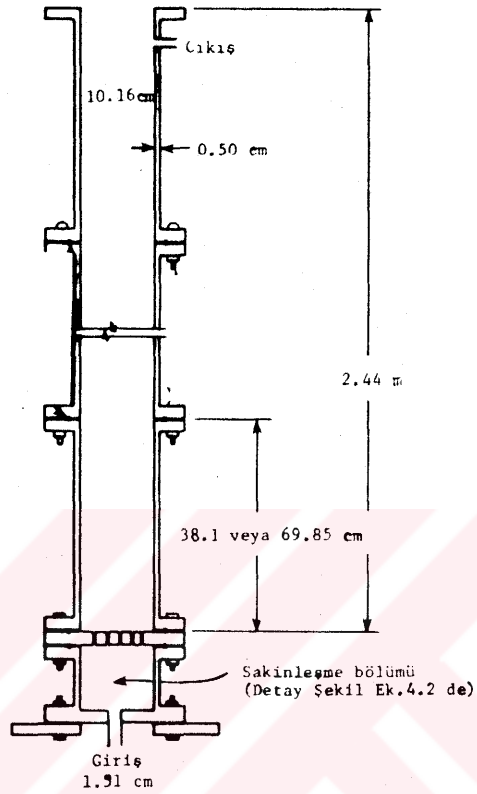
ANALYSIS OF VARIANCE FOR THE REGRESSION

SOURCE OF VARIATION	DEGREES OF FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARES	F VALUE
ATTRIBUTABLE TO REGRESSION	2	1.32175	0.66087	30.69492
IN ATTRIB. FROM REGRESSION	10	0.21623	0.02162	
TOTAL	12	1.54568		

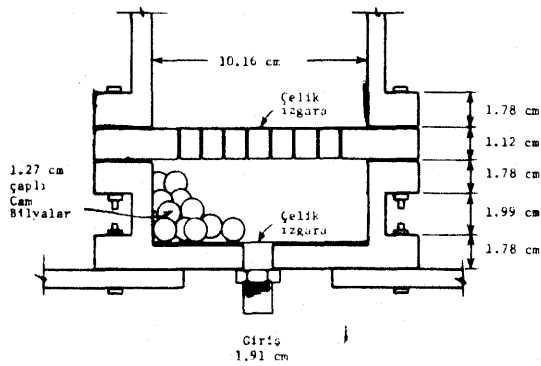
VARIABLE NO.	MEAN	STANDARD DEVIATION	CORRELATION X VS Y	REGRESSION COEFFICIENT	STD. ERROR OF REG. COEFF.	COMPUTED T VALUE
1	-2.07592	0.48008	-0.87432	-0.44679	0.11524	-3.87101
DEPENDENT	-0.20460	0.10276	0.69876	0.68437	0.33836	1.21403
3	-0.44385	0.23562				
INTERCEPT		0.61459				
MULTIPLE CORRELATION		0.89195				
STD. ERROR OF ESTIMATE		0.14645				

ANALYSIS OF VARIANCE FOR THE REGRESSION

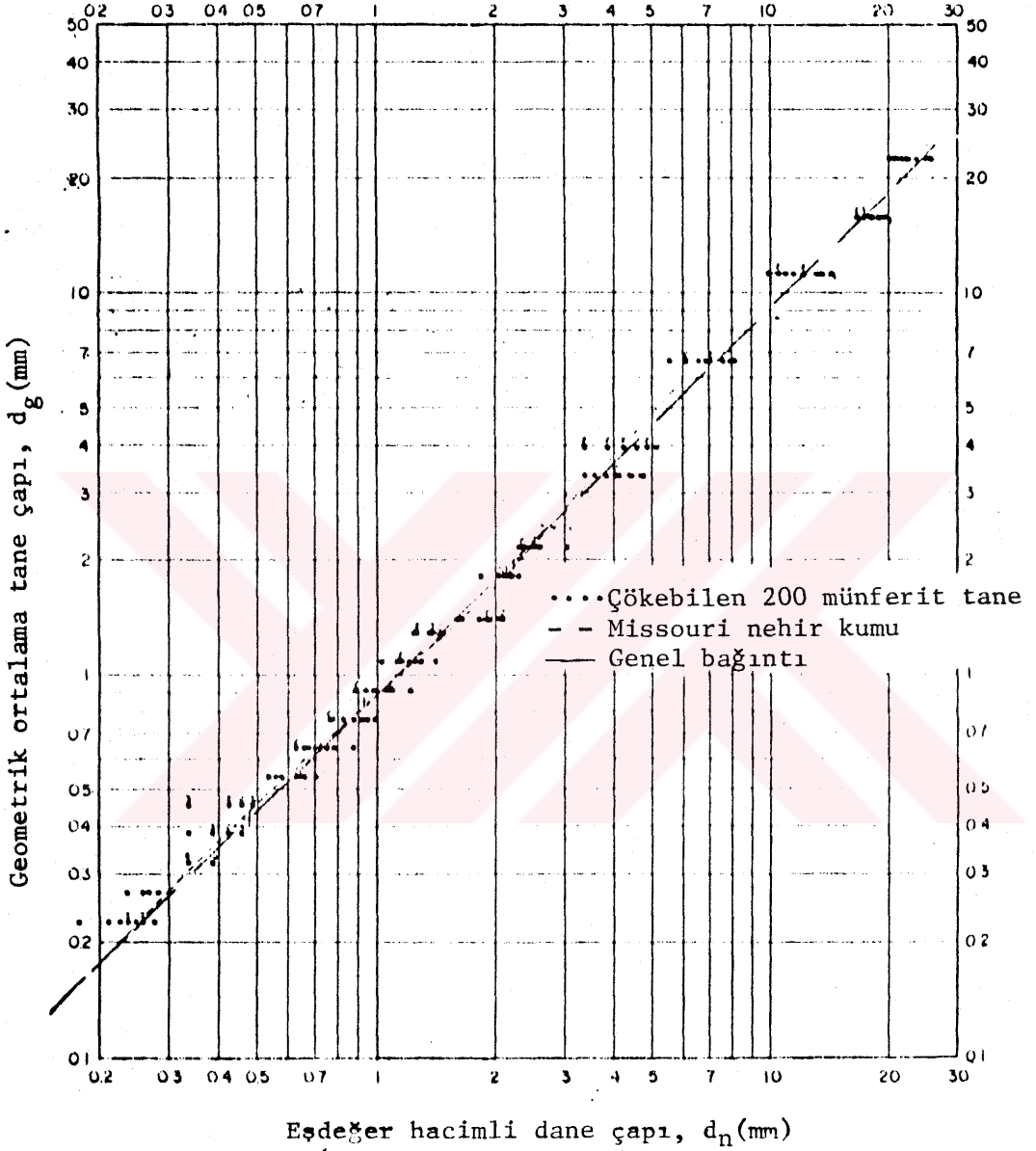
SOURCE OF VARIATION	DEGREES OF FREEDOM	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARES	F VALUE
ATTRIBUTABLE TO REGRESSION	2	0.83471	0.41736	19.45869
IN ATTRIB. FROM REGRESSION	10	0.23448	0.02345	
TOTAL	12	1.04920		



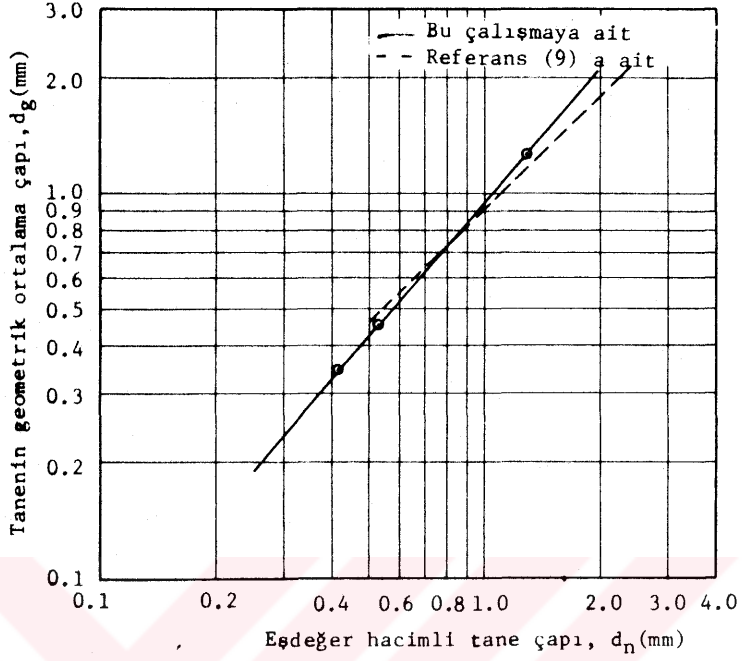
Şekil Ek.4.1. Flüdizasyon kolonu şeması.



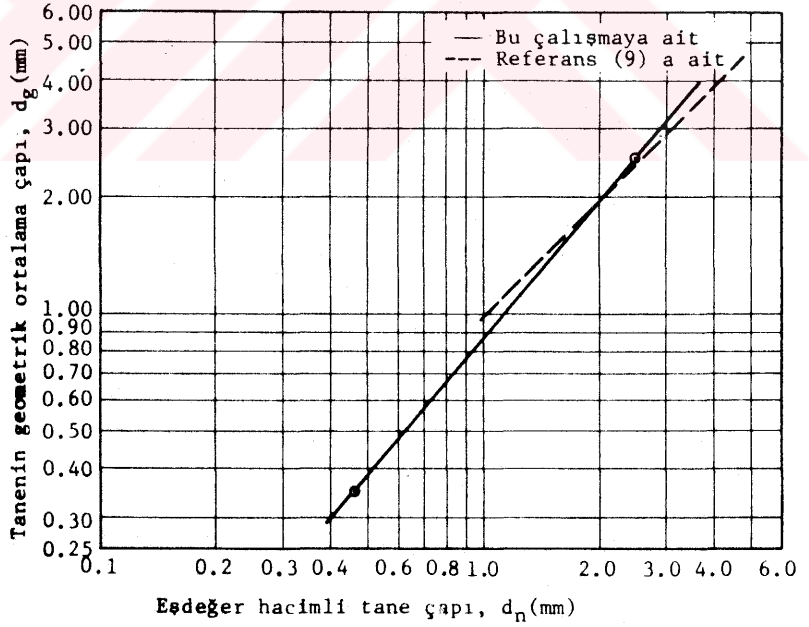
Sekil Ek.4.2. Sakinleşme bölümü detayı.



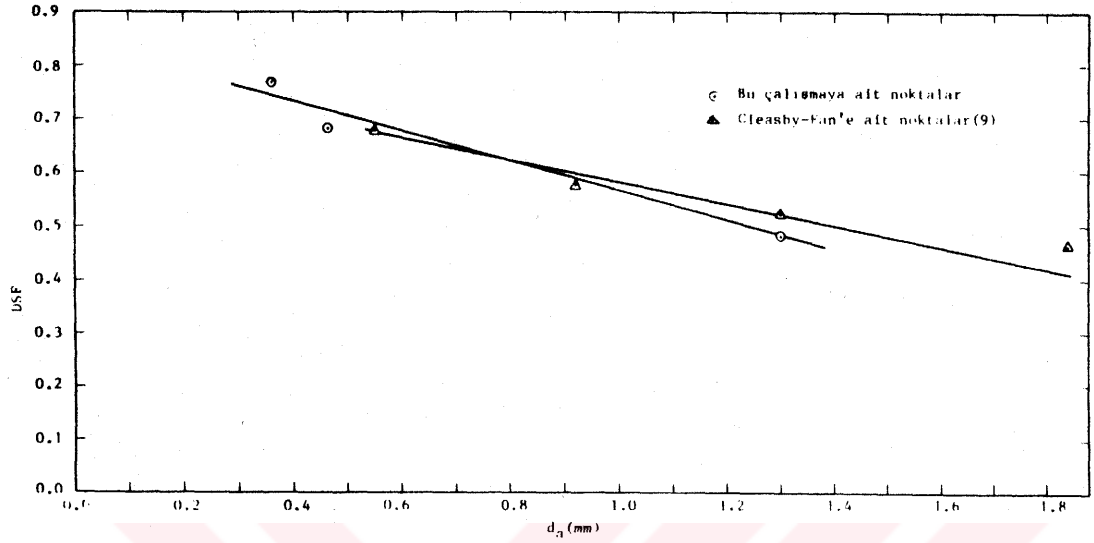
Şekil Ek.4.3. Tane geometrik ortalama çapı ile eşdeğer hacimli tane çapı arasındaki bağıntı(55).



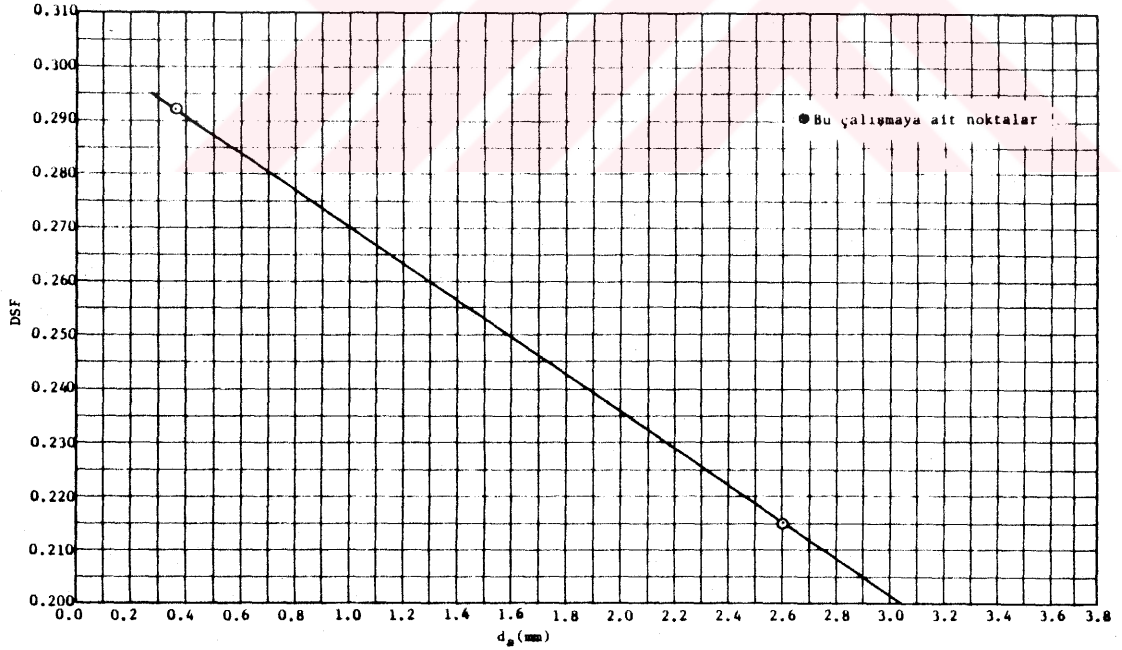
Şekil Ek.4.4. Tanenin d_n ve d_g çapları arasındaki bağıntı (Kum için).



Şekil Ek.4.5. Tanenin d_n ve d_g çapları arasındaki bağıntı (Kömür için).



Şekil Ek.4.6. Kum filtre malzemesine ait DSF ile d_n arasındaki bağıntı.



Şekil Ek.4.7. Kömür filtre malzemesine ait DSF ile d_2 arasındaki bağıntı.

Tablo Ek. 4.1. Kum Elek Analiz Sonuçları

Amerikan Standard Elek No.su	Elek açıklığı (mm)	Her Elek Üzerinde Kalan Malzeme Miktarı (gr)	Her Eleği Geçen Malzeme Miktarı (gr)	Her eleği Geçen Malzemenin Ağırlıkça Yüzdesi (%)
10	2.00	0.0	197.4	100.00
12	1.68	0.1	197.3	99.95
14	1.41	0.1	197.2	99.89
16	1.19	0.3	196.9	99.74
18	1.00	4.5	192.4	97.46
20	0.841	41.1	151.2	76.59
25	0.707	61.0	90.2	45.69
30	0.590	50.4	39.8	20.16
35	0.500	26.4	13.4	6.78
40	0.420	10.5	2.9	1.47
50	0.300	2.80	0.1	0.05
Tava		0.10	0.0	
		Toplam ağırlık=197.4 gr		

Tablo Ek. 4.2. Kömür Elek Analiz Sonuçları

Amerikan Standard Elek No.su	Elek açıklığı (mm)	Her Elek Üzerinde Kalan Malzeme Miktarı (gr)	Her Eleği Geçen Malzeme Miktarı (gr)	Her Eleği Geçen Malzemenin Ağırlıkça Yüzdesi (%)
7	2.83	3.0	194.9	98.48
8	2.36	6.1	188.8	95.40
10	2.00	16.6	172.2	87.01
12	1.68	32.4	139.8	70.64
14	1.41	32.5	107.3	54.22
16	1.19	29.9	77.4	39.11
18	1.00	26.6	50.8	25.67
20	0.841	24.1	26.7	13.49
25	0.707	13.5	13.2	6.67
30	0.590	7.4	5.8	2.93
35	0.500	3.1	2.7	1.36
40	0.420	1.4	1.3	0.65
50	0.300	0.8	0.5	0.25
Tava		0.5	0.0	0.00
		Toplam ağırlık=197.9 gr		

Tablo Ek. 4.3. Malzemeye Ait Efektif Çap ve Liniformluk Katsayısı

Malzeme	Efektif Çap d_{10} (mm)	Uniformluk Katsayısı u
Kum	0.52	1.430
Kömür	0.77	1.935

Tablo Ek. 4.4. Uniform Boyutlu Kum ve Kömüre Ait Çeşitli Çaplar.

Amerikan Standard Elek No.su	6 - 7	7 - 8	8 - 10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-50
Kum													
d_n (mm)	-	-	-	-	-	1.286	1.120	0.970	0.840	0.720	0.630	0.533	0.416
d_a (mm)	-	-	-	-	-	1.300	1.095	0.9205	0.7740	0.6485	0.5450	0.4600	0.3600
d_g (mm)	-	-	-	-	-	1.295	1.0908	0.917	0.771	0.646	0.543	0.458	0.355
Kömür													
d_n (mm)	2.90	2.476	2.16	1.86	1.61	1.40	1.20	1.04	0.90	0.78	0.665	0.580	0.459
d_a (mm)	3.09	2.595	2.180	1.840	1.545	1.300	1.095	0.9205	0.7740	0.6485	0.5450	0.4600	0.3600
d_g (mm)	3.079	2.584	2.173	1.833	1.539	1.295	1.090	0.917	0.771	0.646	0.543	0.458	0.355

Tablo Ek. 4.5. Kum ve Kömür Malzemeye Ait Deneyle Bulunan V_s Serbest Çökelme Hızları.

Malzeme	Tane Aritmetik Ortalama Çapı d_a (mm)	Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$	Ortalama Serbest Çökelme Hızı V_s (cm/sn)
Kum	1.300	22,6	14.156
	0.460	22,9	7.247
	0.360	22,5	5.849
Kömür	2.595	22,8	10.140
	0.360	22,7	2.320

Tablo Ek. 4.6. Kum Malzemeye Ait Dinamik Şekil Faktörü Değerleri.

d_a (mm)	DSF
1.300	0.480
1.095	0.540
0.9205	0.590
0.7740	0.630
0.6485	0.665
0.5450	0.690
0.4600	0.679
	0.716
0.3600	0.771
	0.740

Tablo Ek. 4.7. Kömür Malzemeye Ait Dinamik Şekil Faktörü

d_a (mm)	DSF
3.09	0.1985
2.595	0.215
2.180	0.2296
1.840	0.241
1.545	0.251
1.300	0.2596
1.095	0.2668
0.9205	0.2728
0.7740	0.2776
0.6485	0.282
0.5450	0.2857
0.4600	0.2885
0.3600	0.292

REFERANSLAR

- (1) Weber, J.R., Watter, J., "Physicochemical Processes for Water Quality Control", Wiley-Interscience, New York, 1972.
- (2) Kor, N., "Suların Tasfiyesi", İnşaat Fakültesi Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 1974.
- (3) Ives, K.J., "Theory of Filtration", Special Subject No.7, International Water Supply Congress and Exhibition, Vienna, 1969.
- (4) EPA., "Wastewater Filtration Design Considerations", EPA Technology Transfer Seminar Publication, 1974.
- (5) Cleasby, J.L., Stangl, E.W., Rice, G.A., "Developments In Backwashing Of Granular Filters", Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No.EE5, Oct. (1975), pp.713-727.
- (6) Richardson, J.F., Zaki, W.N., "Sedimentation and Fluidisation: Part I", Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol.32, (1954), pp.35-53.
- (7) Wen, C.Y., Yu, Y.H., "Mechanics of Fluidization", Chemical Engineering Progress Symposium Series, Vol.62, No.62, (1966), pp.100-111.
- (8) Lewis, E.W., Bowerman, E.W., "Fluidization of Solid Particles in Liquids", Chemical Engineering Progress, Vol.48, No.12, Dec. (1952), pp.603-610.
- (9) Cleasby, J.L., Fan, K.S., "Predicting Fluidization and Expansion of Filter Media", Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No.EE3, June. (1981), pp.455-471.
- (10) Briggs, L.T., McCulloch, D.S., Moser, F., "The Hydraulic Shape of Sand Particles", Journal of Sedimentary Petrology, Vol.32, (1962), pp.645-657.

- (11) Fisher, J.W., "Methods of Particle Shape Measurement for Use in Correlation of Expansion and Flow Rate in Granular Filter Beds", Unpublished Paper, England Library, University College, London (1976).
- (12) Cleasby, J.L., Arboleda, J., Burns, D.E., Prendiville, P.W. Savage, E.S., "Backwashing of Granular Fil-
ters", Journal American Water Works Association, Vol.69, No.2, Feb.(1977)
- (13) Carvalho, W.J., "Fluidization of Crushed Anthracite Coal", Unpublished M.S. Thesis, Library, Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, (1970).
- (14) Happel, J., "Viscous Flow in Multiparticle Systems: Slow Motion of Fluids Relative to Beds of Spherical Particles", J.Am. Inst Chem Engrs, Vol.4, No.2, June. (1958), pp.197-201.
- (15) Jottrand, R., "An Experimental Study of Mechanism of Fluidization", Journal of Applied Chemistry, Vol.2, Supplementary Issue, No.1, (1952), pp.S17-S26.
- (16) Wilhelm, R.H., Kwauk, M., "Fluidization of Solid Particles", Chemical Engineering Progress, Vo.44, No.3, March. (1948), pp.201-218.
- (17) Camp, T.R., "Theory of Water Filtration", Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, Vol.90, No.SA4, Aug. (1964), pp.1-30.
- (18) Garside, J., Al-Dibouni, M.R., "Velocity-Voidage Relationships for Fluidization and Sedimentation", Ind. Eng. Chem. Process Design and Development Vol.16, No.2, (1977), pp.206-214.
- (19) Perry, R.H., Chilton, C.H., "Chemical Engineers' Handbook", Fifth Edition, McGraw Hill Book Company, New York, 1973.
- (20) Muslu, Y., Akkoyunlu, A., "İçme Suyu Filtrelerinde Geri Yıkama", Sakarya D.M.M.A. Dergisi, Sayı MMA-1, Ağustos. (1976), 101-116.

- (21) Clark, J.W., Viessman, W., Hammer, M.J., "Water Supply and Pollution Control", International Text Book Company, Scranton, Pennsylvania, 1971.
- (22) Huisman, L., "Lecture Notes on Rapid Sand Filtration", Delft, University of Technology, Netherlands, 1974.
- (23) Le Clair, B.P., "Two Component Fluidization", Unpublished M.A. Thesis, Library, University of British Columbia, British Columbia, Canada, (1964).
- (24) Muslu, Y., "Temel İşlemler I", İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 1981.
- (25) Muslu, Y., "Kullanılmış Suların Tasfiyesi", Cilt I, Izgaralar, Kum Tutucular, Çöktürme Havuzları, İ.T.Ü. Kütüphanesi, Sayı 1006, 1974.
- (26) Wadell, H., "Sphericity and Roundness of Rock Particles", Journal of Geology, Vol.41, (1933), pp.310-331.
- (27) Krumbein, W.C., "Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles", Journal of Sedimentary Petrology, Vol.2, (1941), pp.64-72.
- (28) Heywood, H., "Measurement of the Fineness of Powdered Materials", Instn. Mech. Engrs. (London) Proc, Vol. 140, (1938), pp.257-308.
- (29) Beirne, T., Hutcheon, J.M., "The Shape of Ground Coke Particles", British Journal of Applied Physics, Supplement 3, (1954), pp.76-81.
- (30) Schiller, L., Naumann, A., Z. Ver. Deutsch. Ing., 77, 318 (1935).
- (31) Leva, "Max. Fluidization", McGraw Hill Book Co. Inc., New York, 1959.
- (32) Leva, M., Grummer, M., Weintraub, M., Pollchik, M., "Introduction to Fluidization", Chem. Eng. Prog., Vol.44, (1948), pp.511-520.

- (33) Leva, M., Grummer, M., Weintraub, M., Pollchik, M., "Fluidization of Solid Nonvesicular Particles", Chem. Eng. Prog., Vol.44, (1948), pp.619-626
- (34) Fair, G.M., Geyer, J.C., Okun, D.A., "Water and Wastewater Engineering", Vol.2, John Wiley and Sons, New York, 1968.
- (35) Tesarik, I., "{Discussion of} Theory of Water Filtration" Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE, Vol.91, No.SA2, Apr. (1965), pp.74.
- (36) Lewis, W.K., Gilliland, E.R., Bauer, W.C., "Characteristic of Fluidized Particles", Industrial and Engineering Chemistry, Vol.41, No.6, June (1949), pp.1104-1116.
- (37) Steinour, J.H., Ind. Eng. Chem., 36, 618, (1944).
- (38) Brinkman, H.C., Appl. Sci. Res., A1, 27 (1947).
- (39) Hawksley, P.G.W., "Some Aspects of Fluid Flow", Paper 7, Institute of Physics and E. Arnold, London, (1951).
- (40) Loeffler, A.L., Ruth, B.F., A.I. Ch. E. J., 5, 310 (1959).
- (41) Oliver, D.R., Chem. Eng. Sci., 15, 230 (1961).
- (42) Letan, R., "On Vertical Dispersed Two Phase Flow", Shorter Communications, Chemical Engineering Science, Vol.29, (1974), pp.621-624.
- (43) Wen, C.Y., Fan, L.S., Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev., 13, 194, (1974).
- (44) EPA., "Backwash of Granular Filters Used in Wastewater Filtration", Environmental Protection Technology Series, April 1977.
- (45) Amirtharajah, A., Cleasby, J.L., "Predicting Expansion of Filters During Backwash", Journal of the American Water Works Association, Jan.(1972) pp.52-59.

- (46) Gunasingham, K., Lekkas, T.D., Fox, G.T.J., Graham, N.J., D., "Predicting the Expansion of Granular Filter Beds", *Filtration and Separation*, 16, (1979), pp.619-623.
- (47) Pruden, B.B., "Particle Size Segregation in Particulately Fluidized Beds", Unpublished M.A. Sc. Thesis, Library, University of British Columbia British Columbia, Canada, (1964).
- (48) Amirtharajah, A., "Expansion of Graded Sand Filters During Backwashing", Unpublished M.S. Thesis, Library, Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, (1970).
- (49) J.L. Cleasby "Backwashing of Granular Filters Used in Wastewater Filtration", Engineering Research Institute. Iowa State University, Ames, Iowa, Sept. (1973).
- (50) Zabrodsky, S.S., "Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds", The M.I.T. Press, Cambridge, Mass, 1966.
- (61) Amirtharajah, A., "Optimum Expansion of Sand Filters During Backwash", Unpublished Ph.D. Thesis, Library, Iowa State University of Science and Technology, Ames, Iowa, (1971).
- (52) Rowe, P.N., Henwood, G.A., "Drag Forces in a Hydraulic Model of a Fluidized Bed", Part I, *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol.39, (1961), pp.43-54.
- (53) American Society for Testing and Materials, "1980 Book of A.S.T.M. Standards", Part 14, Philadelphia, Pa., 1980.
- (54) American Society for Testing and Materials, "1980 Book of A.S.T.M. Standards, Part 15, Philadelphia, Pa., 1980.
- (55) U.S. Inter Agency Committee on Water Resources, "A Study of Methods Used in Measurement and Analysis

of Sediment Load in Streams", Subcommittee on Sedimentation Report No.12: Some Fundamentals of Particle Size Analysis, Govt. Printing Office Washington, D.C., Dec. 1957.

- (56) Şekerdağ, N., "Filtrelerde Çeşitli Faktörlerin Akım Üzerindeki Etkisinin Araştırılması", M.M.L.S. Tezi, İ.T.Ü. İnş. Fak., (1980).
- (57) Muslu, Y., "Sağlık Tekniği Tesislerinde Taneli Malzeme İçersinde Akım ve Biyokimyasal Oksitlenme Hızı" Doçentlik Tezi, İ.T.Ü. İnş.Fak., (1970).
- (58) Muslu, Y., "Nonlinear Flow Through Nonuniform Granular Media", Bulletin of the Technical University of Istanbul, Vol.29, No.2, (1976), pp.1-22.
- (59) Muslu, Y., "Linear Flow Through Porous Media", Bulletin of the Technical University of Istanbul, Vol. 24, No.1, (1971), pp.53-75.
- (60) Muslu, Y., "A Study of Porous Media Flow With the Aid of Boundary Layer Theory", Bulletin of the Technical University of Istanbul, Vol.29, No.1, (1976) pp.17-34.
- (61) Ergun, S., "Fluid Flow Through Packed Columns", Chemical Engineering Progress, Vol.48, No.2, Feb.(1952), pp.89-94.
- (62) Muslu, Y., "Fundamental Factors Governing the Flow Over Packings and Beds", Sakarya D.M.M.A. Bülteni, Vol.1, No. SEA-1, (1976).

Pu tezi yöneten ve tezin her safhasında değerli mesaisinden fedâkarlık ederek, kıymetli bilgi ve engin tecrübesi ile yardımcı olan Sayın Hocam Prof.Dr.Yılmaz MUSLU'ya teşekkürlerimi arz ederim.

Gösterdikleri yakın ilgiden dolayı Prof.Dr.İstemi ÜNSAL ve Doç.Dr.Mehmet KARPUZCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma boyunca bana destek olan Dr.H.Ali SAN ve Dr.Veyssel EROĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Bilgisayar programlarının icrası ve tezin yazılışı sırasında kıymetli mesailerini harcayan İ.T.Ü. E.H.B.E. ve Çevre Mühendisliği Bölümü elemanlarına teşekkür ederim.

HAL TERCÜMESİ

Yük.Müh.Atillâ Akkoyunlu 1951 yılında Gümüşhane'nin Bayburt kazasında doğmuştur. 1969 yılında İstanbul Esenîş Lisesini bitirmiştir. 1974 yılında İ.T.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Bölümünden Mühendis, 1976 yılında da İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Çevre Bilimleri dalından Yük.Müh. olarak mezun olmuştur. Ekim 1976 tarihinde Sakarya D.M.M.A. İnşaat Bölümüne Asistan olarak girmiştir.

T.B.T.A.K.'dan kazanmış olduğu bursla Mart 1978 ile Mayıs 1981 tarihleri arasında Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunmuş ve Mayıs 1981 de Iowa State Üniversitesinden Sağlık Mühendisliği dalında Master Diploması almıştır.

Halen İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Y. G.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi