T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AZALAN DEBİLİ FİLTRASYON

Murat EYVAZ
DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2013

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AZALAN DEBİLİ FİLTRASYON

Murat EYVAZ
DOKTORA TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Ebubekir YÜKSEL

ORTAK TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Ömer AKGİRAY

GEBZE
2013

DOKTORA TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21/01/2013 tarih ve 2013/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 01/02/2013 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Murat EYVAZ'ın tez çalışması Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI)	: Doç. Dr. Ebubekir YÜKSEL (GYTE)
ÜYE (ORTAK TEZ DANIŞMANI)	: Prof. Dr. Ömer AKGİRAY (MÜ)
ÜYE	: Prof. Dr. Bülent KESKİNLER (GYTE)
ÜYE	: Prof. Dr. Ahmet Mete SAATÇI (MÜ)
ÜYE	: Prof. Dr. İsmail KOYUNCU (İTÜ)

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../20... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: Azalan Debili Filtrasyon

YAZAR ADI: Murat EYVAZ

Azalan debili filtrasyon (ADF), konvansiyonel sabit debili filtrelere (SDF) karşı, filtre debisi kontrol yöntemi açısından farklı bir alternatiftir. Son elli yılda yapılan deneysel ve teorik çalışmaların çoğu ADF sisteminin daha iyi çıkış su kalitesi ürettiğini ve daha uzun işletme süresine sahip olduğunu (filtrenin daha geç tıkandığını) bildirmiştir. Bununla beraber, ilk yatırım maliyetlerinin de düşük olduğu bilinmesine rağmen hâlâ su arıtma tesislerinde SDF kadar tercih edilmemektedir. Bunun sebebi ise, son elli yıldaki deneysel ve teorik çalışmalar sonunda ADF tasarımına yönelik bazı hesaplama yöntemleri ve kabuller ortaya konmasına rağmen bu yöntemlerin çoğunun deneysel olarak ispat edilememesi ve ADF'nin hidrolik davranışlarının yeterince ortaya çıkarılamaması neticesinde, tasarımının güçlüğü ve işletmede karşılaşılabilecek tahmini zor problemlerdir.

Bu çalışmada pilot ölçekli deneyler yardımıyla azalan debili filtrasyonun (ADF) hidrolik davranışları incelenmiştir. Dört adet filtre içeren bir ADF sistemi inşa edilmiş ve işletilmiştir. Filtrelerdeki ortak su seviyeleri, her bir filtrenin filtrasyon hızı ve filtre yatağının çeşitli derinliklerindeki yük kayıpları zamana bağlı olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. ADF ile ilgili önceki diğer çalışmaların çoğunda tek bir ortalama filtrasyon hızı ya da tek bir yumaklaştırıcı dozajı kullanılmıştır. Bu çalışmada ise farklı filtrasyon hızları ve yumaklaştırıcı dozajları kullanılarak aynı özellikteki ham su filtre edilerek deneyler tekrar edilmiştir. Literatürdeki ADF tasarımına yönelik kabullerin ve hesaplamaların da geçerliliği test edilmiştir. Böyle bir deneysel matriks kullanımıyla, çeşitli işletme şartlarının ADF sisteminin hidrolik davranışları üzerindeki etkileri daha detaylı değerlendirilmiştir.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: Azalan Debili Filtrasyon

AUTHOR: Murat EYVAZ

Declining Rate Filtration (DRF) is an alternative flow control method compared to conventional Constant Rate Filtration (CRF). Most of the experimental and theoretical studies in the last fifty years have reported that DRF produces better quality water and has longer operating time than those of CRF. However, DRF is well known that it has low initial investment costs, it isn't preferred as much as SDF in water treatment plants. The reason for this is difficulty of DRF design and operation in spite some calculation methods and assesments, which hasn't been verified with detailed experimental studies in last fifty years.

In this study, hydraulic behavior of declining rate filtration (DRF) was investigated by means of pilot scale experiments. A bank of four declining rate filters was constructed and operated. The common water level in the filters, individual filter velocities and head losses in the filters were carefully monitored and recorded as functions of time. Many of the previous studies on DRF employed either a single average filtration velocity or a single coagulant dosage. In this study, however, filter runs were repeated treating the same water at several different filtration rates and with several different coagulant dosages. Using such an experimental matrix of several different rates and coagulant dosages allowed an evaluation of the behavior of the declining rate filtration system under different operating conditions and the effects of the mentioned variables on various hydraulic characteristics of the DRF system. The validity of certain simplifying assumptions used in design calculations was also tested in these experiments. It is believed that the new data presented herein will lead to a better understanding of DRF.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca gerek bilimsel gerekse idari açıdan bana destek olan ve doktora eğitimim süresince yardımlarını ve yapıcı eleştirilerini esirgemeyen, tez yöneticim Doç. Dr. Sayın Ebubekir YÜKSEL'e,

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ortak tez danışmanım Prof. Dr. Sayın Ömer AKGİRAY'a,

Laboratuvar düzeneğimin mekanik kurulumunda yardımlarını gördüğüm Sayın Levent KEÇECİ'ye,

Deney düzeneğimin otomasyonu ve bilgisayar yazılımlarının hazırlanmasında yakın ilgi ve desteklerini gördüğüm Sayın İbrahim BOSTANCI'nın şahsında başta Sayın Emre ACARLAR, Sayın Giray İRKİN, Sayın Ercan BAŞARAN ve Sayın Mert Can YALHİ olmak üzere tüm Referans Çevre Teknolojileri çalışanlarına;

Kimyasal malzeme temininde yardımlarını gördüğüm Mikrons Firması Ürün Müdürü Sayın Ferhat SIĞAN ile Ar&Ge Koordinatörü Sayın Öner İZGİN'e ve Eczacıbaşı Esan Satış Uzmanı Sayın Cenk GÜLTEKİN'e,

Tezi hazırlamam sırasında her aşamada destek olan değerli arkadaşım Araştırma Görevlisi Sayın Ercan GÜRBULAK'a,

Her konuda görüşlerinden yararlandığım Değerli Bölüm Hocalarıma,

Doktora eğitimim süresince bana sabır ve anlayış gösteren sevgili Eşim ve Kızıma,

Bana maddi ve manevi her türlü desteği veren değerli Aileme,

En içten teşekkürlerimi sunarım.

Şubat, 2013 Murat EYVAZ

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET iv
SUMMARY v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ vii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ xi
ŞEKİLLER DİZİNİ xv
TABLOLAR DİZİNİ xxxvi
1. GİRİŞ 1
2. HIZLI KUM FİLTRASYONU 7
2.1. Filtrasyonun Genel Tanımı 7
2.2. Filtrelerin Fiziki Özellikleri 10
2.3. Filtrasyon İşlemi 12
2.4. Filtrasyon Prosesinin Teknik Özellikleri 13
2.4.1. Parçacık Giderme Mekanizmaları 13
2.4.1.1. Çarpışma (collision) 14
2.4.1.2. Tutunma (attachment) 18
2.4.2. Filtrasyonla İlgili Çeşitli Tanımlar 19
2.4.3. Filtrasyon Hidroliği 22
2.4.4. Geri Yıkama Prosesi 26
2.4.5. Filtre Malzemeleri 28
3. FİLTRE HIZI KONTROL YÖNTEMLERİ ve AZALAN DEBİLİ FİLTRASYON 31
3.1. Filtrelerin İşletilmesi 31
3.1.1. Su seviyesine göre filtrelerin işletilmesi 31
3.1.1.1. Değişken seviyeli filtreler 31
3.1.1.2. Sabit seviyeli filtreler 32
3.1.2. Su debisine göre filtrelerin işletilmesi 33
3.1.2.1. Kontrol cihazları kullanarak debiye göre işletme (Mekanik kontrol sistemleri) 33

Sayfa

3.1.2.1.1. Giriş debisinin kontrolü 33
3.1.2.1.2. Çıkış debisinin kontrolü 35
3.1.2.1.3. Sabit debi kontrolü 37
3.1.2.1.4. Eşit dağılım 44
3.1.2.2. El ile debi kontrolü 47
3.1.2.2.1. Giriş debisinin kontrolü 47
3.1.2.2.2. Çıkış debisinin kontrolü 47
3.1.2.3. Kontrol cihazları kullanmadan debiye göre işletme 48
3.1.2.3.1. Çıkış debisinin kontrolü 48
3.1.2.3.1.1. Sabit debi kontrolü 48
3.1.2.3.1.2. Sabit seviye kontrolü 48
3.1.2.3.1.3. Filtratın pompalanması ile kontrol 49
3.1.2.3.2. Giriş debisinin kontrolü 50
3.1.2.3.2.1. Giriş akımının bölünmesi 50
3.1.2.3.2.2. Değişken ve azalan debili sistem 51
3.1.3. Mevcut tesislere değişken azalan debili (giriş) sisteminin uygulanması 53
3.2. Azalan debili filtrasyonun tanımı, literatürdeki yeri ve ilgili çalışmalar 54
3.2.1. Azalan debili filtrasyonun tanımı 54
3.2.2. Azalan debili filtrelerin hidroliği ve hidrolik olarak sınıflandırılmaları 61
3.2.2.1. Azalan debili filtrelerin sınıflandırılması (Hidrolik Sınıflama) 62
3.2.3. Azalan debili filtrasyon ile ilgili literatürdeki çalışmalar 64
4. MATERYAL VE METOT 95
4.1. Sentetik ham suyun hazırlanışı ve depolanması 95
4.2. Filtre malzemesinin (kumun) özellikleri 96
4.3. Sabit debili ve azalan debili filtre düzenekleri 97
4.4. Filtrasyon prosedürü 104
4.5. Geri yıkama prosedürü 107
4.6. Yumaklaştırıcı çözeltisinin hazırlanması ve dozlama prosedürü 112
4.7. Analitik ölçümler 113
4.7.1. Bulanıklık ve Parçacık Sayısı Ölçümü 113
4.7.2. Yük Kayıplarının Ölçümü 118

Sayfa

4.7.3. Filtrasyon debisinin ölçülmesi 126
5. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA 130
5.1. Filtre Sistemlerinin Hidrolik Açıdan İncelenmesi 130
5.1.1. Azalan Debili Filtrelerin Hidrolik Davranışları 131
5.1.1.1. Farklı Alum Dozajlarında Filtrasyon Hızının Etkisi 137
5.1.1.1.1. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneyler 137
5.1.1.1.2. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneyler 146
5.1.1.1.3. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneyler 151
5.1.1.1.4. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneyler 156
5.1.1.2. Farklı Filtrasyon Hızlarında Alum Dozajının Etkisi 165
5.1.1.2.1. Filtrasyon hızının ortalama 7.9 m/sa olduğu deneyler 165
5.1.1.2.2. Filtrasyon hızının ortalama 10.6 m/sa olduğu deneyler 170
5.1.1.2.3. Filtrasyon hızının ortalama 14.6 m/sa olduğu deneyler 175
5.1.1.2.4. Filtrasyon hızının ortalama 17.2 m/sa olduğu deneyler 179
5.1.1.3. Ham Su Sıcaklığının Azalan Debili Filtrelerin Hidrolik Davranışlarına Etkisi 184
5.1.2. Azalan Debili Filtreler ile Sabit Debili Filtrenin Karşılaştırılması 190
5.1.2.1. Farklı Alum Dozajlarında Filtrasyon Hızının Etkisi 194
5.1.2.1.1. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneyler 194
5.1.2.1.2. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneyler 196
5.1.2.1.3. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneyler 198
5.1.2.1.4. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneyler 200
5.2. Filtre Sistemlerinin Su Kalitesi Açısından İncelenmesi 209
5.2.1. Farklı Alum Dozajlarında Filtrasyon Hızının Etkisi 218
5.2.1.1. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneyler 219
5.2.1.2. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneyler 232
5.2.1.3. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneyler 241
5.2.1.4. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneyler 250
5.2.1.5. Farklı Alum Dozajlarında Filtrasyon Hızının Su Kalitesine Etkisi ile İlgili Genel Sonuçlar ve Tartışma 258
5.2.2. Farklı Filtrasyon Hızlarında Alum Dozajının Su Kalitesine Etkisi ile İlgili Genel Sonuçlar ve Tartışma 263

Sayfa

5.2.3. Ham Su Sıcaklığının Filtre Performansına ve Çıkış Suyu Kalitesine Etkisi 267
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 279
KAYNAKLAR 287
ÖZGEÇMİŞ 304
EKLER 305
EK-A. Filtrasyon süresince filtrelerde su seviyesi ölçümlerini gösteren grafikler 306
EK-B. Filtrasyon süresince azalan debili filtrelerin her birinde farklı ortalama filtrasyon hızlarında debi ölçümlerini gösteren grafikler 315
EK-C. Filtrasyon süresince azalan debili filtrelerin her birinde farklı alum dozajlarında debi ölçümlerini gösteren grafikler 324
EK-D. Filtrasyon süresince deneylerin her birinde AD filtrelerinin hız değişimini gösteren grafikler 332
EK-E. SDF ve ADF sistemlerinde filtre yatağındaki yük kayıplarının zamana karşı gelişimini gösteren grafikler 341
EK-F. Filtrelerde su kalitesi ölçümlerine ait ham su bulanıklığı ve çıkış suyu parçacık sayısının filtrasyon süresince değişimlerini gösteren grafikler 359

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

η_D	:	Difüzyon olasılığı
K	:	Boltzmann sabiti
T	:	Sıcaklık
μ	:	Dinamik viskozite
d_p	:	Parçacık çapı
η_I	:	Engellenme (interception) olasılığı
d	:	Filtre malzemesini oluşturan danecik çapı
η_S	:	Çökme (sedimentation) olasılığı
ρ_p	:	Parçacığın özgül ağırlığı
g	:	Yer çekimi ivmesi
u	:	Filtrasyon hızı
DVLO	:	Derjaguin and Landau, Verwey and Overbeek
mV	:	Milivolt
C	:	Filtre çıkış suyu parçacık konsantrasyonu
C_0	:	Filtre giriş suyu parçacık konsantrasyonu
ε	:	Filtre yatağı porozitesi
α	:	Tutunma verimi
η_0	:	Çarpışma verimi
L	:	Filtre yatağı derinliği (kalınlığı)
nm	:	Nanometre
σ	:	Spesifik birikme
λ	:	Filtre katsayısı
λ_0	:	Proses başlangıcındaki filtre katsayısı
mm	:	Milimetre
µm	:	Mikrometre
h	:	L derinliğindeki filtre yatağında meydana gelen yük kaybı
a/v	:	Birim hacimdeki daneciğin yüzey alanı
ψ	:	Küresellik katsayısı
V	:	Filtre yatağı üzerindeki yüzeysel akış
k	:	Kozeny sabiti
Q	:	Filtrasyon tesisi giriş debisi

k_h	:	Spesifik yük kaybı katsayısı
K_v	:	Bir sabit
H_0	:	Başlangıç yük kaybı
H_d	:	Filtrasyondan dolayı meydana gelen yük kaybı
v_{mf}	:	Minimum akışkanlaşma hızı
ρ_s	:	Kumun özgül ağırlığı
l_e	:	Genişlemeden sonraki filtre yatağı derinliği
ADF	:	Azalan Debili Filtrasyon
VDRF	:	Değişken ve Azalan Debili Filtrasyon
h_1	:	Azalan debili filtrede statik su seviyesi
h_2	:	Azalan debili filtrede filtrasyon başlangıcındaki denge su seviyesi
h_3	:	Azalan debili filtrede filtrasyon geri yıkama öncesindeki maksimum su seviyesi
h_4	:	Azalan debili filtrede geri yıkama sırasında işletmede kalan filtrelerdeki pik su seviyesi
h_5	:	Azalan debili filtrede geri yıkama sonrası bütün filtrelerde su seviyesinin eşitlendiği seviye
pH	:	$-\log_{10}[H^+]$
°C	:	Derece selsiyus
NTU	:	Nefelometrik Bulanıklık Birimi
dk	:	Dakika
AWWA	:	Amerikan Su İşleri Birliği
K_0	:	Temiz haldeki filtre yatağının permeabilite katsayısı
α	:	Filtrasyon süresi ile ilgili ampirik bir sabit
β	:	Filtredeki akış davranışları ile ilgili ampirik bir katsayı
b	:	Filtredeki akış davranışları ile ilgili ampirik bir katsayı
n	:	$1 < n \leq 2$ olmak üzere bir ampirik katsayı
K_i	:	Laminer yük kaybı katsayısı
q_i	:	i'nci filtrenin debisi
K_e	:	Türbülanslı yük kaybı katsayısı
V_i	:	i no'lu filtreden geçen su hacmi
SDF	:	Sabit Debili Filtre

SiO_2	:	Silisyum oksit
Al_2O_3	:	Aluminyum oksit
Fe_2O_3	:	Demir (III) oksit
d_{50}	:	Kum daneciklerinin ağırlıkça % 50'sinin geçtiği elek çapı
d_{97}	:	Kum daneciklerinin ağırlıkça % 97'sinin geçtiği elek çapı
ISO	:	Uluslararası Standardizasyon Birliği
İSKİ	:	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
cm	:	Santimetre
US EPA	:	Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı
AD	:	Azalan debili
SD	:	Sabit debili
kW	:	Kilovat
W	:	Vat
FNU	:	Formazin nefelometrik birimi
FTU	:	Formazin bulanıklık birimi
TE/F	:	Alman standart bulanıklık birimi (FNU olarak değiştirilmiştir)
mA	:	Miliamper
Hz	:	Hertz frekans birimi
V	:	Volt
AC	:	Alternatif akım
DC	:	Doğru akım
IEC	:	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
A_a	:	Filtre başına su birikme alanı
A_d	:	ADF'den sonra yer alan bir rezervuarın (çöktürme tankı gibi) alanı
Ort.	:	Ortalama
V_{pik}	:	Bir AD filtresi geri yıkandığında diğer filtrelerdeki maks. hız
V_{ort}	:	AD filtrelerinin tamamı işletmedeyken filtrelerin ort. hızı
V_{maks}	:	AD filtrelerinin geri yıkama öncesindeki hızları
V_{min}	:	AD filtrelerinin geri yıkama sonrasında denge seviyesindeki hızları
$V_m(t)$	:	t anındaki ortalama filtrasyon hızı
N	:	ADF sistemindeki filtre sayısı
i	:	Filtre numarası
OECD	:	Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü

WHO	:	Dünya Sağlık Örgütü
MWH	:	Montgomery Watson Harza
SQL		Yapısal Sorgulama Dili

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil		Sayfa
2.1	Derin yataklı filtrenin şematik gösterimi.	9
2.2	Fabrikasyon filtre tabanı bloğu.	11
2.3	Nozül içeren suni tabanlı filtre tabanı.	11
2.4	Tipik bir filtrasyon prosesi döngüsü.	12
2.5	Filtre yatağı içerisinde difüzyonun şematik gösterimi.	15
2.6	Filtre yatağı içerisinde engellenmenin şematik gösterimi.	16
2.7	Filtre yatağı içerisinde çökmenin şematik gösterimi.	17
2.8	Parçacık büyüklüğüne bağlı olarak giderme veriminin değişimi.	18
2.9	Filtrasyon performansı ile zeta potansiyeli arasındaki ilişki.	19
2.10	Mikroskopik modellere göre filtrasyon performansları.	20
2.11	Filtrede yük kaybı.	25
2.12	Geri yıkamanın kesit olarak gösterimi	28
3.1	Değişken seviyeli filtre.	32
3.2	Sabit seviyeli filtre.	33
3.3	Giriş suyu debisine göre çıkışı ayarlayan kontrol sistemi.	34
3.4	Giriş debisine göre kontrolün sifon ile sağlanması.	35
3.5	Çıkış debisine göre depodaki su seviyesinin sabit tutulması.	36
3.6	Açık tip, flatörlü bir debi kontrolörü.	39
3.7	Hızlı filtrelerde uygulanan açık tip, çifte şamandıralı sabit debi kontrol sistemi.	40
3.8	Kapalı veya batık tipten simplex debi kontrolörü.	42
3.9	Kapalı tip filtre debisi kontrolörü.	43
3.10	Değişen su ihtiyacına göre filtre takımına giren ham suyu girişte kontrol eden (E) flatörlü vana sistemi.	44
3.11	Ham su girişine göre eşit dağılımı sağlayan sistem.	45
3.12	Ham su debisine uygun olarak filtrelere eşit debi dağıtımı.	45
3.13	Filtrat ihtiyacına göre debiyi çıkışta ayarlayan eşit dağıtım sistemi.	46
3.14	Giriş akımının eşit olarak filtrelere dağıtıldığı sistem.	50
3.15	Değişken azalan debili sistem.	52

Şekil		Sayfa
3.16	Giriş debisi kontrollü azalan debili sistem.	56
3.17	Çıkış debisi kontrollü azalan debili sistem.	57
3.18	Dört filtreden oluşan bir azalan debili filtre sistemindeki 1 filtrenin yük kaybı, filtre hızı ve su seviyesi özellikleri.	58
3.19	Azalan debili olarak çalıştırılan bir filtrede işletme süresince su seviyelerinin şematik gösterimi.	59
3.20	Azalan debili olarak çalıştırılan bir filtrede işletme süresince su seviye eğrisi.	59
3.21	Tek tabakalı bir filtredeki tipik bulanıklık giderim modeli, (a): Bulanıklık giderim oranı, (b): Kalan bulanıklık oranı.	71
3.22	Tek tabakalı filtrede tipik bulanıklık giderim modellerinin karşılaştırılması, (a): Bulanıklık giderim oranı, (b): Kalan bulanıklık oranı, Kesikli çizgi: Sabit debili filtrasyon, Sürekli çizgi: Azalan debili filtrasyon.	72
4.1	45 mm elek bakiyesi ((ISO 787-7)max.: % 0.1).	96
4.2	Deneylerin yapıldığı pilot tesis (önden görünüş).	98
4.3	Deneylerin yapıldığı pilot tesis (arkadan görünüş).	99
4.4	Pilot ADF düzeneğinin şematik gösterimi (önden görünüş)	100
4.5	ADF sisteminin şematik olarak yandan görünüşü.	101
4.6	Pilot ADF sisteminin üstten görünüşü.	102
4.7	Pilot ADF sistemine ait dağıtım borularının çeşitli açılardan görünümü.	103
4.8	Filtre çıkışları ve filtratın döküldüğü açık kanal.	106
4.9	Açık kanalda azalan debili filtrelerin çıkış sularının birleştiği noktadaki bulanıklık ve parçacık ölçer cihazlarına giden hatlar.	107
4.10	Pilot tesis kontrol paneli.	110
4.11	Filtre tabanında yer alan geri yıkama suyu giriş tertibatı.	111
4.12	Kum yatağının (71 cm) yukarısında yer alan geri yıkama giderleri.	111
4.13	Filtre giriş hattı üzerinde yumaklaştırıcı dozlanması.	112
4.14	Online bulanıklık ölçer.	115
4.15	Bulanıklık ölçer çalışma prensibi.	115
4.16	Online parçacık sayıcılar.	116

Şekil		Sayfa
4.17	Parçacık sayıcı çalışma prensibi.	117
4.18	Online bulanıklık ölçüm ekranı.	117
4.19	Basınç sensörlerinin kum yatağı üzerindeki yerlerinin şematik gösterimi.	119
4.20	Basınç sensörlerinin kum yatağı üzerindeki yerlerinin gösterimi.	120
4.21	SDF-Sensör 1 kalibrasyon grafiği.	121
4.22	SDF-Sensör 2 kalibrasyon grafiği.	121
4.23	SDF-Sensör 3 kalibrasyon grafiği.	122
4.24	SDF-Sensör 4 kalibrasyon grafiği.	122
4.25	SDF-Sensör 5 kalibrasyon grafiği.	123
4.26	ADF-Sensör 1 kalibrasyon grafiği.	123
4.27	ADF-Sensör 2 kalibrasyon grafiği.	124
4.28	ADF-Sensör 3 kalibrasyon grafiği.	124
4.29	ADF-Sensör 4 kalibrasyon grafiği.	125
4.30	ADF-Sensör 5 kalibrasyon grafiği.	125
4.31	(a) Tek bir filtre kolonundaki filtre debisini ölçen türbin tip debimetre, (b) Debilerin online olarak takip edildiği ve bilgisayara aktarıldığı veri kaydediciler.	126
4.32	Filtrasyon debisinin ölçülmesinde kullanılan türbin tip debimetre.	128
4.33	Türbin tip debimetrenin ölçüleri (mm).	128
4.34	Türbin tip debimetrenin hıza karşı basınç kaybı grafiği.	129
5.1	ADF'deki tipik su seviyesi değişimleri.	133
5.2	Dört filtreli bir ADF'de bir filtreye ait tipik hız değişimi.	135
5.3	Farklı ortalama filtrasyon hızlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L).	139
5.4	ADF'de bir filtrenin geri yıkanması sonrasında filtrelerdeki ortak su seviyelerinin durumu.	140
5.5	Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L).	142

Şekil **Sayfa**

5.6 Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L). 143

5.7 Farklı ortalama filtrasyon hızlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L, ADF 1). 145

5.8 Ortalama filtrasyon hızının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L). 146

5.9 Farklı ortalama filtrasyon hızlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L). 147

5.10 Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L). 148

5.11 Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L). 148

5.12 Farklı ortalama filtrasyon hızlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L, ADF 1). 150

5.13 Ortalama filtrasyon hızının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L). 151

5.14 Farklı ortalama filtrasyon hızlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L) 152

5.15 Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L). 153

5.16 Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L) 153

5.17 Farklı ortalama filtrasyon hızlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L, ADF 1). 155

Şekil **Sayfa**

5.18 Ortalama filtrasyon hızının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L). 155

5.19 Farklı ortalama filtrasyon hızlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L). 157

5.20 Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L). 158

5.21 Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L). 159

5.22 Farklı ortalama filtrasyon hızlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L, ADF 1). 161

5.23 Ortalama filtrasyon hızının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L). 161

5.24 Farklı deney şartlarında ADF'de Seviye 3 ve Seviye 5 ilişkisi. 163

5.25 Farklı alum dozajlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa). 167

5.26 Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa). 168

5.27 Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa). 168

5.28 Farklı alum dozajlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa, ADF 1). 169

5.29 Alum dozajının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa) 170

Şekil **Sayfa**

5.30 Farklı alum dozajlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa). 172

5.31 Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa). 172

5.32 Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa). 173

5.33 Farklı alum dozajlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa, ADF 1). 174

5.34 Alum dozajının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa). 174

5.35 Farklı alum dozajlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 176

5.36 Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 176

5.37 Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 177

5.38 Farklı alum dozajlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, ADF 1). 178

5.39 Alum dozajının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 178

5.40 Farklı alum dozajlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 17.2 m/sa). 180

5.41 Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 17.2 m/sa). 181

Şekil **Sayfa**

5.42 Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 17.2 m/sa). 182

5.43 Farklı alum dozajlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 17.2 m/sa, ADF 1). 183

5.44 Alum dozajının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrtasyon hızı: 17.2 mg/L). 184

5.45 Ham su sıcaklığının ADF ortak su seviyesi değişimine etkisi (alum dozajı 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, Deney 4 ve 19). 187

5.46 Ham su sıcaklığının ADF ortak su seviyesi değişimine etkisi (alum dozajı 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, Deney 8 ve 20). 187

5.47 Ham su sıcaklığının ADF ortak su seviyesi değişimine etkisi (alum dozajı 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, Deney 12 ve 20). 188

5.48 Ham su sıcaklığının ADF ortak su seviyesi değişimine etkisi (alum dozajı 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, Deney 17 ve 21). 188

5.49 Ham su sıcaklığının farklı deney ve koşullarında geri yıkama piklerine etkisi. 189

5.50 Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtre sistemlerinde ortalama filtrasyon hızına bağlı gelişen toplam yük kayıpları. 196

5.51 Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtre sistemlerinde ortalama filtrasyon hızına bağlı gelişen toplam yük kayıpları. 198

5.52 Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtre sistemlerinde ortalama filtrasyon hızına bağlı gelişen toplam yük kayıpları. 200

5.53 Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtre sistemlerinde ortalama filtrasyon hızına bağlı gelişen toplam yük kayıpları. 202

5.54 5 mg/L alum deneylerinde filtrasyon sonunda meydana gelen tıkanma yük kayıpları. 203

Şekil		Sayfa
5.55	7.5 mg/L alum deneylerinde filtrasyon sonunda meydana gelen tıkanma yük kayıpları.	203
5.56	10 mg/L alum deneylerinde filtrasyon sonunda meydana gelen tıkanma yük kayıpları.	204
5.57	12.5 mg/L alum deneylerinde filtrasyon sonunda meydana gelen tıkanma yük kayıpları.	204
5.58	Birbirine paralel işletilen ADF ile SDF sistemlerindeki yük kaybı eğrilerinin eğimlerinin karşılaştırılması.	208
5.59	Deney 1'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.92 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).	222
5.60	Deney 2'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).	224
5.61	Deney 3'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).	225
5.62	Deney 4'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.01 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).	226
5.63	Deney 5'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.67 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).	227
5.64	Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama bulanıklığına etkisi (alum dozajı: 5 mg/L, ham su bulanıklığı: ~ 10 NTU).	229
5.65	Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi (alum dozajı: 5 mg/L, ham su parçacık sayısı: ~ ((2-5 μm) + (>5 μm): 33,000 adet/mL).	231
5.66	Deney 6'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.99 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).	233

Şekil **Sayfa**

5.67 Deney 7'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.02 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa). 234

5.68 Deney 8'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.93 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 235

5.69 Deney 9'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.6 m/sa). 236

5.70 Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama bulanıklığına etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L, ham su bulanıklığı: ~ 10 NTU). 238

5.71 Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L, ham su parçacık sayısı: ~ ((2-5 μm) + (>5 μm): 33,000 adet/mL). 240

5.72 Deney 10'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa). 243

5.73 Deney 11'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.85 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa). 243

5.74 Deney 12'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa). 244

5.75 Deney 13'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.95 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 244

5.76 Deney 14'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.46 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.4 m/sa). 245

5.77 Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama bulanıklığına etkisi (alum dozajı: 10 mg/L, ham su bulanıklığı: ~ 10 NTU). 247

Şekil **Sayfa**

5.78 Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi (alum dozajı: 10 mg/L, ham su parçacık sayısı: ~ ((2-5 µm) + (>5 µm): 33,000 adet/mL). 249

5.79 Deney 15'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.90 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa). 252

5.80 Deney 16'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.87 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa). 252

5.81 Deney 17'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 253

5.82 Deney 18'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.30 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa). 253

5.83 Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama bulanıklığına etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L, ham su bulanıklığı: ~ 10 NTU). 255

5.84 Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L, ham su parçacık sayısı: ~ ((2-5 µm) + (>5 µm): 33,000 adet/mL). 257

5.85 Ortalama çıkış suyu bulanıklığının ortalama filtrasyon hızına göre değişimi: (a) 5 mg/L alum deneyleri için, (b) 7.5 mg/L alum deneyleri için. 261

5.86 Ortalama çıkış suyu bulanıklığının ortalama filtrasyon hızına göre değişimi: (a) 10 mg/L alum deneyleri için, (b) 12.5 mg/L alum deneyleri için. 262

5.87 Ortalama çıkış suyu bulanıklığının alum dozajına göre değişimi: (a) 7.9 m/sa hız deneyleri için, (b) 10.5 m/sa hız deneyleri için. 265

5.88 Ortalama çıkış suyu bulanıklığının alum dozajına göre değişimi: (a) 14.6 m/sa hız deneyleri için, (b) 17.4 m/sa hız deneyleri için. 266

Şekil **Sayfa**

5.89 Deney 19'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 270

5.90 Deney 20'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.98 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa). 271

5.91 Deney 21'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.98 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 271

5.92 Deney 22'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.98 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa). 272

5.93 Soğuk ham su deneylerinde ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi (her bir deneyin şartları Tablo 5.17'de verilmiştir). 275

5.94 Ortalama çıkış suyu bulanıklığının ham su sıcaklığına göre değişimi: (a) SDF sistemi için, (b) ADF sistemi için. 276

A.1 Deney 1'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 306

A.2 Deney 2'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 306

A.3 Deney 3'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 307

A.4 Deney 4'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 307

A.5 Deney 5'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 308

A.6 Deney 6'da filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 308

A.7 Deney 7'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 309

Şekil **Sayfa**

A.8 Deney 8'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 309
A.9 Deney 9'da filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 310
A.10 Deney 10'da filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 310
A.11 Deney 11'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 311
A.12 Deney 12'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 311
A.13 Deney 13'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 312
A.14 Deney 14'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 312
A.15 Deney 15'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 313
A.16 Deney 16'da filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 313
A.17 Deney 17'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 314
A.18 Deney 18'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi. 314
B.1 ADF 1'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L). 315
B.2 ADF 2'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L). 316
B.3 ADF 3'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L). 316
B.4 ADF 4'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L). 317
B.5 ADF 1'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L). 317

Şekil **Sayfa**

B.6 ADF 2'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L). 318
B.7 ADF 3'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L). 318
B.8 ADF 4'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L). 319
B.9 ADF 1'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L). 319
B.10 ADF 2'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L). 320
B.11 ADF 3'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L). 320
B.12 ADF 4'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L). 321
B.13 ADF 1'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L). 321
B.14 ADF 2'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L). 322
B.15 ADF 3'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L). 322
B.16 ADF 4'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L). 323
C.1 ADF 1'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L). 324
C.2 ADF 2'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L). 324
C.3 ADF 3'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L). 325
C.4 ADF 4'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L). 325
C.5 ADF 1'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L). 326

Şekil **Sayfa**

C.6 ADF 2'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L). 326
C.7 ADF 3'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L). 327
C.8 ADF 4'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L). 327
C.9 ADF 1'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L). 328
C.10 ADF 2'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L). 328
C.11 ADF 3'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L). 329
C.12 ADF 4'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L). 329
C.13 ADF 1'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L). 330
C.14 ADF 2'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L). 330
C.15 ADF 3'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L). 331
C.16 ADF 4'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L). 331
D.1 Deney 1'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 332
D.2 Deney 2'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 332
D.3 Deney 3'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 333
D.4 Deney 4'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 333
D.5 Deney 5'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 334

Şekil **Sayfa**

D.6 Deney 6'da filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 334
D.7 Deney 7'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 335
D.8 Deney 8'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 335
D.9 Deney 9'da filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 336
D.10 Deney 10'da filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 336
D.11 Deney 11'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 337
D.12 Deney 12'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 337
D.13 Deney 13'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 338
D.14 Deney 14'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 338
D.15 Deney 15'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 339
D.16 Deney 16'da filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 339
D.17 Deney 17'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 340
D.18 Deney 18'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi. 340
E.1 Deney 1'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 341
E.2 Deney 1'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 342

Şekil **Sayfa**

E.3 Deney 2'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 342
E.4 Deney 1'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 343
E.5 Deney 3'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 343
E.6 Deney 3'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 344
E.7 Deney 4'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 344
E.8 Deney 4'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 345
E.9 Deney 5'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 345
E.10 Deney 5'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 346
E.11 Deney 6'da bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 346
E.12 Deney 6'da SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 347
E.13 Deney 7'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 347
E.14 Deney 7'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 348
E.15 Deney 8'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 348
E.16 Deney 8'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 349
E.17 Deney 9'da bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 349

Şekil **Sayfa**

E.18 Deney 9'da SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 350
E.19 Deney 10'da bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 350
E.20 Deney 10'da SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 351
E.21 Deney 11'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 351
E.22 Deney 11'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 352
E.23 Deney 12'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 352
E.24 Deney 12'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 353
E.25 Deney 13'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 353
E.26 Deney 13'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 354
E.27 Deney 14'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 354
E.28 Deney 14'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 355
E.29 Deney 15'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 355
E.30 Deney 15'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 356
E.31 Deney 16'da bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 356
E.32 Deney 16'da SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 357

Şekil **Sayfa**

E.33 Deney 17'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 357
E.34 Deney 17'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı. 358
F.1 Deney 1'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 359
F.2 Deney 1'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi 360
F.3 Deney 1'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 360
F.4 Deney 2'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 361
F.5 Deney 2'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 361
F.6 Deney 2'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 362
F.7 Deney 3'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 362
F.8 Deney 3'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 363
F.9 Deney 3'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 363
F.10 Deney 4'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 364
F.11 Deney 4'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 364
F.12 Deney 4'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 365
F.13 Deney 5'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 365
F.14 Deney 5'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 366

Şekil		Sayfa
F.15	Deney 5'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi.	366
F.16	Deney 6'da kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi.	367
F.17	Deney 6'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi.	367
F.18	Deney 6'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi.	368
F.19	Deney 7'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi.	368
F.20	Deney 7'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi.	369
F.21	Deney 7'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi.	369
F.22	Deney 8'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi.	370
F.23	Deney 8'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi.	370
F.24	Deney 8'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi.	371
F.25	Deney 9'da kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi.	371
F.26	Deney 9'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi.	372
F.27	Deney 9'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi.	372
F.28	Deney 10'da kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi.	373
F.29	Deney 10'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi.	373
F.30	Deney 10'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi.	374

Şekil **Sayfa**

F.31 Deney 11'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 374
F.32 Deney 11'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 375
F.33 Deney 11'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 375
F.34 Deney 12'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 376
F.35 Deney 12'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 376
F.36 Deney 12'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 377
F.37 Deney 13'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 377
F.38 Deney 13'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 378
F.39 Deney 13'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 378
F.40 Deney 14'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 379
F.41 Deney 14'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 379
F.42 Deney 14'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 380
F.43 Deney 15'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 380
F.44 Deney 15'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 381
F.45 Deney 15'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 381
F.46 Deney 16'da kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 382

Şekil **Sayfa**

F.47 Deney 16'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 382
F.48 Deney 16'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 383
F.49 Deney 17'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 383
F.50 Deney 17'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 384
F.51 Deney 17'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 384
F.52 Deney 18'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi. 385
F.53 Deney 18'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi. 385
F.54 Deney 18'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi. 386

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo		Sayfa
2.1	Çeşitli filtre malzemelerinin tipik yük kaybı katsayıları.	23
2.2	Çeşitli filtre malzemelerinin akışkanlaşma hızları.	27
2.3	Filtrasyonda kullanılan çeşitli filtre malzemelerinin özellikleri.	30
3.1	Taiwan'daki Chan Chu Shan Arıtma Tesisi'ndeki azalan debili ve sabit debili filtrelerin karşılaştırıldığı testlerin sonuçları.	68
3.2	Azalan debili filtrasyon ile sabit debili filtrasyonun karşılaştırılması.	73
3.3	İçme suyu arıtımında kullanılan azalan debili filtreler ile ilgili mevcut yasal düzenlemeler.	83
3.4	Cullinan Su Arıtma Tesisisi'ndeki azalan debili filtrelere ait dizayn parametreleri.	93
4.1	Sentetik bulanıklık hazırlamada kullanılan kaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri.	96
4.2	Bulanıklık ölçer cihazı teknik özellikleri.	114
4.3	Parçacık sayıcı cihazı teknik özellikleri.	116
4.4	Türbin tip akış sensörünün teknik özellikleri.	127
5.1	Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerin şartları.	137
5.2	Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince meydana gelen ortalama su seviyeleri ve filtrasyon hızlarının oranları.	144
5.3	Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerin şartları.	147
5.4	Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince meydana gelen ortalama su seviyeleri ve filtrasyon hızlarının oranları.	149
5.5	Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerin şartları.	152
5.6	Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince meydana gelen ortalama su seviyeleri ve filtrasyon hızlarının oranları.	154
5.7	Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerin şartları.	156
5.8	Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince meydana gelen ortalama su seviyeleri ve filtrasyon hızlarının oranları.	160
5.9	Ortalama filtrasyon hızının 7.9 m/sa olduğu deneylerin şartları.	166
5.10	Ortalama filtrasyon hızının 10.6 m/sa olduğu deneylerin şartları.	171

Tablo		Sayfa
5.11	Ortalama filtrasyon hızının 14.6 m/sa olduğu deneylerin şartları.	175
5.12	Ortalama filtrasyon hızının 17.2 m/sa olduğu deneylerin şartları.	179
5.13	Sıcak ham su deneylerinin şartları	185
5.14	Soğuk ham su deneylerinin şartları	186
5.15	Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerin şartları	195
5.16	Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerin şartları	197
5.17	Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerin şartları	199
5.18	Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerin şartları.	201
5.19	ADF ve SDF filtrelerinin yük kaybı eğrilerinin eğim değerleri	207
5.20	Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerin şartları	221
5.21	Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.	228
5.22	Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.	230
5.23	Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları üzerinden hesaplanan parçacık giderim verimleri.	231
5.24	Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerin şartları	233
5.25	Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.	237
5.26	Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.	239
5.27	Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları üzerinden hesaplanan parçacık giderim verimleri.	240
5.28	Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerin şartları	242
5.29	Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.	246
5.30	Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.	248

Tablo		Sayfa
5.31	Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları üzerinden hesaplanan parçacık giderim verimleri.	249
5.32	Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerin şartları	251
5.33	Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.	254
5.34	Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.	256
5.35	Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları üzerinden hesaplanan parçacık giderim verimleri.	257
5.36	Sıcak ham su deneylerinin şartları.	269
5.37	Soğuk ham su deneylerinin şartları.	269
5.38	Sıcak ham su kullanılan deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.	273
5.39	Soğuk ham su kullanılan deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.	274
5.40	Sıcak ham su kullanılan deneylerde deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.	277
5.41	Soğuk ham su kullanılan deneylerde deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.	278

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi

İçme suyu temininde ve su kullanım alışkanlıklarında zaman içinde büyük değişiklikler meydana gelmiştir. Bu değişiklikler; miktar, kalite ve çeşitlilik bakımından artış şeklinde kendini göstermektedir. Bunun nedenleri arasında; nüfus artışı, sanayileşme, refah düzeyinin yükselmesi, israf, atmosfer ve çevre kirliliğinin artması, küresel iklim değişimi gibi, ağırlıklı olarak insan faaliyetleriyle ilgili faktörler yer almaktadır. Suyun miktar olarak sınırlı olması, yapay yöntemlerle üretilememesi ve kolay kirlenebilir olması yanında, hem toplamda hem de kişi başına su talebinin artması; özellikle günümüzde suyu önemli bir ticari ve politik malzeme haline getirmiştir.

Su kaynaklarının ülke kalkınmasındaki ulusal ve uluslararası önemi giderek artmaktadır. Gelecek yüzyılda, iklim ve erozyonun da etkisiyle su sıkıntısı yaşayan şehir ve ülke sayısında dramatik artışlar gözlenecektir. Bir ülkenin ulusal su kaynaklarını dilediği şekilde kullanabilmesi günümüzde bile tartışmalı bir konu iken; suyun paylaşımı gelecekte daha ciddi bir sorun oluşturacaktır [Yerebakan, 1999].

Suyun kullanıldığı kaynaklar yüzeysel sular ve yer altı sularından oluşmaktadır. Su, atmosferdeki nem ve yerküre üzerindeki su kütleleri arasındaki transferlerle sürekli bir döngü halindedir. Bu doğal döngü, insanların suyu çeşitli amaçlarla kullanması ve fiziksel/kimyasal özellikleri değişmiş suyu tekrar doğaya vermeleri sonucunda değişikliğe uğramaktadır. Kullanılan suların arıtılması için dünya çapında 2,200'ün üzerinde arıtma tesisi vardır. Bu arıtma prosesleri su kaynağının özelliklerine ve 400,000 km'lik bir su şebekesinin sağladığı içme suyu ihtiyacına göre işletilmektedir [Parsons and Jefferson, 2006].

Dünya üzerindeki yaklaşık bir milyon dört yüz bin km^3 hacmindeki su kaynağının % 97.39 kadarını denizler (tuzlu sular) ve % 2 kadarını da buzullar oluşturmaktadır. İçme suyu olarak kullanmaya elverişli su miktarı ise geriye kalan oldukça az bir orandaki tatlı su kaynaklarından elde edilmektedir [Yalçın ve Gürü, 2002; Parsons and Jefferson, 2006]. İster içme suyu amaçlı, isterse endüstriyel amaçlı olsun; gerek yeraltından gerekse de yüzeysel kaynaklardan temin edilen hemen hemen hiçbir su, az veya çok bir arıtıma tabi tutulmadan modern ihtiyaçları tamamen karşılayamamaktadır. Suyun kalitesinden istenilen özellikler kullanma yerine göre bazı değişiklikler göstermekle beraber, ideal bir içme suyu hastalık yapıcı organizmaları ihtiva etmemelidir, renksiz ve berrak olmalıdır, içimi hoş, kokusuz ve tercihan 15 °C'den az sıcaklıkta olmalıdır. Yeterli derecede yumuşak olmalı, hidrojen sülfür, demir ve manganez gibi istenmeyen kimyasal maddeleri ihtiva etmemelidir. Toksik veya olumsuz fizyolojik etki yapacak konsantrasyonlarda maddeler ihtiva etmemelidir. Bol miktarda olmalı ve satış fiyatı da halkın ödeyebileceği bir seviyeyi aşmamalıdır. Yurdumuzda içme suyu olarak kullanılan suların Türk Standartları 266'ya (İçme Suyu Standartları) uygun olması lazımdır [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Yukarıda özellikleri verilen yüksek kalitede içme suyunun teminini sağlamak amacıyla uygun su kaynağını bulmak ve suyu uygun yöntemlerle de arıtmak gerekmektedir. Su arıtma tesisi planlaması birçok faktöre bağlı, karmaşık bir süreçtir ve su kaynağı seçiminden, arıtılan suyun şebekeye verilmesine kadar her aşaması titizlikle ele alınması gereken bir projelendirmeyi gerektirir. Bu süreçte suyun alınacağı kaynak türü, tesiste kullanılacak ekipmanın kalitesi, dayanıklılığı ve servis gereksinimi, kullanılacak kimyasallar gibi işletme aşamasındaki gereksinimler, operatörlerin bilgi ve beceri düzeyleri, arıtma tesisinin yapım yeri, yapılacak alanın büyüklüğü ve yerleşim merkezine olan uzaklığı, arıtma tesisinden çıkacak atık miktarı ve bu atıkların giderim olanakları gibi unsurlar yer alır. Su arıtma tesislerinde kullanılan başlıca temel işlemler, havalandırma, yumaklaştırma, çökeltme ve yüzdürme, filtrasyon, kimyasal çöktürme, iyon değiştirme ve dezenfeksiyon olarak

sayılabilir [Duran ve Demirer, 1997]. Bahsedilen prosesler arasında filtrasyon adımı çeşitli ölçeklerdeki hemen her arıtma sisteminde yer almakta ve sistemde bulunduğu yer itibariyle hem hidrolik açıdan hem de su kalitesi açısından arıtma tesisinin tamamının işleyişini etkileyebilecek bir prosestir. Bu nedenle arıtmanın kalbi olarak da nitelendirilen filtrelerin doğru tasarlanması ve düzgün bir şekilde işletilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, pilot ölçekte ve eşdeğer özellikteki azalan debili ile sabit debili kum filtrelerinde debi kontrol metotlarının hidrolik işletme koşullarına ve filtre çıkış suyu kalitesine etkileri kıyaslamalı olarak incelenmiş, azalan debili filtrelerin hidrolik davranışları gelişmiş bir otomasyon sistemi ve online debi ve basınç ölçme/izleme araçları yardımıyla detaylı olarak ortaya konmaya çalışılmıştır.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

İçme suyu temininde endüstriyel kirliliğin de etkisiyle yükselen içme suyu standartları, su arıtımında daha uzun süreli çalışan ve daha ekonomik proseslerin tercih edilmesini gerektirmektedir. Suyun tarihi gelişimi ve kullanımı değerlendirildiğinde, içme suyu arıtımında hızlı kum filtrasyonu en yaygın olarak kullanılan proseslerden birisidir [Masschelein, 1992]. Kimyasal yumaklaştırma ve çökeltme işlemlerinden sonra suda çökeltilemeyerek kalan flokların giderilmesinde başlıca tercih edilen temel işlem yer çekimiyle çalışan filtrasyon prosesidir [Hammer, 1986]. **Filtrasyon verimliliği;** *yumaklaştırıcı tipi ve dozajı [*Tanaka et al., 1984; Edwards and Amirtharajah, 1985; Collins et al., 1987; Huck et al., 2002; Babu and Chaudhuri, 2005; Khan and Thiem, 2006, Eyvaz et al., 2010; Eyvaz et al., 2011], *yumaklaştırıcı dozlama yeri* [Wagner and Hudson, 1982; Yuksel et al., 2011], *karıştırma koşulları ve süresi* [Wagner and Hudson, 1982; Lawler et al., 1983; Khan and Thiem, 2006], *filtre ortamı* [McBride et al., 1977; Huck et al., 2002; Gitis, 2008; Soyer et al., 2010], *filtrasyon hızları* [Edzwald et al., 1982] *ve ham suyun özellikleri* [Collins et al., 1987; Huck et al., 2002] gibi birçok işletme parametresine bağlıdır.

Tüm kum filtrelerinde su akışı, filtre girişine ya da çıkışına yerleştirilen debi kontrol cihazları ile kontrol edilir. Kontrol yöntemine göre de sabit debili ve azalan debili olmak üzere iki kontrol yöntemi mevcuttur. Hızlı kum filtreleri genellikle sabit debi ile çalıştırılır. Bu sabit debi elle ya da otomatik olarak sağlanır. Normal olarak, her bir filtre havuzu çıkışında bir otomatik debi kontrol vanası bulunur ve havuzlardaki kum üstündeki su seviyesi de sabit tutulur. Bazı batık filtrelerde sabit giriş debisi otomatik olarak kontrol edilir ve dolayısıyla da filtre kirlendikçe üzerindeki su seviyesi yükselir. Bazen büyük tesislerde filtre üniteleri çıkışlarını birleştiren ana çıkış borusu veya birkaç filtreyi birleştiren grup ana çıkış boruları üzerine, debiyi ayarlayan ayrıca birer ana debi kontrolörü de konularak filtre suyun toplandığı deponun taşmaması sağlanır. Sabit debili sistemler, debi kontrol cihazları gerektirdiğinden ilk tesis masrafı ve işletme-bakım giderleri fazladır. Bu sistemlerde cihazların arıza yapabilmesi ya da operatörün müdâhelesi sebebiyle debi kontrolünde aksaklıklar oluşabilmektedir. Debi kontrol edilmezse ve filtreye gelen su debisi, filtrat debisinden fazla olur ise filtre tankında taşma meydana gelebilir, ya da tam tersi olarak seviye fazla düşebilir. Bununla birlikte, herhangi bir sebeple debide meydana gelebilecek ânî değişikliklerin filtrat kalitesini olumsuz etkilediği de bilinmektedir [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Hızlı nüfus artışı, endüstriyel kirlenmenin su havzalarındaki etkisinin artması sonucu içme suyu standartlarının daha da yükselmesi ve arıtma tesislerindeki işletme maliyetlerinin büyük meblağlara ulaşması neticesinde, günümüzde, yeni tasarlanan su tasfiyesi tesislerinde azalan debili filtrasyon sabit debili sistemlere göre gerek su kalitesi ve gerekse işletme maliyetleri açısından ciddi bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, başlangıcında sabit debili olarak tasarlanan ve bu şekilde işletilen bazı eski filtrelerin, işletmede ortaya çıkan problemler sebebiyle azalan debili filtreler haline çevrildiği de bilinmektedir. Sabit debili filtrelerin kontrol mekanizmaları (arızalı oldukları için veya başka bir sebeple) çalışmadığı zaman, azalan debili filtrasyon tek alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Hatta sabit debili olarak tasarlanmış ve inşa edilmiş birçok filtre tesisi, kontrol sistemleri çalışmadığı zaman, azalan debili olarak işletilmeye (çoğu zaman bunun böyle olduğunun farkına varılmadan) devam etmiştir. [Akgiray ve Saatçi, 1997].

Bu çalışmada, azalan debili filtrasyonun prensiplerinin ve ampirik teorisinin daha iyi anlaşılıp netleşmesi için gerekli testleri yapmak üzere bir pilot tesis inşa edilmiştir. Azalan debili filtre (ADF) sistemi ile birlikte sabit debili bir filtre (SDF) de paralel çalıştırılmak suretiyle çıkış suyu kalitesi, yük kayıpları ve filtrasyon süreleri ikiz filtrelerle kıyaslanmıştır. Sonuçta, aynı ham su, aynı ortalama hız, aynı yumaklaştırıcı ve dozajı, aynı filtre malzemesi kullanılarak, filtre hız kontrol metodunun etkileri ve azalan debili filtrasyonun teorisi deneysel ve kıyaslamalı olarak ortaya konmuş olacaktır.

ADF sistemlerinin tasarımı filtrelerde zamana bağlı olarak meydana gelen su seviyesi değişikliklerinin tahminini gerektirmektedir. Halen bunların hesaplanması için kullanılabilecek rasyonel ve pratik bir metot yoktur. Azalan debili filtrelerin kurulmasında genel olarak uygulanabilecek dizayn yöntemlerine ihtiyaç bulunmaktadır ve bu amaçla da daha ileride deneysel ve teorik çalışmaların devam ettirilmesi gerekmektedir [Akgiray and Saatçı, 1998 (b)].

Günümüze kadar azalan debili filtrasyon prosesine ait parametreler yeterli ve detaylı izleme teknolojileri ile takip edilemediğinden ve azalan debili filtrelerin hidrolik davranışlarının yeterince anlaşılamamasından ötürü filtre tasarımına ait hesaplama yöntemleri ampirik olarak kalmıştır. Bu yüzden bir filtrasyon tesisi kurulacağı zaman -geçmiş çalışmalarda deneysel olarak avantajlarının da görülmesine rağmen- çoğunlukla azalan debili sistemden kaçınılmış, birçok mevcut tesiste kullanılagelen sabit debili filtrasyon prosesi tercih edilmiştir. Azalan debili filtreler üzerindeki son on yıldaki birkaç çalışma ise deneysel içerikli olmaktan çok bilgisayar programları yardımıyla geçmiş deneysel verilere dayandırılan simülasyon içerikli çalışmalar olmuştur. Çalışmamızdaki azalan debili filtre pilot tesisi günümüz online izleme ve otomasyon teknolojilerinden maksimum seviyede faydalanılmak suretiyle otomasyonlu ve online data aktaracak şekilde kurulmuş ve filtrasyon hızı ile su seviyelerindeki değişimler, modern scada sistemiyle online olarak ve çok kısa

zaman aralıklarındaki ölçümlerle takip edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmanın amacı azalan debili filtrelerin tasarlanmasına yönelik ampirik denklemlerde kullanılan kabullerin deneysel olarak analiz edilmesi ve azalan debili filtrelerin hidrolik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmak ve böylelikle daha yüksek kalitede çıkış suyu ürettiği ve işletmesinin daha ekonomik olduğu iddia edilen azalan debili filtrelerin Türkiye'deki içme suyu arıtma tesislerinde sabit debili filtreler yerine kullanılmasını tavsiye etmektir.

2. HIZLI KUM FİLTRASYONU

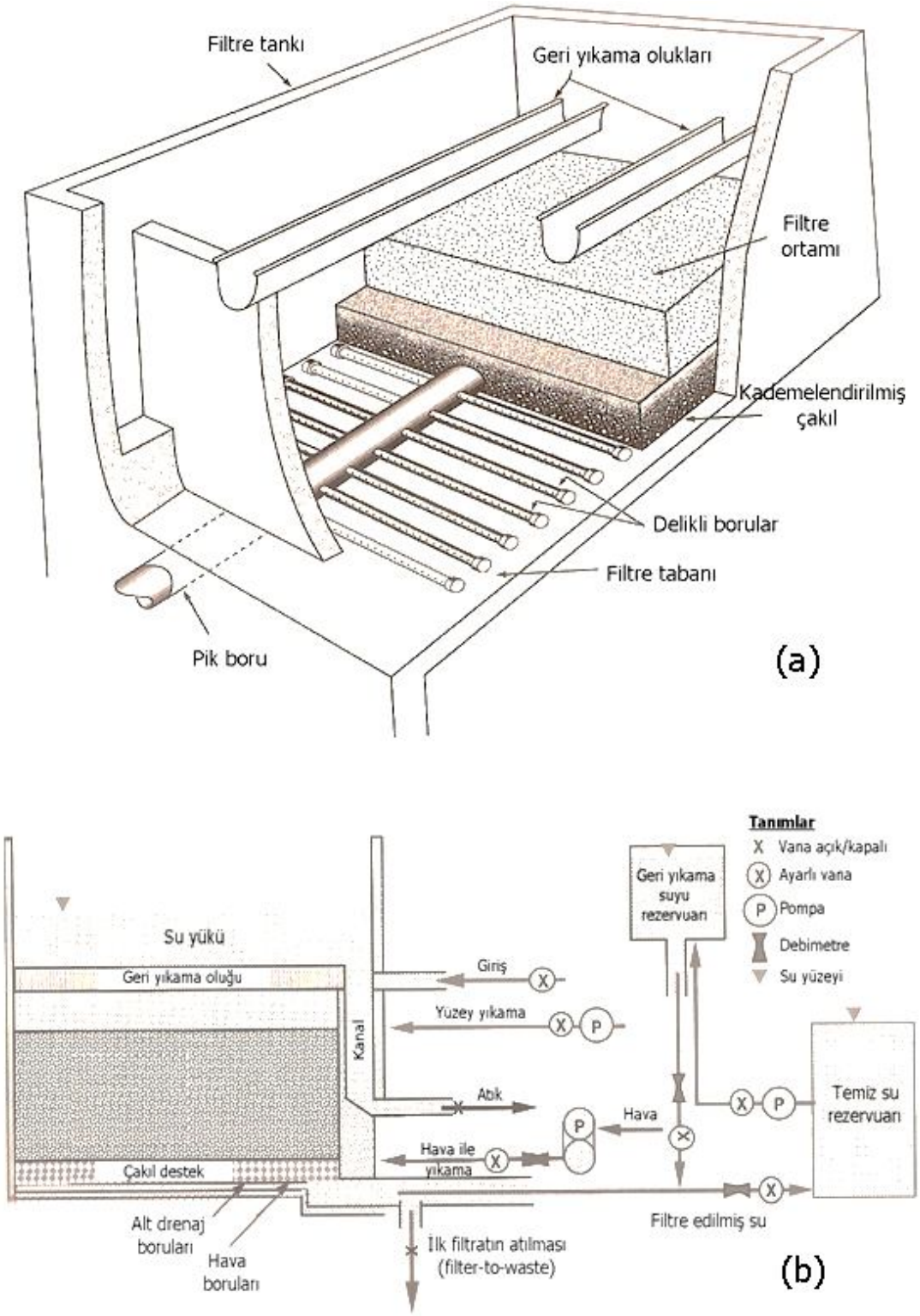
Bu tez çalışması kapsamında incelenen azalan debili filtrasyonun kuramsal temelleri filtrasyon prosesine dayanmaktadır. Filtrasyon prosesleri; akışkanın hızına (hızlı ya da yavaş filtrasyon), sıvının akış yönüne (aşağı ya da yukarı akışlı), kullanılan filtre malzemesinin çeşidi ve sayısına (kum, diatome toprağı vb. ve tek tabakalı, iki tabakalı gibi), filtrasyonun arıtma tesisindeki yerine (konvansiyonel, direkt ya da in-line) ve kullanılan debi kontrol yöntemine (sabit debili, azalan debili vb.) göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu çalışmadaki filtreler direkt filtrasyon modunda, aşağı akışlı olarak, kum yatağı kullanılarak, hem azalan debili hem de sabit debili şekilde işletilmiş ve deneyler hızlı kum filtrelerinde kullanılan filtrasyon hızları çerçevesinde yürütülmüştür. Dolayısıyla bu bölümde hızlı kum filtrasyonu ile ilgili genel bilgiler verilmiş, tez konusunun esasını teşkil eden; filtrelerin debi kontrol metotlarına göre sınıflandırılmaları ile ilgili literatür bilgisi ise Bölüm 3'de daha kapsamlı olarak sunulmuştur.

2.1. Filtrasyonun Genel Tanımı

Çevre mühendisliği uygulamalarında filtrasyon, su kaynağından gelen veya arıtma işlemleri sırasında oluşan kil ve silt taneleri, mikroorganizmalar, kolloid ve çöken humik maddeler, bitki çürümesiyle oluşan parçacıklar, suyun yumuşatılmasında kullanılan kalsiyum karbonat ve magnezyum hidroksit çökeltileri gibi askıda katı parçacıkların gideriminde yaygın olarak kullanılan temel işlemlerden birisidir [Duran ve Demirer, 1997]. Filtrasyon işlemi özellikle içme sularının arıtılmasında yüksek kalitede içme suyu eldesinde kullanılır. Atıksuların arıtılmasında da bazı kademelerde ihtiyaca göre proseste yer alır [Masschelein, 1992; Keskinler ve diğ., 1994].

Filtrasyon prosesi, gözenekli bir ortamdan suyun belli bir hızda geçerek süzülmesi esasına dayanır. Gözenekli filtre ortamı suyun geçmesine izin verirken, parçacıkları ise içerisinde tutar. Tipik olarak filtre ortamında tutulan parçacıklar (0.1-50 mm), filtre malzemesi boyutundan (500-2000 mm) daha küçük olup, böyle bir tutulma işlemi süzülmeden ziyade parçacıkların, suyun hızlı akışından dolayı filtre malzemesine çarpması ve yapışması şeklinde gerçekleşir. Darcy, 1856'da gözenekli

ortamda akış ile ilgili çalışmasını yayınlamasına rağmen ilk filtreler, filtre yatağında akışı tanımlayan Carman-Kozeny denkleminin ilk kez yayınlandığı yıl olan 1937'ye kadar deneme yanılma yöntemine göre dizayn edilmişlerdir. Granüler filtrelerin tasarımıyla ilgili araştırmalar hâlâ sürdürülmekle birlikte tasarımda kullanılan önceki ampirik denklemler yaygın bir şekilde kullanılmaya devam etmektedir [Parsons and Jefferson, 2006].



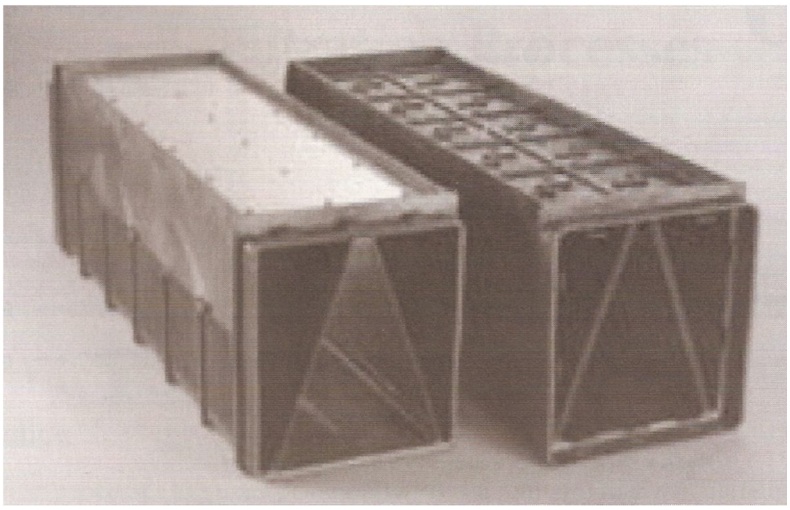
Şekil 2.1. Derin yataklı filtrenin şematik gösterimi: (a) Hızlı filtrenin kesit görünümü, (b) Vana ve benzeri alt sistemleriyle birlikte filtre tankının gösterimi [Hendricks, 2006].

2.2. Filtrelerin Fiziki Özellikleri

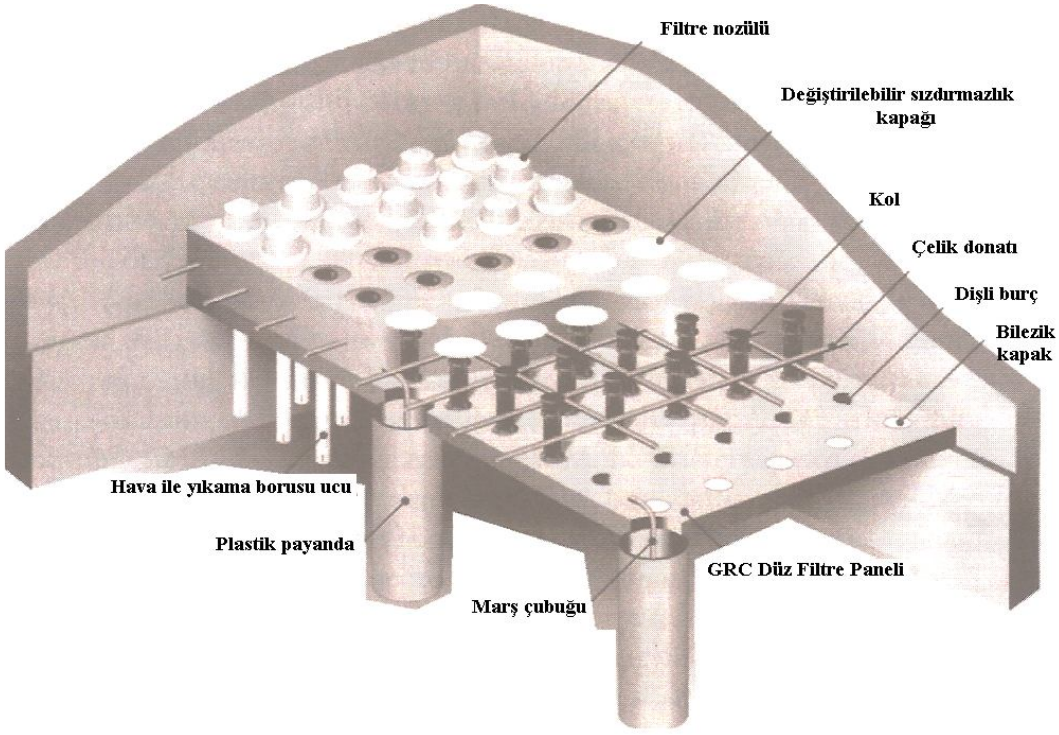
Tipik bir filtre, içerisinde filtre malzemesi bulunan dikdörtgen ya da kare ve betondan oluşmuş açık bir tanktan meydana gelir [Reynolds and Richards, 1996]. Ayrıca tank içerisinde filtre edilmiş suyu toplayan ve filtrelerin hava ve/veya suyla geri yıkanmasını sağlayan uygun borulama sistemi de yer alır (Şekil 2.1). Filtre tankının boyutları, su ihtiyacına göre belirlenmesine ve genellikle 100 m^2'den küçük tutulmasına rağmen 150 m^2 alana kadar büyüklükte tasarlanabilmektedir. Birden fazla paralel filtre işletilerek geniş yüzey alanlı filtreler temin edilebilmekte ve ayrıca filtreler sırasıyla işletmeden çıkarılıp tek tek geri yıkanabilmektedirler. Böylelikle filtrelerin bir kısmı hizmet vermeye devam edebilmektedir.

Filtre tankının en altında yer alan drenaj kısmının üstünde bir tabaka yer alır. Bu tabaka, filtre yatağını desteklediği gibi, filtratı toplar ve geri yıkama suyunun filtre yatağına dağılmasını temin eder. Bu tabakanın ilk kullanılan çeşitlerinden biri yanal manifold (dağıtım borusu) sistemidir. Bu sistemde manifold üzerinde aralıklı olarak delikli borular bulunur. Daha modern sistemler ise kendi kendini destekleyen fabrikasyon sistemler ve nozül içeren suni tabanlı alt drenaj sistemler olarak sınıflandırılabilir. Fabrikasyon sistemlerde destek blokları HDPE gibi polimerler malzemeden inşa edilir. Bu malzeme hem çakıl tabakasını destekleyebilmekte hem de 300-500 μm açıklıktaki gözenekleriyle arzu edilirse direkt olarak filtre kumunun üzerine oturtulabileceği özelliktedir (Şekil 2.2).

Nozül içeren sistemlerde ise, filtre tabanının 0.3-0.6 m yukarısında beton bir döşeme yer alır. Bu döşemeye düzenli aralıklarla nozüller yerleştirilir (Şekil 2.3). Bu nozüller destek tabaka içindeki çıkıntılarıyla filtre yatağı içerisindeki hava dağılımının homojen olmasını sağlarlar. Nozül açıklıkları genellikle kum tanelerinden büyüktür. Böylece, büyüklükleri derecelendirilmiş çakıl tabakaları nozüller üzerinde yer alarak, kumun kaçmasını engellerler [Parsons and Jefferson, 2006].



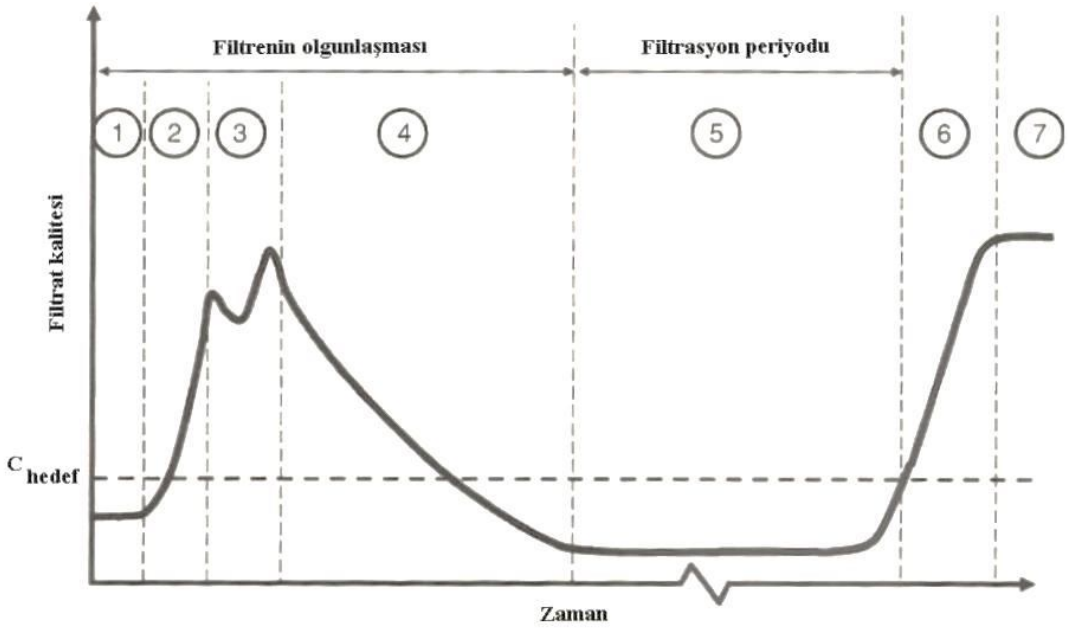
Şekil 2.2. Fabrikasyon filtre tabanı bloğu [Parsons and Jefferson, 2006].



Şekil 2.3. Nozül içeren suni tabanlı filtre tabanı [Parsons and Jefferson, 2006].

2.3. Filtrasyon İşlemi

Filtrasyon prosesi süresince parçacıklar filtre yatağının boşluklarında birikirler, efektif gözenek çapını küçültürler ve filtre yatağının sıvı akışına karşı olan direncini artırırlar. Bu durum, hem basınç düşüşünde artışa (sabit debili filtrasyon) hem de akışta azalmaya (sabit su seviyeli filtrasyon) neden olur. Proses devam ettikçe filtre yatağının üst kısımları parçacıklarla yüklenmeye ve bu parçacıklar da kendilerinden sonra gelen sıvı içerisindeki parçacıkları durdurmaya devam ederler. Sonuç olarak da filtre yatağının derin kısımlarının da tamamen tıkanarak filtre yatağının süzme işlemini yürüten parçacıkları bir blok halinde hareket etmeye meyilli hale gelirler. Parçacıkların filtrata karışması (particle breakthrough) çok artarsa ya da yük kayıpları çok fazla olursa, filtrenin temiz suyla geri yıkanarak temizlenmesi gerekir. Geri yıkamada suyla birlikte hava da kullanılabilir. Böylelikle filtrasyon tipik olarak 12-36 saat arasında (bu süre filtrasyon döngüsü olarak bilinir) işletilen kesikli bir proses olarak işletilir. Filtrasyon döngüsü 7 ayrı evrede incelenebilir (Şekil 2.4):



Şekil 2.4. Tipik bir filtrasyon prosesi döngüsü.

1. Gecikme evresi: Temiz geri yıkama suyunun filtreden süzülerek alt drenajdan geçtiği zamandır.

2. Ön olgunlaşma (pre-ripening) evresi: Filtre yatağı içerisindeki muhtemel kirli geri yıkama suyu kalıntısının filtrat kalitesini bozduğu evredir.
3. İkinci ön olgunlaşma (second pre-ripening) evresi: Filtre yatağı üzerindeki muhtemel kirli geri yıkama suyu kalıntısı sebebiyle filtrat kalitesinin bozulmaya devam ettiği evredir.
4. Olgunlaşma (ripening) evresi: Filtrat kalitesinin bozulmasının sona erip, kalitenin iyileşerek kararlı bir hale ulaşmasına kadar geçen süredir.
5. (Efektif) Filtrasyon evresi: Filtrenin optimum kalitede filtrat ürettiği ve filtrasyon döngüsündeki ana periyot olan süredir.
6. Atılım (breakthrough) evresi: Filtrenin maksimum parçacık tutma kapasitesine eriştiği ve filtre çıkış suyu kalitesinin bozulmaya başladığı zaman dilimidir.
7. Bitkin evre: Filtrat kalitesindeki bozulmanın (parçacık konsantrasyonunun) maksimum olduğu periyottur.

Yukarıda bahsedilen filtrasyon evreleri içerisindeki en karışık periyot başlangıç periyodudur ve en dikkati çeken evre ise, başlangıç filtratını atmak (filtering to waste) ve yumaklaştırıcı kullanmak gibi yöntemlerle 2 ve 3 no'lu bulanıklık piklerinin azaltılmak ya da bertaraf edilmek istendiği olgunlaşma evresidir. Gecikme ve atılım (1 ve 6) evreleri filtrasyon döngüsüyle birlikte genellikle rapor edilmez ve her biri yaklaşık 10'ar dakikadır. Efektif filtrasyon evresinde en çok dikkati çeken iki husus filtrasyon işleminde meydana gelen kesintiler ve operasyonda bulanıklık piklerine sebep olabilen, su debisindeki ani değişimlerdir.

2.4. Filtrasyon Prosesinin Teknik Özellikleri

2.4.1. Parçacık Giderme Mekanizmaları

Parçacıkların filtre yatağı içerisinde yakalanması işlemi, çarpışma (collision) ve tutunma (attachment) olmak üzere iki adımdan oluşur. İlk adımda süzülen sıvı içerisindeki parçacıklar kum taneciklerinin yüzeyine aşağıda bahsedilen mekanizmalarla yaklaşırlar. İkinci adımda ise parçacıkların ve kum tanelerinin yüzeysel kuvvetlerinin arasındaki dengeye bağlı olarak tutunma işlemi meydana

gelir. Her adımın derecesini etkileyen çeşitli faktörler mevcuttur ve aşağıda ayrı ayrı açıklanmıştır.

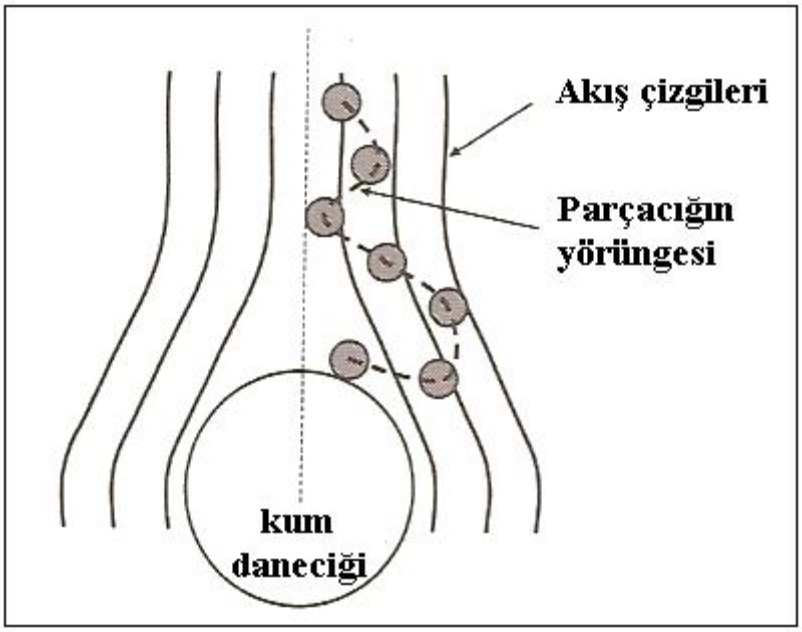
2.4.1.1. Çarpışma (collision)

Herhangi bir taşınım mekanizması rotasından saptırıncaya kadar, bir parçacık (sıvı akışı laminer olduğunda) sıvının akış hattında hareket eder. Parçacıkların kum taneleri ile çarpışmalarında 3 mekanizmanın etkili olduğu bildirilmiştir. Her bir mekanizmanın sebep olacağı muhtemel partikül tutulmasının hesapları hava filtrasyonu denklemlerinden elde edilmiştir.

1. Difüzyon (diffusion)

Çevrelerini saran moleküllerin sıkıştırmalarından dolayı bütün parçacıklar akış yönlerinden rastgele yönlere doğru hareket ederler (Brown hareketi). Parçacıkların difüzyonunun genellikle 1 μm'den küçük çaplı parçacıklar için geçerli olduğu belirtilmektedir. Difüzyonun gerçekleşme olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_D = 0.9\left(\frac{KT}{\mu d_p du}\right)^{2/3} \tag{2.1}$$

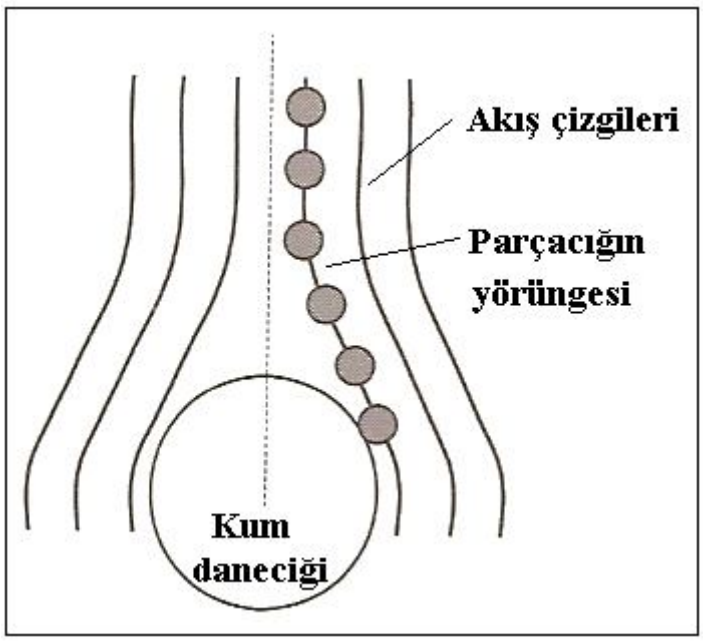


Şekil 2.5. Filtre yatağı içerisinde difüzyonun şematik gösterimi.

2. Engellenme (interception)

Parçacık yarıçapının akış çizgileri arasındaki mesafeden ve kum tanesi yarıçapından büyük olduğu durumda, akış çizgisiyle birlikte hareket eden parçacığın kum tanesi yüzeyiyle temas etmesidir:

$$\eta_I = \frac{3}{2}\left(\frac{d_p}{d}\right)^2 \qquad (2.2)$$

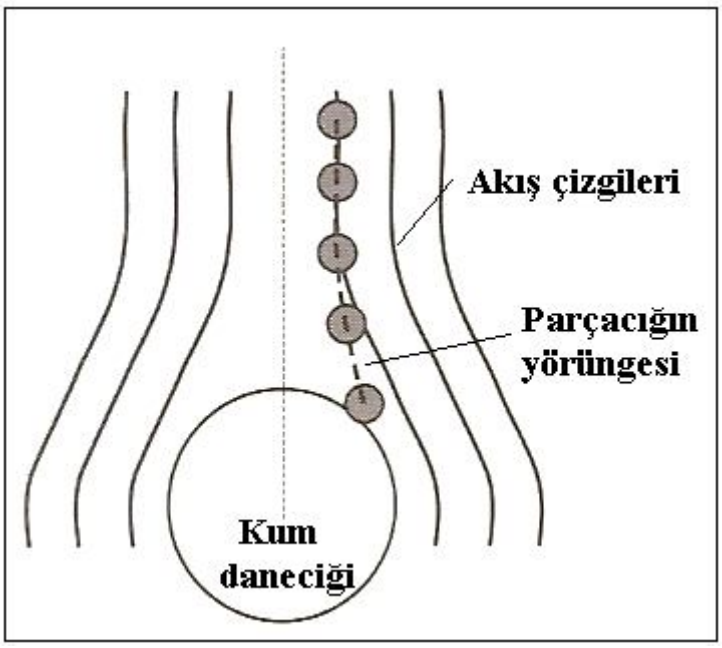


Şekil 2.6. Filtre yatağı içerisinde engellenmenin şematik gösterimi.

3. Çökelme (sedimentation)

Akış çizgileri doğrultusunda hareket eden parçacık, sadece filtre tabanına dik olan akış çizgisini takip ettiğinde çökelme meydana gelir. Bu durumda her bir filtre küçük birer çöktürme tankı gibi çalışmış olur. Bu mekanizmanın gerçekleşme olasılığı Stokes çökelme hızı ve sıvının yaklaşık hızı arasındaki boyutsuz orana bağlıdır:

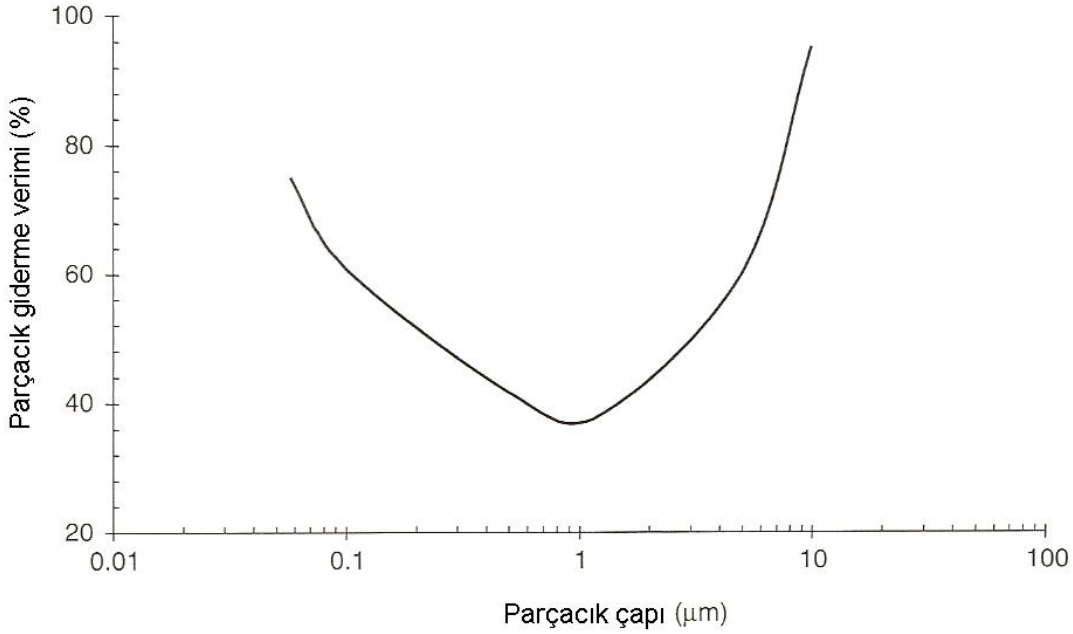
$$\eta_S = \left(\frac{{d_p}^2(\rho_p - \rho)g}{18\ \mu u}\right) \tag{2.3}$$



Şekil 2.7. Filtre yatağı içerisinde çökmenin şematik gösterimi.

Yukarıdaki üç çarpışma mekanizması ile ilgili verilen denklemlerde d_p: parçacık çapı (m), d: filtre malzemesini oluşturan danecik çapı, u: filtrasyon hızı, (m^3/m^2.sa), μ: viskozite (kg/m.s), *K*: Boltzman sabiti ve T: mutlak sıcaklık (K)'dir.

Filtre içinde parçacık yakalanmasının toplam olasılığı her bir mekanizmanın gerçekleşme olasılığı yüzdelerinin toplamı ile bulunur. Buna göre, 1 mm'den küçük partiküller için en etkili mekanizma difüzyon iken, 1 mm'den daha büyük partiküller etken olan mekanizma ise engellenme ve çökelmedir. Difüzyon mekanizması ile diğer iki mekanizma arasında bir geçit değeri olan 1 μm çapında parçacık giderimi minimum olur (Şekil 2.8). Böylece, şekilden de görülebileceği gibi başlangıçta çok daha küçük parçacıkların etkili olarak giderildiği görülmektedir. Yukarıda verilen denklemler analiz edildiğinde 1 μm parçacıklar için tutulma olasılığının, filtrasyon hızının artması (u^{-1}, $u^{-2/3}$), parçacık çapının büyümesi (d^2, $d^{-2/3}$) ve su sıcaklığının azalması (μ^{-1}, $\mu^{-2/3}$) ile azaldığı görülebilir.



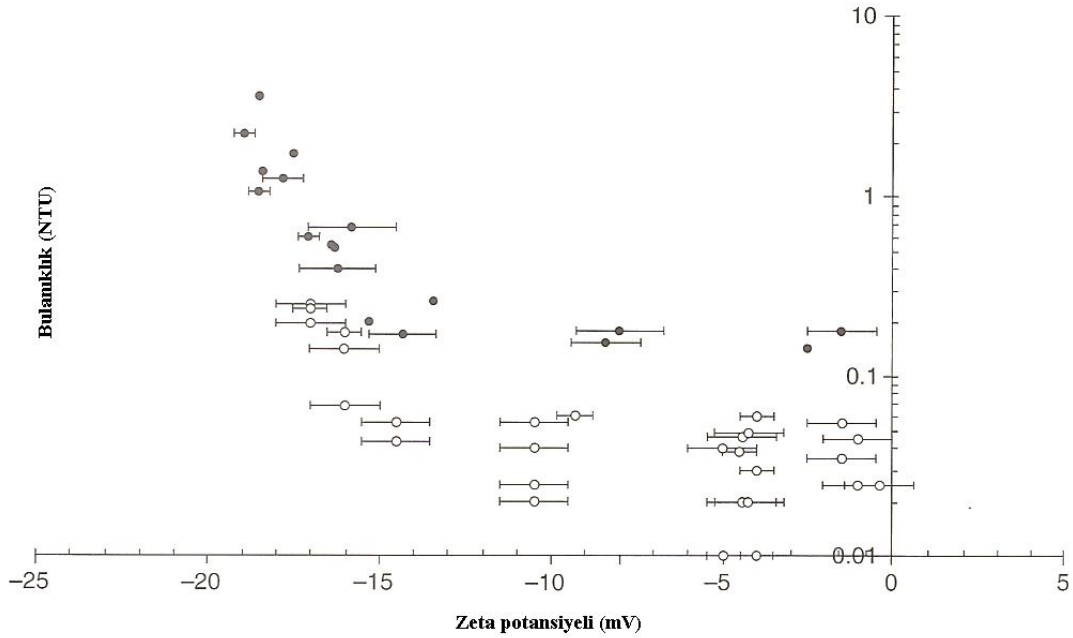
Şekil 2.8. Parçacık büyüklüğüne bağlı olarak giderme veriminin değişimi [Parsons and Jefferson, 2006].

2.4.1.2. Tutunma (attachment)

Bir parçacık bir filtre yatağı danesine 100 nm'den daha fazla yaklaştığında, van der Waals etkileşimleri ve elektriksel itme kuvvetleri gibi kısa aralıktaki kuvvetlerin önemi artar. Bu iki kuvvet, birbirine yaklaşan iki yüzey arasındaki etkileşimlerin hesap edilmesine yarayan DVLO (kolloid stabilitesi ile ilgili bir teori) teorisinin de temellerini oluştururlar.

Toplam etkileşim kuvveti yüksek olduğunda kum ile parçacık arasında bir bariyer oluşur ve parçacıklar kuma çarpıp kum daneciğinin yüzeyinden ayrılırlar. Bu etkileşim kuvvetleri azaltıldığında (örneğin parçacığın yüzey yükünü azaltarak) bariyer aradan kalkar ve parçacık ile kum danesi arasında temas meydana gelebilir. Parçacığın yüzey yükü çoğunlukla zeta potansiyeli ölçümüyle belirlenir. Gerçekte parçacık ve kum danesi arasında bariyer oluşumunun meydana gelmediği bir yüzey yükü eşik değeri (threshold value) bulunmaktadır. Kesin olarak bir eşik değerinin belirlenmesi proses değişkenlerine bağlı olmakla birlikte derin yataklı filtreler için bu eşik değerin normal olarak -15 mV civarında olduğu söylenebilir. Şekil 2.9'da faklı

boyutta filtre malzemesi içeren iki adet filtre sisteminin (içi dolu ve boş yuvarlaklar) performansları karşılaştırılmaktadır. Şekil 2.9'a bakıldığında zeta potansiyeli ölçümünün filtrasyon prosesinin optimum şartlarda çalıştırılabilmesi için iyi bir indikatör olduğu söylenebilir. Ancak, bu ölçümler optimum bulanıklık değeri hakkında bilgi vermez [Parsons and Jefferson, 2006].



Şekil 2.9. Filtrasyon performansı ile zeta potansiyeli arasındaki ilişki [Parsons and Jefferson, 2006].

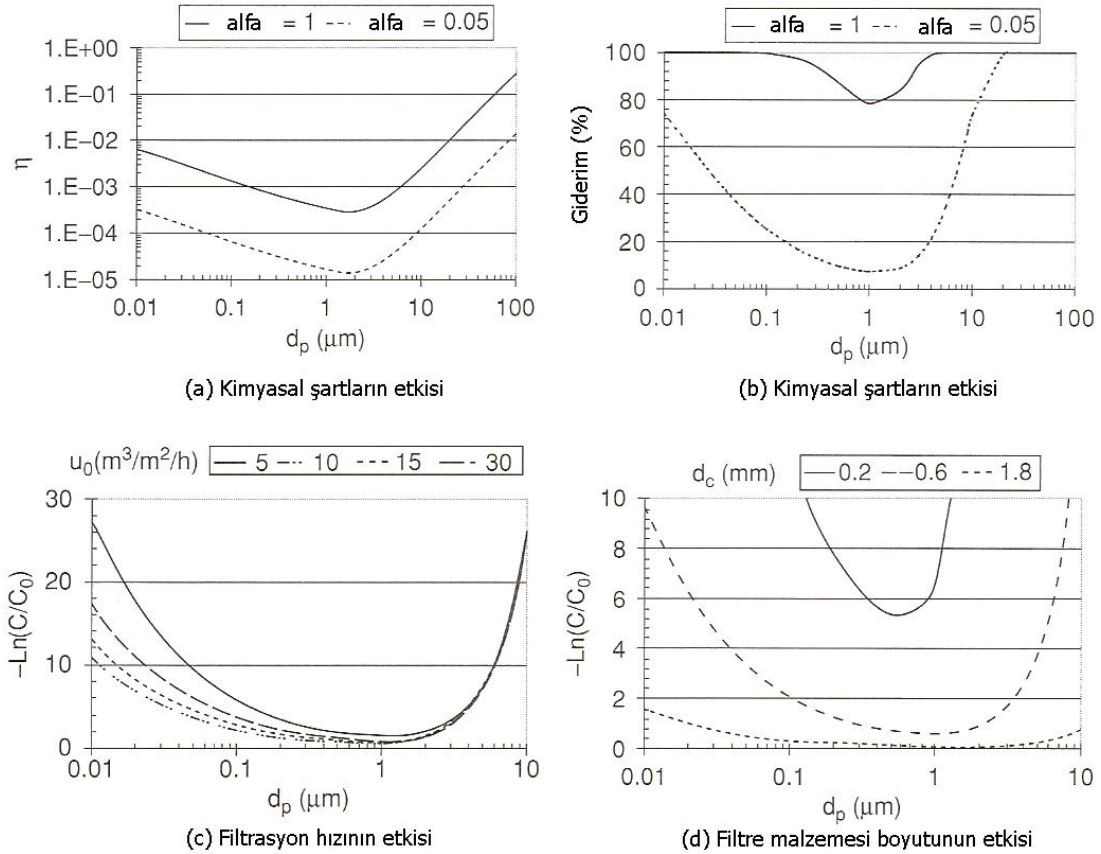
2.4.2. Filtrasyonla İlgili Çeşitli Tanımlar

Filtre tankı içindeki sıvı akış çizgilerin izlenmesinin analizi ve mekanistik denklemlerin entegrasyonuyla filtre performansı aşağıdaki gibi belirlenebilir [Elimelech et al., 1995]:

$$ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\frac{3}{2}\frac{(1-\varepsilon)\alpha\eta_0 L}{d} \tag{2.4}$$

Burada α: tutunma verimi, ε: yatak porozitesi, η_0: çarpışma verimi ve L: yatak derinliğidir. Yukarıdaki yaklaşım filtrasyon değişkenlerinin filtre performansına

etkilerini araştırmak için kullanılabilir (Şekil 2.10). Şekildeki ilk iki grafik ((a) ve (b)) kimyasal ilavesinin yapılmadığı ya da az olduğu (α=0.05) şartlar ile optimum şartlar (α=1) arasında tutunma katsayısının filtre performansına etkisinin değişimini göstermektedir. İlk iki grafik göstermektedir ki, 60 cm'lik filtre yatağı 100 nm'den küçük (virüsler) ve 7 nm'den büyük (protozoa kistleri) parçacıkları etkili bir şekilde gidermektedir. Kısıtlamanın, giderme veriminin minimum olduğu 1 nm boyutu (patojenik bateriler) civarında olduğu görülmektedir. 1 nm'den büyük parçacıklar filtre hızından bağımsız olan engellenme (interception) mekanizması ile giderildiğinden filtre hızları çoğunlukla küçük parçacıkların giderimini etkilemektedir (Şekil 2.10 (c)). Filtre malzemesi boyutunun parçacıkların giderimini etkileyen birincil faktör olduğu şekil 2.10 (d)' de görülmektedir.



Şekil 2.10. Mikroskopik modellere göre filtrasyon performansları [Parsons and Jefferson, 2006].

Filtrasyon performansını tanımlayan bir başka alternatif yaklaşım da parçacık giderme mekanizmalarını dikkate almayan *fenomenolojik* modellemedir. Bu

modelleme filtre yatağı içindeki kütle dengesi ile ampirik bir hız denklemini dikkate almaktadır. Buradaki kütle dengesi filtre yatağı içerisindeki spesifik birikmenin değişme hızına bağlı olan askıda katı madde gradiyentini tanımlarken, hız denklemi de konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak parçacıkların değişim hızlarını ifade etmektedir. Bu iki parametre derinlik ve zamana bağlı olarak filtrasyon prosesiyle ilgili bir tanım gerçekleştirirler.

Kütle denkliği: $$-U_0 \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (2.5)$$

Hız ifadesi: $$\frac{\partial C}{\partial y} = -\lambda C \quad (2.6)$$

Yukarıdaki denklemlerin çözümü oldukça karışık olup kullanışlı tahminler elde edebilmek için genellikle bir bilgisayar simülasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu denklemlerde σ: spesifik birikme (filtre yatağının birim hacminde biriken parçacıkların hacmi), λ: filtre katsayısı (herhangi bir filtrenin parçacıkları giderme kabiliyeti), y: filtre derinliği ve t: filtrasyon süresi. İki yaklaşımın karşılaştırılması:

$$\lambda_0 = \frac{3}{2}\left(\frac{1-\varepsilon}{d}\right)\eta_0 \quad (2.7)$$

Filtre yatağı parçacıklarla dolduğundan filtre gözeneklerindeki akış hızı artar ve kesme kuvvetlerini de arttırır. Bu proses filtre yatağı boyunca bu şekilde devam ettikçe çıkış suyundaki parçacık konsantrasyonu artmaya başlar. Bu durumda filtre işletmeden alınıp geri yıkanmalıdır (Şekil 2.4). Pratikte bu modeller sadece filtrasyonun başlangıç aşamalarında efektif olarak çalışırlar. Ve tahmin ettikleri filtrasyon süreleri çoğunlukla doğru çıkmaz. Bu yüzden bu modellerle birlikte pilot çalışmaların da gerçekleştirilmesinde fayda vardır. Bu modellerdeki ampirik denklemlerden elde edilmiş tipik filtre kapasiteleri kum için 1000 g/m^3 ve antrasit içinde 2000 g/m^3'tür [Parsons and Jefferson, 2006].

2.4.3. Filtrasyon Hidroliği

Filtre yatağı gözenekli bir ortamdır. Filtre edilen sıvı içerisinde bulunan katı maddeler tutuldukça filtre ortamının gözenekleri tıkanmaya ve filtre yatağında yük kaybı oluşmaya başlar. Filtrasyon sırasında bu yük kaybı tahmin edilebilmesine rağmen önceden tam olarak hesaplanması zordur. Yük kaybının tahmininde daha önceden işletilmiş tam veya pilot ölçekte benzer tesislerde elde edilmiş verilerden yararlanılabilir. Arıtma tesisindeki yük kaybının hesaplanmasında filtre yatağının temizken meydana getirdiği yük kaybının da dikkate alınması önemlidir.

Temiz yatak yük kaybı hesaplanırken bazı bilinen eşitlikler kullanılabilir. AWWA (1990)'a göre 0.5—1 mm danecik çapındaki filtre ortamında 12 m/sa filtrasyon hızıyla işletilen bir filtrede temiz filtre ortamındaki akış laminerdir. Temiz filtre yatağındaki laminer akıma ait yük kaybı hesaplanırken Carman-Kozeny denklemi kullanılabilir (Denklem 2.8) [Parsons and Jefferson, 2006]. Ancak filtrelerde oluşan hidrolik yük kaybının hesaplanmasında bazı ön kabuller yapılması zorunludur. Öncelikle, daneler arasındaki boşluktan akan suyun oluşturacağı yük kaybının boru içerisinde akan suyun oluşturacağı yük kaybıyla yakınsanarak hesaplanabileceği varsayılır. Böylece filtre yatağı derinliğinin boru boyuna, daneler arasındaki boşluğun (ki bu boşluğun da dane çapına eşit olduğu varsayılır) da boru çapına eşit olduğu ön kabulü yapılır. Gerçekte, suyun filtrede izlediği yol filtre derinliğinden daha fazla, daneler arasındaki boşluk da dane çapından daha küçüktür. Sonuç olarak, bu varsayımlar sonucu oluşturulan yöntem, filtrelerdeki hidrolik yük kaybı hesabı için oldukça kullanışlıdır [Duran ve Demirer, 1997]. Dolayısıyla borulardaki hidrolik yük kaybının hesaplanmasında kullanılan Darcy-Weisbach denkleminden hareketle Carman-Kozeny denklemi geliştirilmiştir [Reynolds and Richards, 1996]:

$$\frac{h}{L} = \frac{k\mu}{\rho g}\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\left(\frac{a}{v}\right)^2 V \qquad (2.8)$$

Bu denklemde;

h: L derinliğindeki filtre yatağında meydana gelen yük kaybı

g: yerçekimi ivmesi

ε: porozite

a/v: birim hacimdeki daneciğin yüzey alanı (spesifik yüzey, Sv = 6/d (küreler için); $6/\psi d_{eq}$ (küresel olmayan danecikler için))

ψ: küresellik katsayısı

d_{eq}: aynı hacimdeki küresel daneciğin çapı

V: filtre yatağı üzerindeki yüzeysel akış, debi/filtre alanı

μ: filtre edilen akışkanın mutlak vizkozitesi

ρ: filtre edilen akışkanın özgül ağırlığı

k: Kozeny sabiti (boyutsuz, çoğu filtrasyon şartlarında 5'e yakın bulunur)

Su arıtımdaki tipik uygulamalarda yük kaybı artışı hıza bağlı olarak yaklaşık lineer olduğu için aşağıdaki basitleştirilmiş denklem kullanılabilir:

$$\frac{h}{L} = 1.02^{(15-T)} k_h u \tag{2.9}$$

Burada k_h boyut ve çeşidine bağlı olarak gözenekli filtre ortamı için spesifik yük kaybı katsayısıdır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1. Çeşitli filtre malzemelerinin tipik yük kaybı katsayıları.

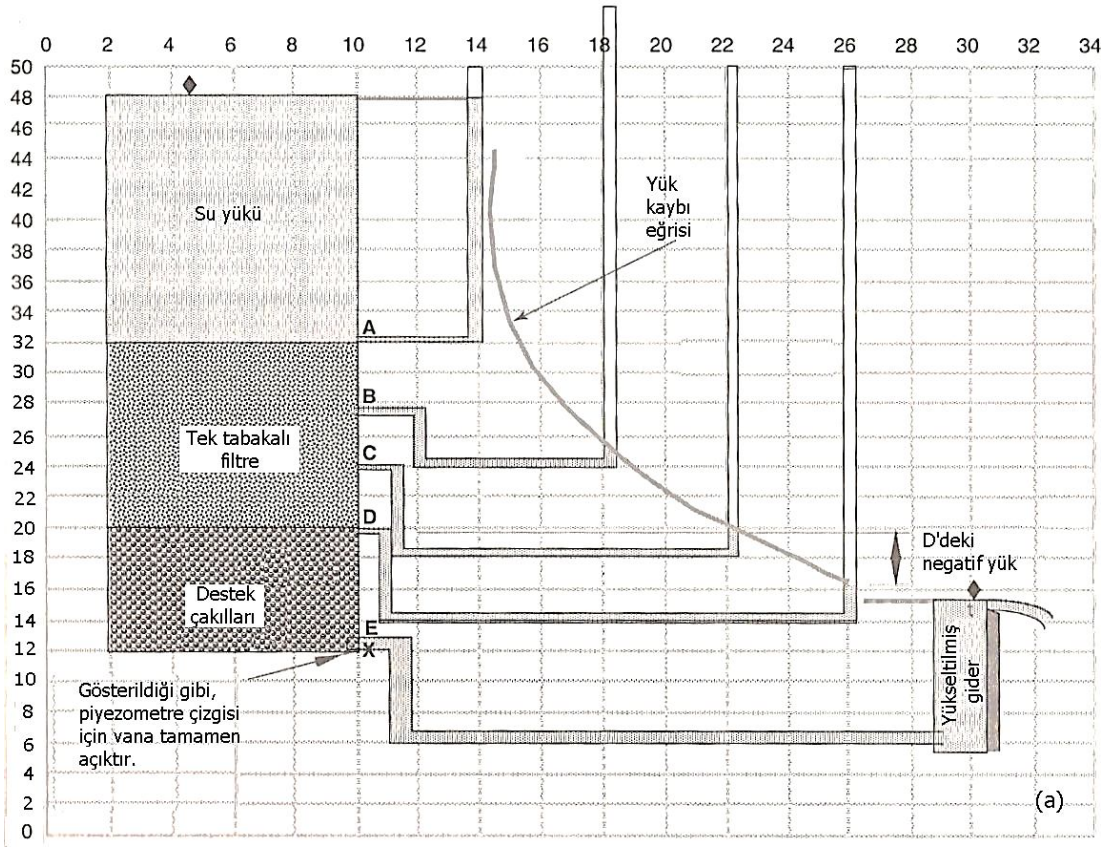
Ortam	Mesh	Boyut (mm)	k_h
Kum	16/30	0.5-1.0	0.06
Kum	14/25	0.6-1.2	0.05
Kum	8/16	1.0-2.0	0.04
Antrasit	-	1.2-2.5	0.01
Garnet	25/52	0.3-0.8	0.12

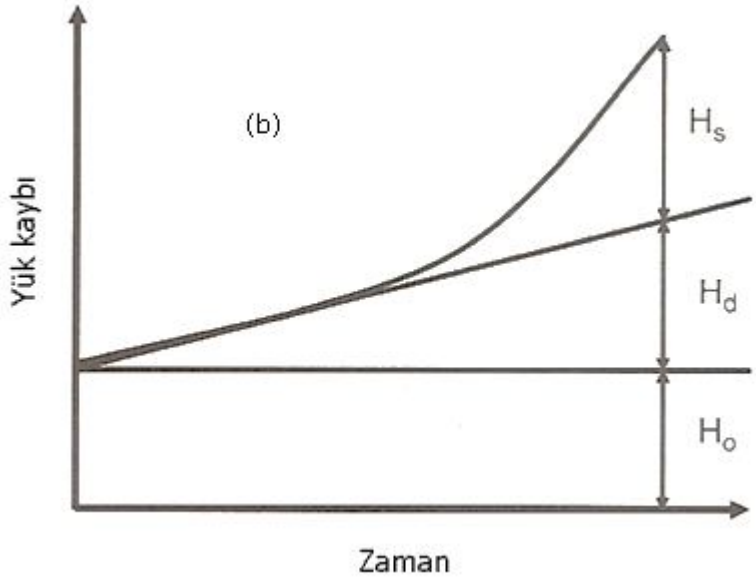
İşletmedeki filtre zamana bağlı olarak parçacıklarla yüklenir. Filtre yatağındaki basınç düşüşü filtrede tutulan maddelerin miktarıyla orantılı olarak değişir ve böylece toplam filtredeki yük kaybı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$H = H_0 + K_v C_0 t \tag{2.10}$$

Burada K_v bir sabit, H_0: başlangıç yük kaybı, H_d: filtrasyondan dolayı meydana gelen yük kaybı (Şekil 2.11). Şekilde görülen eksponansiyel yük kaybı eğrisi filtre yatağının üst kısmındaki parçacık birikimin yatağın en üst seviyesini tıkaması sebebiyle meydana gelmiştir. Bu durum filtre yatağının derinliklerinin etkin bir şekilde kullanılması engeller ve kısa işletme sürelerine sebep olur. Bu etkiyi minimize edebilmek için aşağıdaki yöntemler denenebilir:

- Giriş konsantrasyonunu azaltmak,
- Büyük parçacıkları gidermek,
- Girişteki filtre malzemesini daha iri boyuttakilerle değiştirmek,
- Filtrasyon hızını arttırmak.





Şekil 2.11. Filtrede yük kaybı: (a) Piyezometrik çizgi ve negatif yükün gösterimi [Hendricks, 2006], (b) Filtrelerde ideal yük kayıpları gelişimleri [Parsons and Jefferson, 2006].

2.4.4. Geri Yıkama Prosesi

Geri yıkamanın amacı, filtrasyonun tersi yönündeki sıvı akışının meydana getirdiği kesme kuvvetlerinden de faydalanılarak filtre malzemesi daneciklerinin birbirine çarpması ve sürtünmesiyle birlikte boşluklarında biriken parçacıkların yerlerinden sökülüp atılması, böylelikle filtre yatağının bir sonraki filtrasyon periyodu için temizlenmesidir. Geri yıkamadaki sıvı akış hızı genellikle filtre yatağını % 5-30 genişletecek şekilde ayarlanır. Geri yıkama suyu pompa ile filtre tankının tabanından uygulanır. Yatak boyunca hareket eden suyun filtre yatağını genişletmeye başladığı noktada akışkan filtre yatağının ağırlığını karşılayabilecek durumdadır. Bu denge noktasında (filtre yatağının akışkan yönünde hareket edebilmesi için gerekli olan minimum hız) hız aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$v_{mf} = \frac{g}{180}\frac{(\rho_s - \rho)}{\mu}\frac{\varepsilon^3 d^2}{(1-\varepsilon)} \tag{2.11}$$

Yukarıdaki denklem analiz edildiğinde minimum akışkanlaşma hızının belirlenmesinde aşağıdaki değişkenlerin önemli olduğu görülmektedir:

- Filtre malzemesinin danecik boyutu (çapı),
- Filtre malzemesinin yoğunluğu,
- Filtre malzemesindeki boşluk ve sıkıştırılma karakteristiği,
- Sıcaklık (suyun viskozitesini etkilediği için).

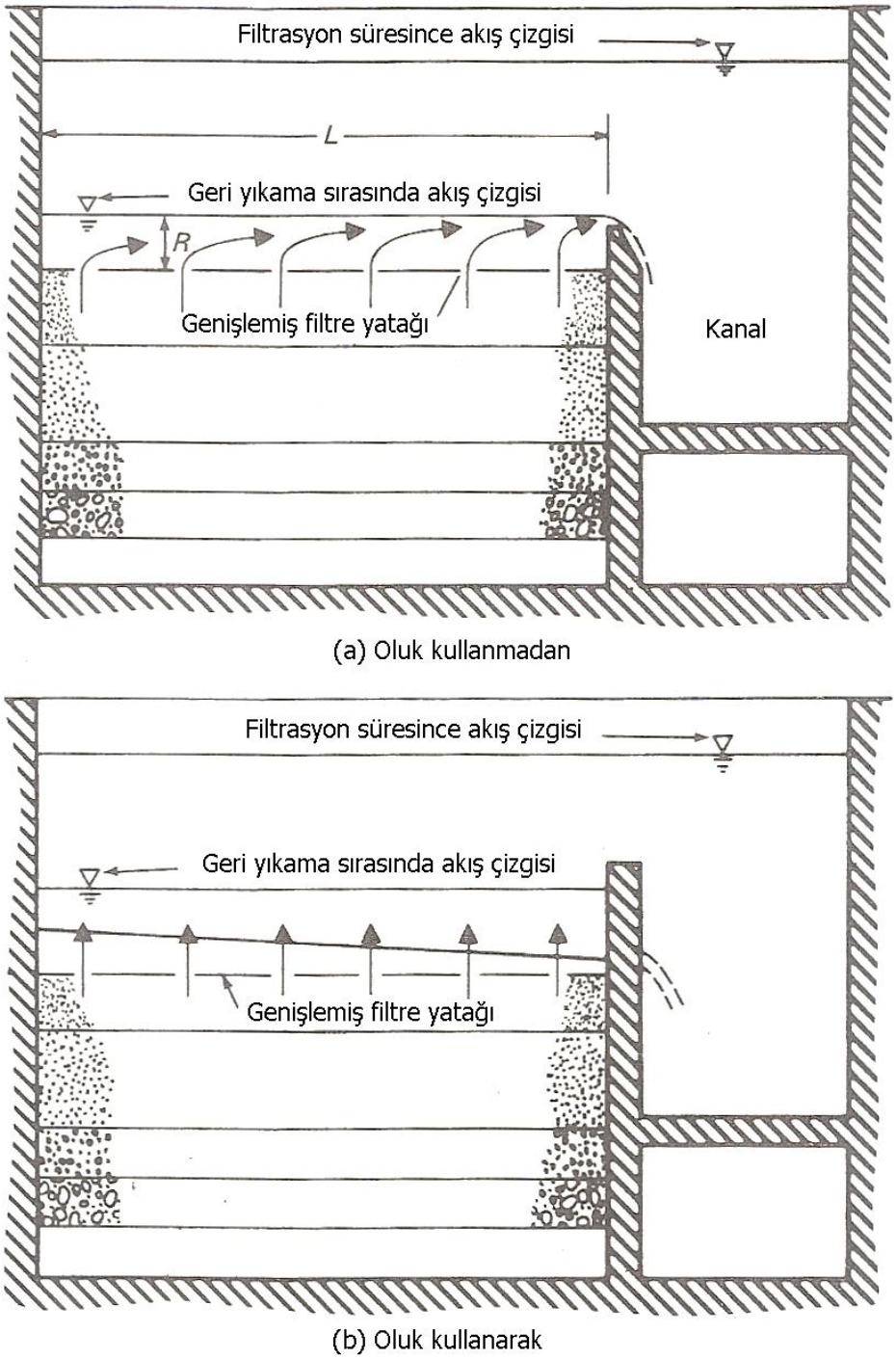
Tablo 2.2. Çeşitli filtre malzemelerinin akışkanlaşma hızları [Droste, 1997].

Ortalama boyut (mm)	25 °C'de % 10 yatak genişlemesi için gerekli akış hızı (m/sa)		
	Antrasit (d: 1.7 g/cm^3)	Kum (d: 2.65 g/cm^3)	Garnet (d: 4.1 g/cm^3)
2.59	90.4	-	-
1.84	58.7	100.2	-
1.30	38.4	66.0	119.8
0.92	24.2	40.1	78.2
0.65	17.1	22.0	53.8
0.46	-	13.2	33.5
0.27	-	-	15.4

Geri yıkama hızı minimum akışkanlaşma hızına yükseltilmekte iken filtre malzemesi danecikleri de henüz harekete geçmediklerinden ötürü filtre yatağı boyunca meydana gelen basınç düşüşü Darcy Kanunu'na uyar. Minimum akışkanlaşma hızından (v_{mf}) daha yüksek hızda filtre yatağı genleşmeye başlar ve kullanılan enerjinin tamamı filtre yatağını askıda tutmak için harcandığından yük kaybı sabit kalmaya devam eder. Yatağın akışkanlaşmaya geçtiği noktadaki genişleme derecesi aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\frac{l_e}{l} = \frac{1-\varepsilon}{1-\left(\frac{v}{v_t}\right)^{0.2}} \tag{2.12}$$

Burada l: filtre yatağı derinliği, l_e: genişlemeden sonraki filtre yatağı derinliğidir. Filtre yatağının % 10 genişleyebilmesi için gerekli minimum geri yıkama hızları Tablo 2.2'de verilmiştir. Akışkanlaşma hızı hem suyun yoğunluğu hem de viskozitesinin bir fonksiyonudur. Dolayısıyla bu hız sıcaklıkla değişir. Örneğin 5 °C'deki aynı yatak genleşmesini 15 °C'de elde edebilmek için geri yıkama hızının % 50 civarında artırılması gerekmektedir [Parsons and Jefferson, 2006].



Şekil 2.12. Geri yıkamanın kesit olarak gösterimi [Hudson, 1981].

2.4.5. Filtre Malzemeleri

Filtrasyonda en yaygın olarak kullanılan filtre malzemeleri kum, öğütülmüş antrasit ve garnettir (Tablo 2.3). Genel olarak filtre yatağı tek bir malzemeden

oluşturulur ancak geri yıkama sonrası iri olanların filtre tabanında, daha küçük boyuttakilerin ise filtre yatağının üst kısmında olacak şekilde daneciklerin dizilimi sebebiyle farklı filtre malzemeleri de bir arada kullanılabilir. Çünkü yukarıda bahsedilen danecik dizili filtrenin üst kısımlarında yük kaybına sebep olur; etkin filtrasyonu engeller ve filtrasyon süresini kısaltır. Farklı filtre malzemesi kullanılarak (üst kısımda iri daneli ve düşük yoğunluklu, daha alt kısımlarda daha ince daneli ve daha yüksek yoğunluklu) iki ya da daha fazla tabakalı filtre yatağı meydana getirilerek arzu edilen dane dizilimine erişilebilir.

Filtre yatağında farklı boyuttaki malzemeler kullanılırken L/d_e oranı kuralı uygulanır. L: yatak derinliği ve d_e filtre malzemesinin efektif çapı olmak üzere bu oran tek ve iki tabakalı filtreler için 1,000 civarında ve üç tabakalı ile tek tabakalı-iri taneli yataklar için 1,250 civarında sabit tutulur. Üçten fazla tabak içeren filtrelerde bu oran her bir tabakanın oranlarının toplamıdır [Parsons and Jefferson, 2006].

Filtrelerde kullanılan malzemeler uniformluk katsayısı (uniformity coefficient) ve etkin boyut (effective size) parametreleri ile tanımlanırlar ve elek analizi ile belirlenirler. Etkin boyut, malzemenin % 10'unun geçtiği eleğin gözenek çapını ifade ederken, uniformluk katsayısı da filtre malzemesinin % 60'ının geçtiği elek boyutunun, % 10'unun geçtiği elek boyutuna oranı olarak tanımlanır. Çoğu hızlı kum filtrelerinde etkin boyut 0.35-0.50 mm olan kum kullanılırken, uniformluk katsayısı da genellikle 1.2-1.6 arasındadır [AWWA, 1990; Reynolds and Richards, 1996].

Çakıl kum yatağı destek sağlamak amacıyla kullanılır. Bu tabaka birkaç tabakadan oluşur. Toplam çakıl derinliği 15-60 cm arasında değişmekle birlikte, en çok kullanılan derinlik 45 cm'dir. Kum tabakası üstünde yer alan çakılın boyutu, kumun boyutuna bağlıdır. Çakılın alt drenaj sistemi üzerindeki çakılın boyutu drenaj sisteminin boyutuna göre değişir. Genel olarak beş tabaka kullanılır. Filtrenin en üstünde 0.16 cm'den küçük çakıllar, en altta 2.5-5 cm boyutlu çakıllar yer alır [Keskinler ve diğ., 1994].

Tablo 2.3. Filtrasyonda kullanılan çeşitli filtre malzemelerinin özellikleri [Cleasby and Logsdon, 1999].

Tipi	Filtre yatağındaki yeri	Filtre ortamı	Derinlik (m)	Özgül ağırlık (g/cm^3)	Boyut (mm)
Tek tabakalı	Tamamı	Kum	0.6-1.0	2.6	0.5-1.0
İki tabakalı	Üst	Antrasit	0.3-0.4	1.5	1.2-2.5
	Alt	Kum	0.3-0.6	2.6	0.5-1.0
Üç ve daha fazla tabakalı	Üst	Antrasit	0.4-0.5	1.5	1.2-2.5
	Orta	Kum	0.3-0.4	2.6	0.5-1.0
	Alt	Garnet	0.1-0.2	4.2	0.2-0.3
Tek tabakalı (kaba)	Tamamı	Kum	1-3	2.6	1-2

3. FİLTRE HIZI KONTROL YÖNTEMLERİ ve AZALAN DEBİLİ FİLTRASYON

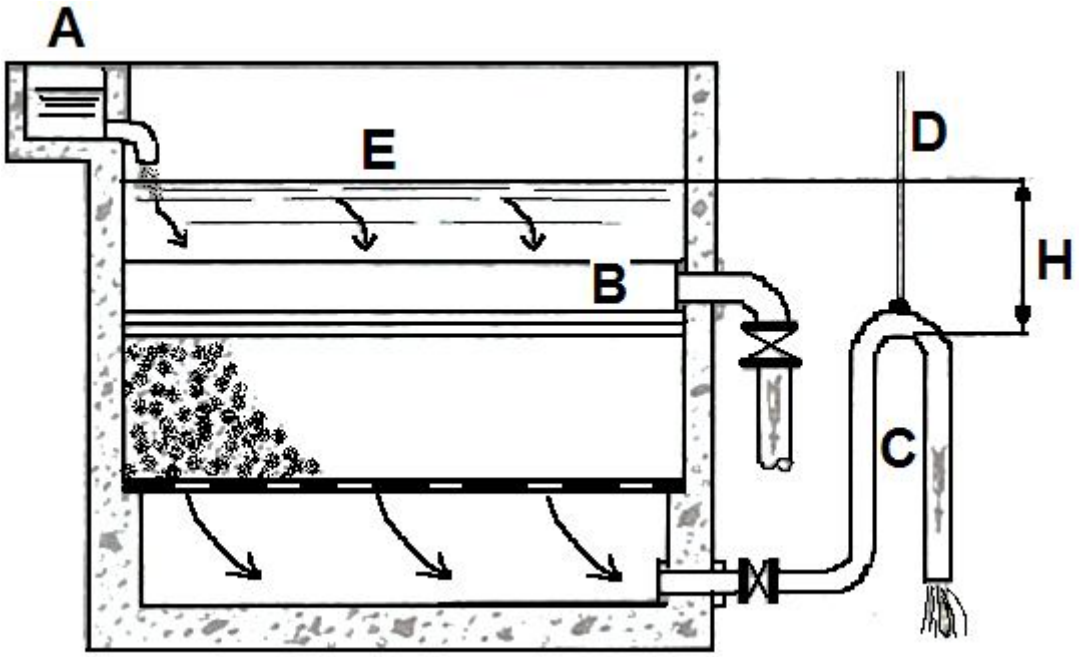
3.1. Filtrelerin İşletilmesi

Hızlı filtreler genellikle sabit debi ile çalıştırılır. Bu sabit debi elle ya da otomatik olarak sağlanır. Normal olarak, her bir filtre havuzu çıkışında bir otomatik debi kontrol vanası bulunur ve havuzlardaki kum üstündeki su seviyesi de sabit tutulur. Bazı batık filtrelerde sabit giriş debisi otomatik olarak kontrol edilir ve dolayısıyla da filtre kirlendikçe üzerindeki su seviyesi yükselir. Bazen büyük tesislerde filtre üniteleri çıkışlarını birleştiren ana çıkış borusu veya birkaç filtreyi birleştiren grup ana çıkış boruları üzerine, debiyi ayarlayan ayrıca birer ana debi kontrolörü de konularak filtre suyun toplandığı deponun taşmaması sağlanır. Filtrelerin otomatik kontrolünü aşağıdaki şekillerde bölümlemek mümkündür.

3.1.1. Su seviyesine göre filtrelerin işletilmesi

3.1.1.1. Değişken seviyeli filtreler

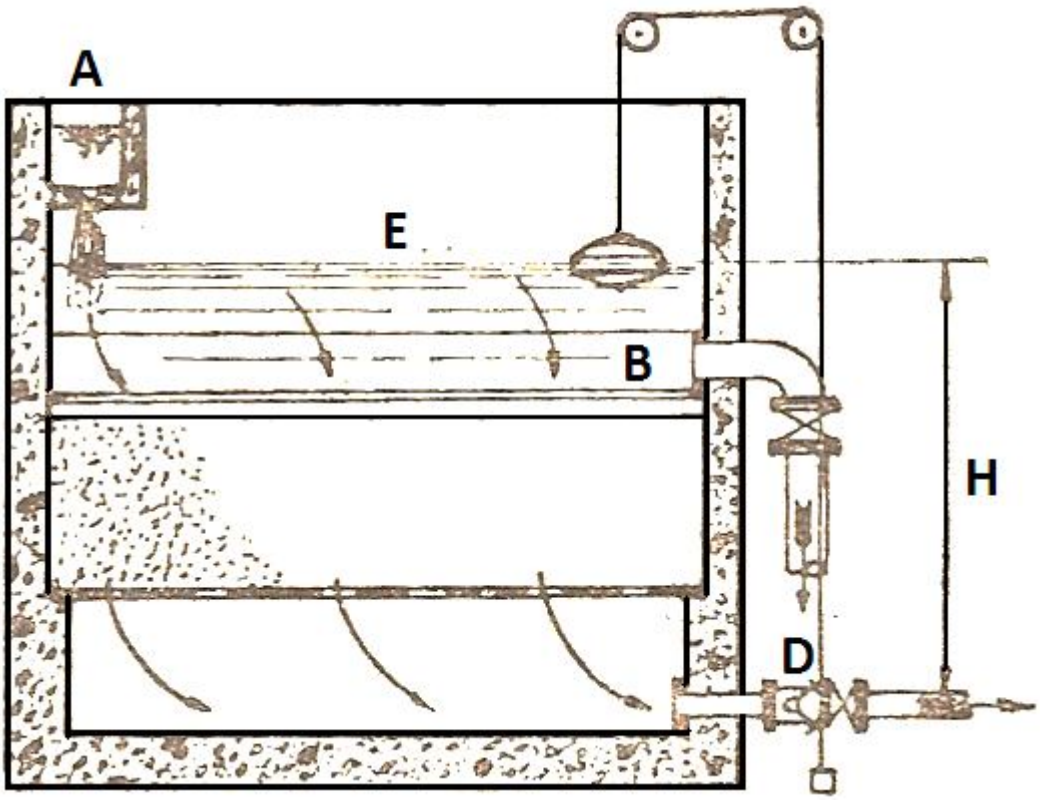
Bu filtrelerde çıkış suyu (filtrat) debisi, giriş suyu (ham su) debisine eşittir. Kum üzerindeki su seviyesi, filtrenin kirlilik derecesine göre değişir. kumun kuru kalmaması için, filtre çıkışının kum seviyesinden daha yukarıda inşa edilmesi gerekir. Şekil 3.1'de bu bir sifon (C) ile sağlanmaktadır. Kapalı filtrelerde genellikle bu şekil kullanılır. (A) ham su dağıtma kanalını, (B) yıkama suyu çıkış oluğunu göstermektedir. (C) sifonu (filtrat çıkış hattı) üzerindeki (D) borusu sifonun hava almasına yarar. Filtre servisten çıkarıldığı veya giren su çıkan suya kıyasla çok azalıp da filtredeki (E) su seviyesi çok düştüğü zaman, (D)'den giren hava sifondaki vakumu kırarak sifon akışını durdurur ve böylece su seviyesinin kum seviyesinden daha aşağı inmemesini ve dolayısıyla kumun kuruda kalmamasını sağlar. (H) filtrenin harcayabileceği maksimum yük kaybını gösterir.



Şekil 3.1. Değişken seviyeli filtre [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

3.1.1.2. Sabit seviyeli filtreler

Şekil 3.2, 3.3 ve 3.4'de görüldüğü gibi, bu filtrelerde (E) su seviyesi sabit kalır. Filtrat kumdan aşağıda bir kottan dışarı alınır. Çıkış suyu debisi, giriş suyu debisinden fazla olduğu zaman filtrenin kuru kalmaması veya tam tersi bir debi eşitsizliğinde su seviyesinin aşırı artmaması için, çıkış hattı üzerine, filtredeki su seviyesine göre debiyi kontrol eden flatörlü bir kelebek vana konulmuştur. Böylece giren suyun debisi çıkan suyun debisine her zaman eşittir. Şekil 3.2'de (D) filtre çıkış debisini kontrol eden kelebek valfı, (H) da sabit tutulan su derinliğini ve negatif basınca girmeden kullanılabilecek maksimum yük kaybını göstermektedir.



Şekil 3.2. Sabit seviyeli filtre [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

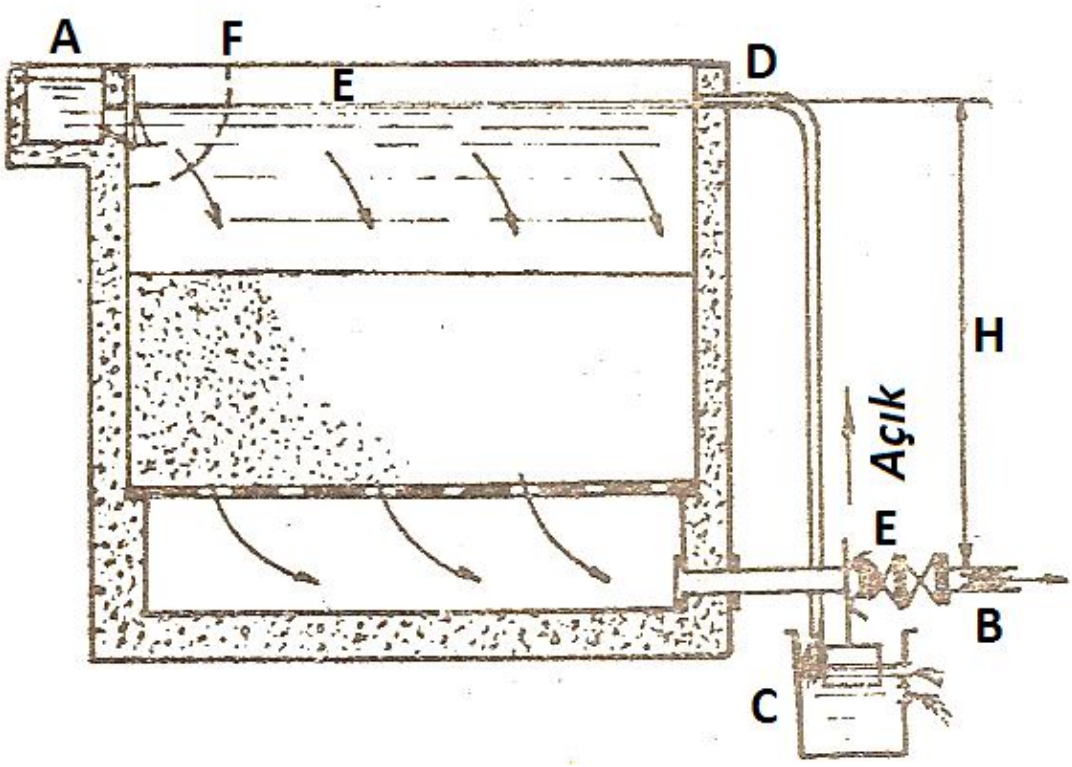
3.1.2. Su debisine göre filtrelerin işletilmesi

3.1.2.1. Kontrol cihazları kullanarak debiye göre işletme (Mekanik kontrol sistemleri)

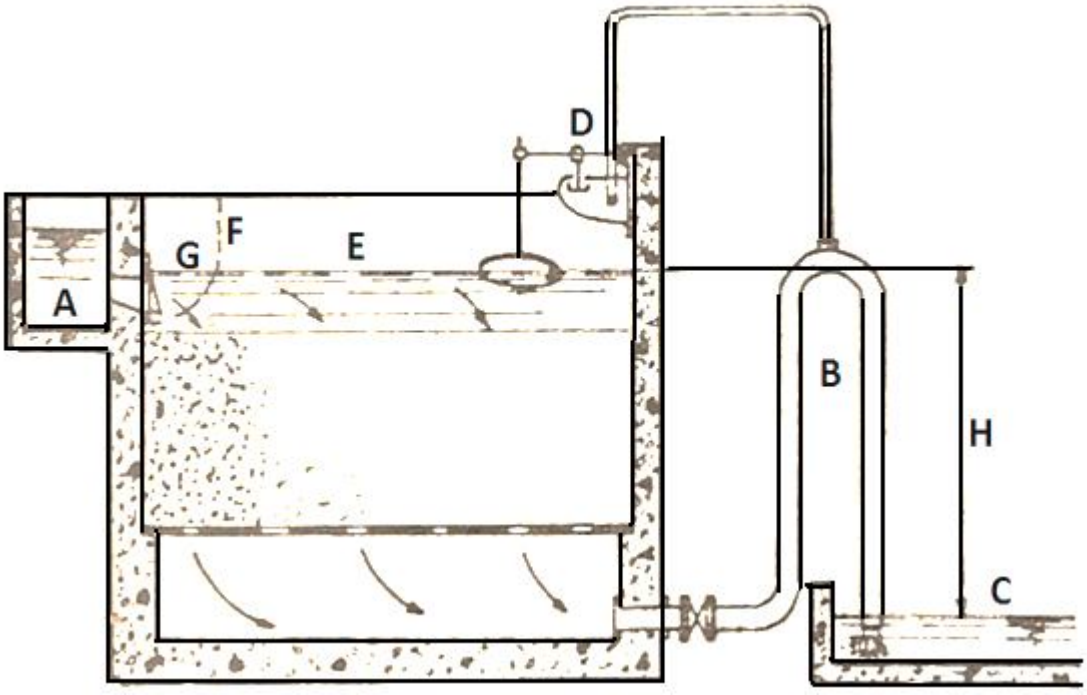
3.1.2.1.1. Giriş debisinin kontrolü

Giriş suyu debisinin esas alınıp filtreden geçen suyun ona göre ayarlanması esasına dayanmaktadır. Sabit seviyeli filtrelerde olduğu gibi, çıkan suyun debisi giren suyun debisine eşit tutulur. Sabit seviyeli filtrelerde olduğu gibi çıkan suyun debisi giren suyun debisine eşit tutulur, yani ne girerse onun filtreden geçmesinin temini esastır. Bu tip kontrol sistemleri Şekil 3.3 ve 3.4'de gösterilmiştir. (A)'da filtre havuzlarına eşit dağılım sağlayacak kalibre bir orifis vardır. Çıkış miktarı giriş miktarını geçmeye başlayınca filtredeki (E) seviyesi düşmeye ve (D) orifisinden akan su azalmaya başlar. (C) tankındaki seviye düşer dolayısıyla da (E) valfı kapanır.

Aynı sistemin kelebek valf yarine sifon kullanılanı da Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Buradaki sifon, bir çeşit vanadır. Buradan geçen su miktarı, sifonun boyun noktasına az veya çok hava girmesine müsaade etmekle, yani akış kesitini hava ile daraltmak suretiyle kontrol edilmektedir. (E) su seviyesi alçalınca flatör de alçalmakta ve (D) sifon kontrol (hava) valfı açılarak (B) sifonu boynuna hava gitmektedir. (D) valfı sayesinde (E) su seviyesi sabit kalmakta, dolayısıyla giriş suyuna eşit olacak şekilde filtreden çıkış suyu da ayarlanmaktadır. (A) ham su girişini, (F) enerji kırıcıyı, (G) giriş klapesini, (H) kullanılabilecek yük kaybını, (C) de filtreli su çıkışını göstermektedir. Filtre yıkanırken kabaran su dolayısıyla (G) klapesi kendi kendine kapanarak pis suyun ham su kanalına girmesi önlenmiş olur.



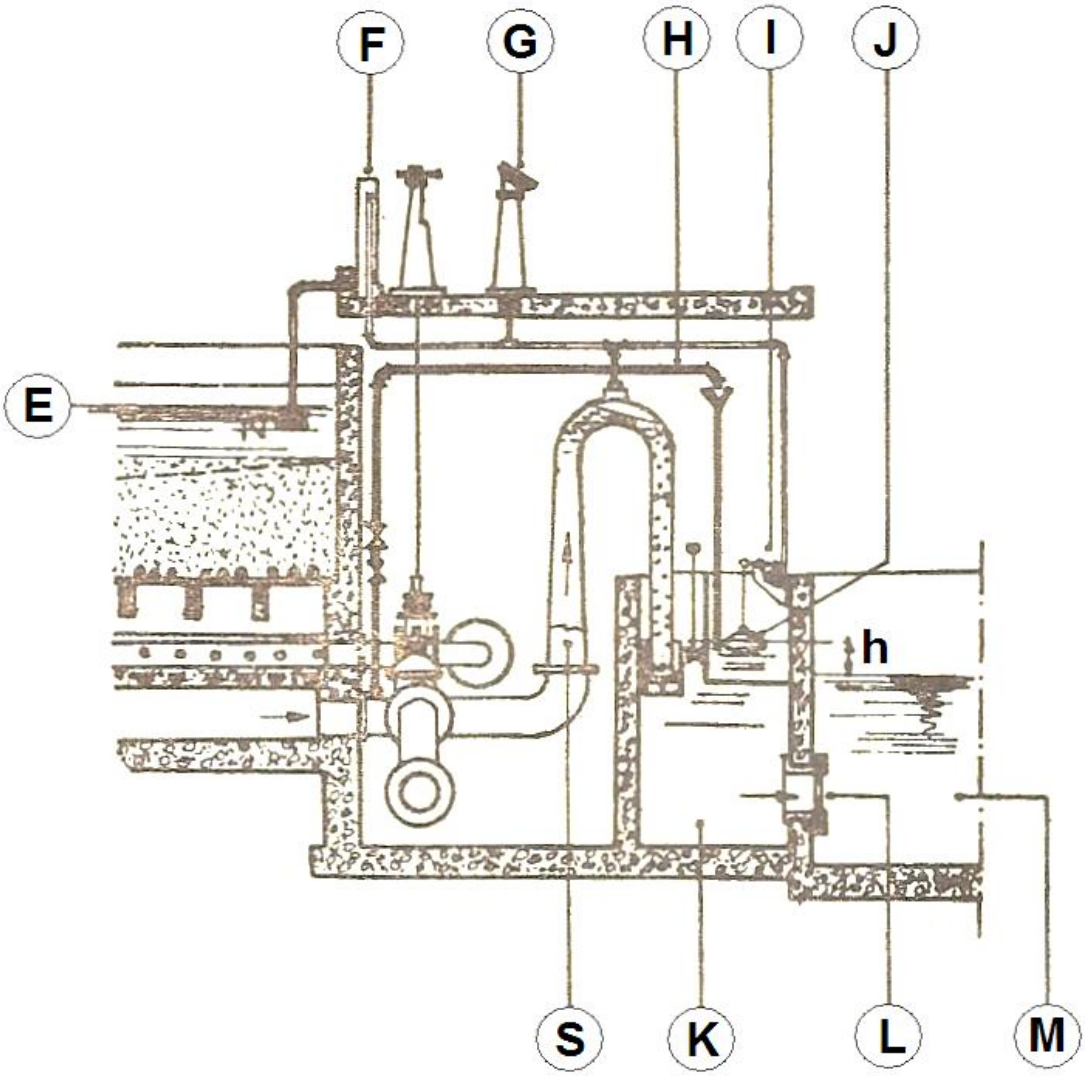
Şekil 3.3. Giriş suyu debisine göre çıkışı ayarlayan kontrol sistemi [Gölhan ve Aksoğan, 1970].



Şekil 3.4. Giriş debisine göre kontrolün sifon ile sağlanması [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

3.1.2.1.2. Çıkış debisinin kontrolü

Çıkış suyu debisinin esas alınıp filtreden geçen suyun ona göre ayarlanması esasına dayanmaktadır. Bu sistemde akış, filtrat ihtiyacına göre kontrol edilmekte, dolayısıyla filtrat ana kanalındaki su seviyesi sabit tutulmaktadır. Bu sebeple, ham su girişi üzerine bir debi ayar sistemi kurulmuştur. Bu sistemin görevi filtredeki (E) su seviyesini sabit tutmaktır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Çıkış debisine göre depodaki su seviyesinin sabit tutulması [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Burada filtreden çıkan suyun miktarı (h) kot farkına tabi olmakta, (h) büyüdükçe, yani depodaki su seviyesi düştükçe, filtre daha çok su geçirmektedir. Bu da şu şekilde sağlanmaktadır: (S) sifonu üzerinden gelen filtreli su (K) tankına akar. Bu tank (L) kalibreli orifisi yardımıyla (M) ortak kanalına bağlanır. Bütün filtre havuzları birer orifisle bu (M) kanalına bağlıdır. Filtreden gelen suyun debisi (S) sifonunun tepesine, (I) valfı yardımıyla hava vererek kontrol edilir ve ayarlanır. (J) şamandırası (I) hava valfını açıp kapayarak sifon boğazındaki havayı artırıp eksiltir ve su akışını ayarlar. Böylece (K) tankındaki su seviyesini sabit tutar. Şamandıranın içinde bulunduğu küçük tank, (K) ile irtibatlıdır ve şamandıranın dalgalanmamasını

sağlar. (M) kanalı bütün filtreler için ortak olduğundan, bütün filtreler aynı (h) kot farkına göre su verirler; çünkü her filtre havuzuna ait (K)'daki seviye de aynıdır. Bu sayede filtreler daima aynı debiyi vermektedirler ve bu debi, su seviyesi ile (M) kanalındaki su seviyesi aynı olduğundan (Şekil 3.13) depodan çekilen suya bağlıdır. Filtre servisten çıktığı zaman sifonun aşağı inen ayağı, filtre üstündeki su seviyesi belirli bir sınırdan aşağı düşüp de (N) ucundan (F) yoluyla sifon boynuna giren havanın etkisiyle boşalır. Bundan sonra filtre daha çok boşalmaz ve böylece kumun kazara susuz kalması da önlenmiş olur. (G) vakummetresi sifon boğazındaki vakumu gösterir. Bu vakum, filtre temiz iken az, kirli iken çoktur; bu sebeple filtre tıkanıklığını gösteren bu sistem basit ve emniyetlidir. Yıkamalar ve sair sebeplerle filtrenin durdurulduktan sonra yeniden servise konulması yavaş yavaş olmalı yani, filtreden birden bire normal debi çekilmemelidir. Bu husus da (H), (I) ve (J) düzenleri sayesinde emniyetle yerine getirilir. Yıkama sırasında (H) borusu içinden basınçlı yıkama suyu gelerek (I) şamandırasının bulunduğu küçük tankı doldurur ve (I) hava valfını açar. Yıkama bitip de filtre işletmeye geçince, tepe noktası filtredeki su seviyesinden daha yukarıda olduğu için ve filtre yük kaybı sebebiyle (H) borusundan artık tanka su gelemez. Dolayısıyla tank yavaş yavaş boşalarak normal seviyeye gelir ve o anda da (I) valfını kapatır; havanın girmesini keser ve böylece, sifon boğazındaki hava yavaş yavaş azaldığından, filtre de normal debisine yavaşça geçmiş olur [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

3.1.2.1.3. Sabit debi kontrolü

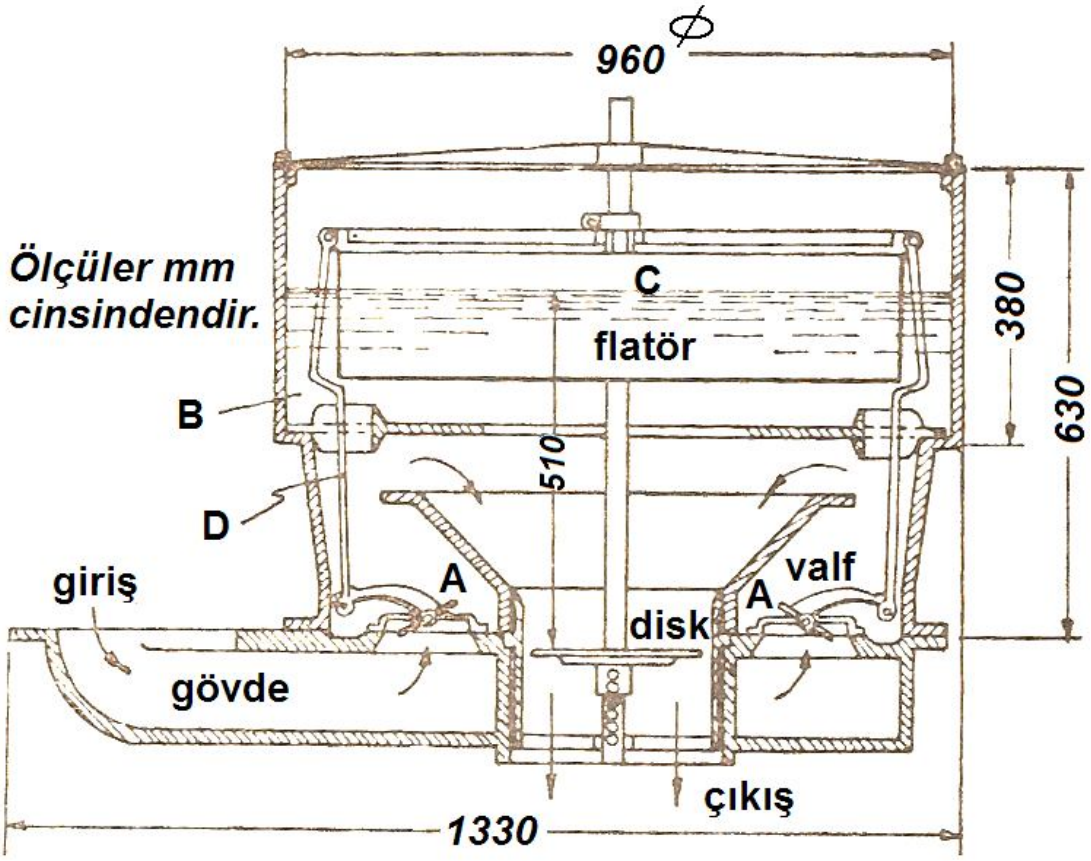
Sabit debi/hız terimi, filtredeki sıvı akış hızının değişkenlik göstermediği, proses süresince sabit kaldığı durumu tanımlamak için kullanılır. Filtrasyon hızı, filtre çıkışına yerleştirilen bir kontrol vanası ile kontrol edilir. Sabit debili filtrasyondaki her bir kontrol vanası, filtreden geçen sıvı miktarını düzenlemek için otomatik olarak işletilir. Filtrasyon başlangıcında filtre yatağı temizdir ve çıkış vanası, yük kaybı sağlamak için hemen hemen kapalıdır. Böylece istenen filtrasyon hızı ayarlanır. Filtre yatağı kirlenip tıkanmaya başlayınca, filtrede tutulan partiküllerin meydana getirdiği yük kaybıyla orantılı olarak çıkış vanası da açılır. Böylece filtre hızı hep sabit tutulmuş olur. Vananın ayarlanması filtrasyon hızına bağlı olarak yapıldığından filtre üzerinde bir debimetre bulunmalıdır. İdeal bir sabit

debili filtrede filtrasyon hızı, filtrasyon süresince hiç değişmez. Filtrede sabit hız elde etmek amacıyla filtrat miktarını ayarlamak gerekebilir. Bunun için de yeni filtreler işletmeye alınabilir ya da çalışan filtrelerden bazıları durdurulabilir. Aynı şekilde, bir filtre geri yıkamaya alındığında, işletmedeki diğer filtrelerin su yükünü dengeleyebilmek için yedek bir diğer filtre işletmeye alınabilir. Böylece, filtre başına sağlanması gereken debi aynen muhafaza edilmiş olur. Fakat gerçekte filtre geri yıkaması sırasında devreye alınacak yedek filtreler, inşaat maliyeti nedeniyle genellikle tercih edilmezler. Bu yüzden geri yıkama süresince filtrasyon hızında dalgalanmalar meydana gelir, filtre geri yıkamaya alındığında hız artar, temiz filtre işletmeye alındığında tekrar düşer. Genellikle, filtrat üretim hızı gün boyunca değiştiğinden, filtrelerdeki hız da değişmektedir. Bu durum, filtrelerin doğru bir şekilde sabit debili olarak çalışmasını olumsuz etkilemektedir.

Filtre hızı, günlük filtre edilmiş su ihtiyacına göre ayarlanmak isteniyorsa, filtre giriş debisi (ham su miktarı) ve filtre çıkış debisi arasında bir geri besleme döngüsü kurulmalıdır. Böylelikle, filtrenin işletmeden alınması ve tekrar devreye sokulması gibi durumlarda, sabit filtre hızını muhafaza edebilmek için manüel olarak akış ayarı yapılabilir. Ancak bu ayarlama tamamen filtre operatörünün kontrolünde olduğu için filtre işleyişinde aksaklıklar meydana gelmesi muhtemeldir. Bu nedenle sabit hızlı filtrelerin çoğu "sabit su seviyeli filtreler" olarak tasarlanırlar. Bu filtrelerde, debi kontrol vanasının pozisyonu, filtre yatağı üzerindeki ya da filtre giriş kanalı içindeki su seviyesinin izlenmesiyle kontrol edilir. Filtre tıkandığında, oluşan yük kaybını telâfi için filtredeki su seviyesi yükseldiğinden, su seviyesini azaltmak (sabit haline getirmek) için kontrol vanası açılır. Filtrat miktarı değişmedikçe, filtre hızı da sabit kalacaktır. Filtrat miktarı değiştiğinde ya da filtre geri yıkamaya alındığında, su seviyesinin dengelenebilmesi için filtre hızı da değişecektir. Sabit su seviyeli filtreler genellikle giriş akımının filtrelere eşit dağıtılabildiği savak gibi bir giriş yapısıyla beraber inşa edilirler. Bu işletme şekli tam olarak sabit hızlı filtrasyon olmasa da, hidrolik kontrol yöntemi açısından sabit debili filtrasyon sınıfında incelenebilir [Cornwell et al., 1991].

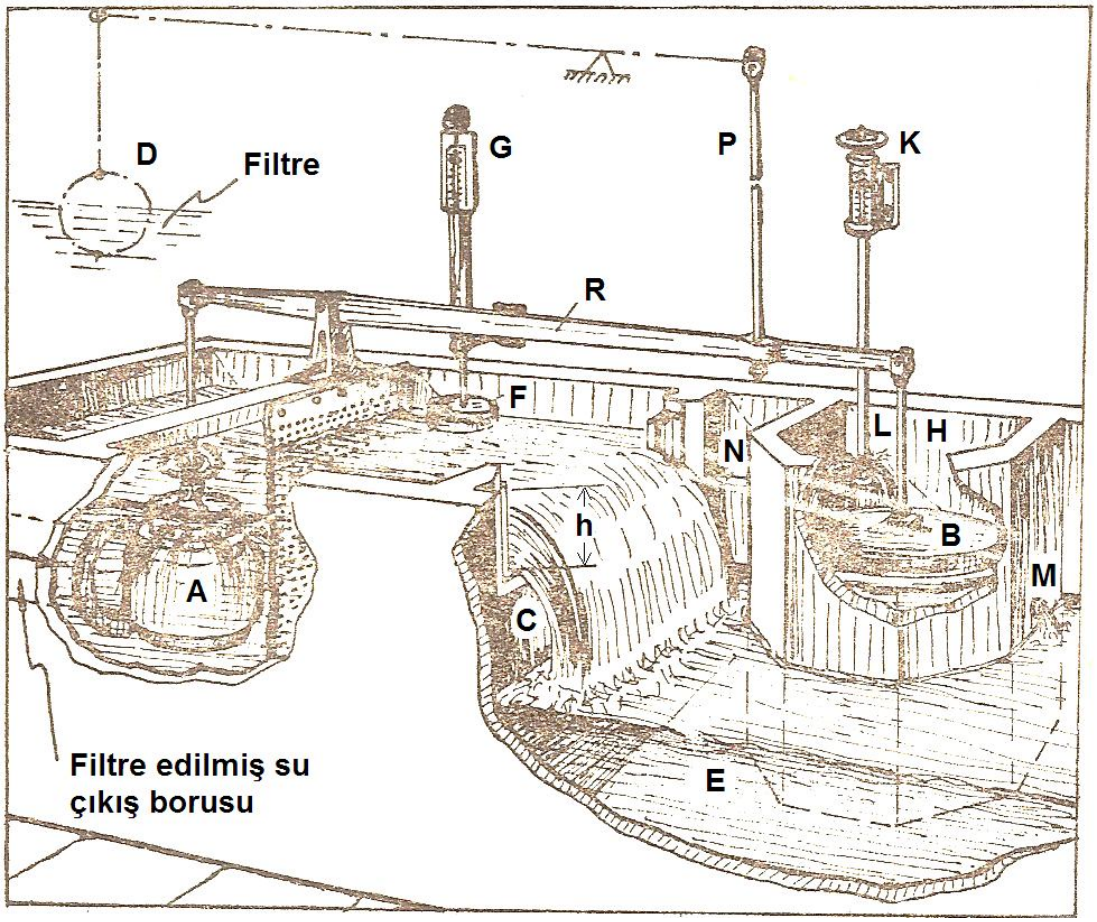
Filtrelerin sabit debi altında çalışmalarını sağlamak üzere açık tip ve kapalı tip olmak üzere iki çeşit kontrolör kullanılmaktadır. Açık tip kontrol sisteminde şamandıra ve vana tertibatı yardımıyla filtreden çekilen debiyi kısarak ya da artırarak

filtre üstündeki su seviyesinin belirli bir kottan aşağı düşmemesini sağlar. Bu sistemler genellikle yavaş kum filtrelerinde kullanılır. Bunlardan iki tanesi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Açık tip, flatörlü bir debi kontrolörü [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Şekil 3.6'ya göre, filtre temizken gelen fazla su (A) valflarından geçerek (B) odacığında yükselmekte ve böylece (C) flatörünü yukarı kaldırmaktadır. (C) flatörü de (D) kolları yardımıyla (A) valfını yavaş yavaş kapayarak geçiş debisini sabit tutmaktadır.



Şekil 3.7. Hızlı filtrelerde uygulanan açık tip, çifte şamandıralı sabit debi kontrol sistemi [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Şekil 3.7'de hızlı filtrelerde kullanılan açık tip sabit debi ayar sistemi verilmiştir. Filtreden gelen su çift yataklı valfla dengelenmiştir. Şekil 3.8'dekine benzeyen, bir (A) vanasından geçerek çıkış rögarına boşalır. Bu (A) valfı, (C) savağının solundaki (B) şamandırası vasıtasıyla kontrol edilmektedir. Filtredeki su seviyesinin fazla düşmesi halinde valfi kontrol eden ikinci bir şamandıra daha vardır. Bu, filtre üzerinde olup, şekilde (D) ile gösterilmiştir. Çıkış rögarındaki (C) savağı, filtreden çıkıp (E) kanalına dökülen suyun debisini ölçmeye yarar. Bu debi, savak üstündeki (h) su kalınlığına bağlı olduğundan (F) küçük şamandırası yardımıyla (G) göstergesi üzerinden okunur. (H) küçük odacığı içindeki (B) şamandırası da (C) savağı üzerindeki su yüksekliğine bağlı olarak yükselip alçalmaktadır. Dolayısıyla (A) vanasının istenilen bir debiye ayarlanması lazımdır. Bu iş, (K) volanı yardımıyla (L) valfını kısarak yapılır. Savaktan (N) borusu ile (H)'a gelen su (L) valfı sayesinde istenildiği gibi ayarlanır. (H) odacığında biriken bu su (M) orifisinden (E) kanalına

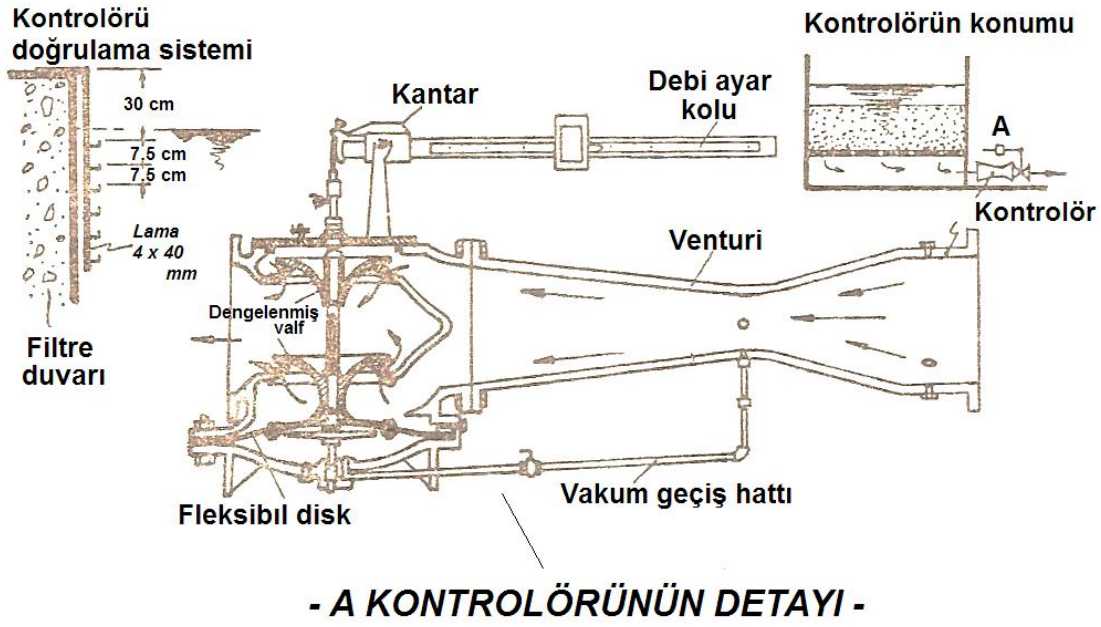
boşalır. Ancak (L) valfından gelen suyun daha küçük bir delikten ibaret olan (M) orifisinden çıkıp gidebilmesi için (H) odacığı içinde belirli bir seviyeye yükselmesi gerekmektedir ve böylece (B) şamandırası belli bir seviyeye çıkıp inerek (A) valfının hareketini ve dolayısıyla sabit debi geçişini sağlamaktadır. Şöyle ki, (C) savağı üstündeki (h) su kalınlığı, filtrenin gittikçe kirlenmesinden dolayı düştükçe (H)'a daha az su gitmekte ve haliyle (H)'daki su seviyesi de düşmekte, böylece de (B) şamandırasının aşağı çekme etkisi sonunda (A) valfı biraz daha açılarak fazla su geçmesi sağlanmaktadır. (h) su kalınlığı gittikçe arttığı zaman, (B) şamandırası yükselerek (A) vanasını kısmakta ve böylece filtreden daima belli, sabit bir debi geçmesi sağlanmaktadır. Filtredeki su seviyesi normal kaldığı sürece, yukarıda anlatıldığı gibi, çıkış debisi de sabit kalmaktadır. Filtredeki su seviyesi, giriş valfının kısılması veya filtreden çekilen suyun giren sudan çok olması gibi sebeplerle, belli bir seviyeden aşağı düşerse, filtre içindeki (D) şamandırası da aşağı doğru düşerek (P) kolu vasıtasıyla (R) kolunu yukarı doğru çekip, (A) vanasını kısar ve böylece filtreden çekilen debiyi kısarak filtre üstündeki su seviyesinin belirli bir kottan aşağı düşmemesini sağlar.

Bu çifte şamandıralı sabit debi kontrol sistemi ile şu avantajlar elde edilmektedir:

1- Filtre debisi, ayarlanan belli bir debiyi geçemez.
2- Eğer ayarlanan filtre çıkış debisi filtreye giren sudan fazla ise, bu yanlış ayarı giriş debisine göre kendi kendine düzenler.
3- Filtre üzerinde oldukça sabit bir su seviyesi tutar. Bu seviyenin, bitişikteki çökeltme havuzundan gelen su hızının fazla artmaması ve böylece yumakların parçalanmaması için, çökeltme havuzundaki seviyeden ancak birazcık aşağıda tutması lazımdır.
4- Filtre kum yatağının kuruda kalmasını ve böylece içine hava girmesini önler.

Hızlı kum filtrelerinde ise genellikle kapalı (batık) tip kontrol sistemine yer verilir. Bunlar, venturide doğan alçak basınçtan faydalanarak çalışırlar. Filtredeki, kullanılabilecek maksimum basınç daima filtredeki yük kaybı ile venturi ve vanadaki

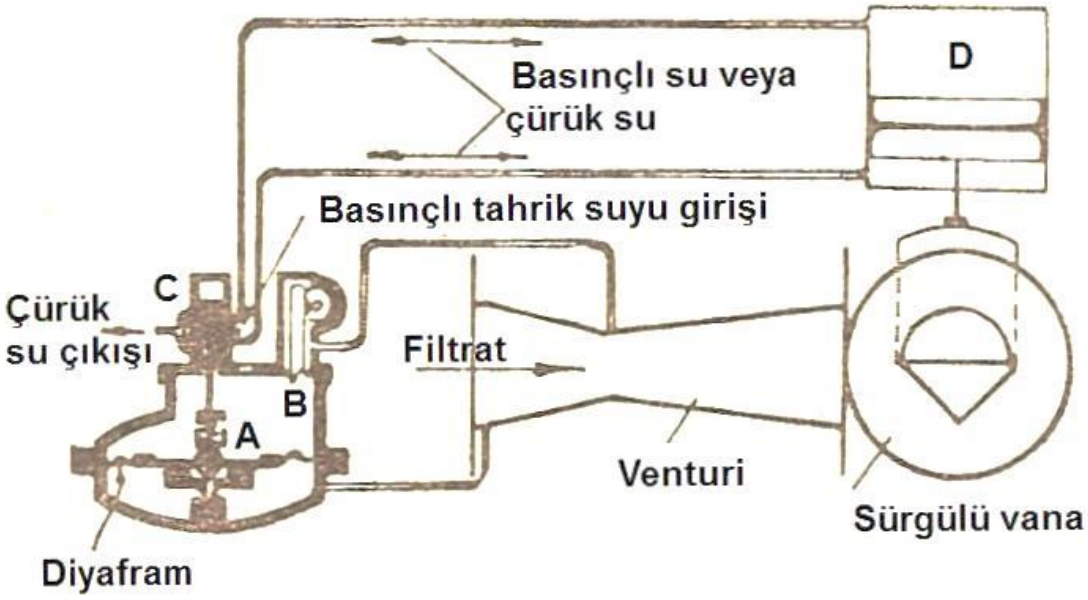
yük kaybı ve vanadan çıkan suyun basıncının toplamına eşittir. Örnek olarak Şekil 3.8 ve 3.9'da iki tip batık kontrolör verilmiştir.



Şekil 3.8. Kapalı veya batık tipten simplex debi kontrolörü [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Şekil 3.8'deki akış yönü, okla gösterildiği gibi sağdan sola doğrudur. Venturi tüpünden geçen debi artarsa, venturi boğazındaki basınç daha azalacağından, dengelenmiş valfın altında bulunan fleksibıl diskin üstünde ve altındaki basıncın farkı da artar. Fleksibıl diskin üzerine gelecek nispeten yüksek basınç dengelenmiş valfı aşağıya doğru iter ve su akışını kısıtlar. Böylece kontrolörden geçen suyun miktarı fleksibıl diskin pozisyonu ile kontrol edilmiş olur. Dengelenmiş valfın denge durumu, kontrolör üstündeki kantar kolu üzerinde kayan bir kontrpua vasıtasıyla ayarlanır. Valfın durumu bir defa kontrpua ile ayarlandıktan sonra artık valfın açılıp kapanması, fleksibıl disk üzerindeki basınç farkı ile kendi kendine ayarlanarak daima sabit bir debi geçmesi sağlanır. Kontrolörün doğruluk derecesini anlamak için filtre su ile doldurulur, çıkış vanası hariç diğer bütün vanalar kapatılır ve filtredeki alçalıştan veya kontrolör çıkışından debi ölçülerek hassasiyet tayin edilir. Kontrolörün tayin edildiği debi ile gerçek debi arasındaki fark hassasiyet derecesi hakkında bir fikir verir. Bu maksatla Şekil 3.8'de gösterilen üzerinde parmaklar olan ve filtre duvarına asılan dereceli lama demirinden de faydalanılır. İki derece arasına

düşen hacim filtre operatörünce bilindiğinden, bunun boşalması için geçen zamanı ölçerek debiyi kolayca hesaplayabilir.



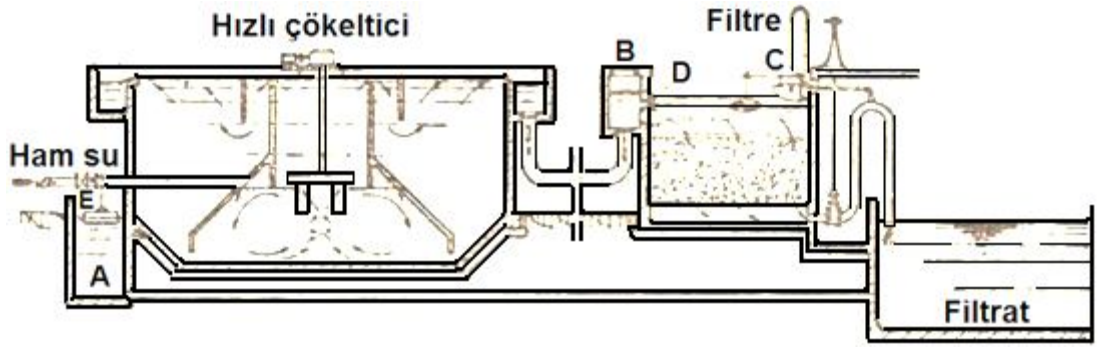
Şekil 3.9. Kapalı tip filtre debisi kontrolörü [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Şekil 3.9'daki kontrolör de venturi veya orifisli bir vana sisteminden ibarettir ve istenilen, sabit bir debiyi geçirmeye yarar. (A) diyaframı venturi veya orifisin doğurduğu farklı basınç altında hareket eder. Bu diyafram kalibreli bir orifis içerir. (B) orifisi, venturi boğazında meydana gelen basıncı ayarlayarak diyaframın üstüne intikal ettirilir ve böylece (C) distribütörü hareket ettirilir. Orifisin ayarı elle yapılır. (C) distribütörü, pistonlu (D) silindiri yardımı ile sürgülü ayar vanasına kumanda etmekte yani sağdan giren basınçlı tahrik suyunu (D)'nin üstüne veya altına vererek, ayar vanasını açmakta veya kapamakta, böylece debiyi sabit tutmaktadır. Kontrolör filtrenin çıkışına veya girişine yerleştirilebilir ve bu sayede filtre hep aynı debiyi geçirir [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

3.1.2.1.4. Eşit dağılım

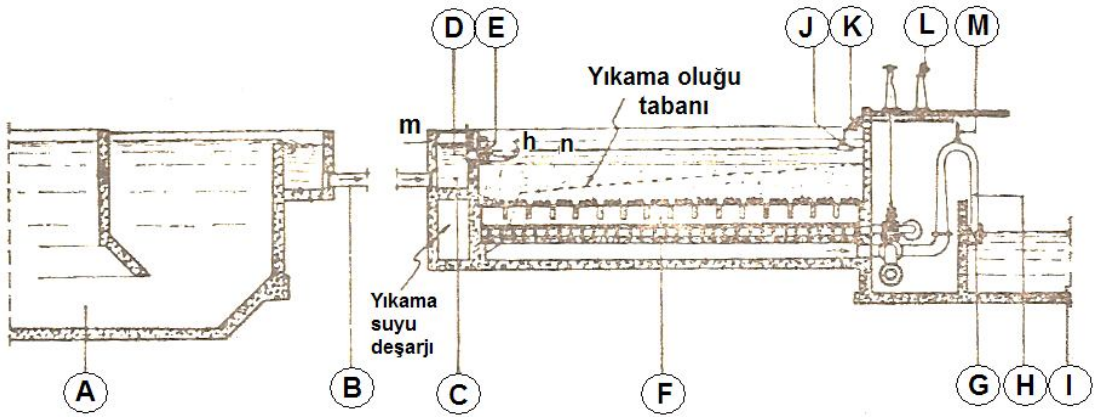
Bu proseste, bir giriş savağı yardımıyla tesis debisi her bir filtre havuzuna/tankına eşit şekilde paylaştırılır. Bu sistemde filtrasyon boyunca filtre su seviyesi artar, bu da filtredeki yük kaybını gösterir [Cornwell et al., 1991].

Eğer çok sayıda filtre havuzu, batarya olarak, paralel halde çalışıyorsa ve toplam debi de zaman zaman değişiyorsa, bu değişikliğin filtre gözlerine aynı oran dahilinde intikal ettirilmesi gerekir. Yani her filtrenin debisi eşit olmalı ve bunların toplamı da tesisin genel debisine eşit olmalıdır (Şekil 3.10—3.13). Bu, her filtreye eşit su dağılımı, basit bir hidrolik düzenek ile sağlanmaktadır. Filtre bataryasının girişine (girişte kontrol) veya çıkışına (çıkışta kontrol) flatörlü bir vana konularak arzu edilen debi eşitliği sağlanabilir.



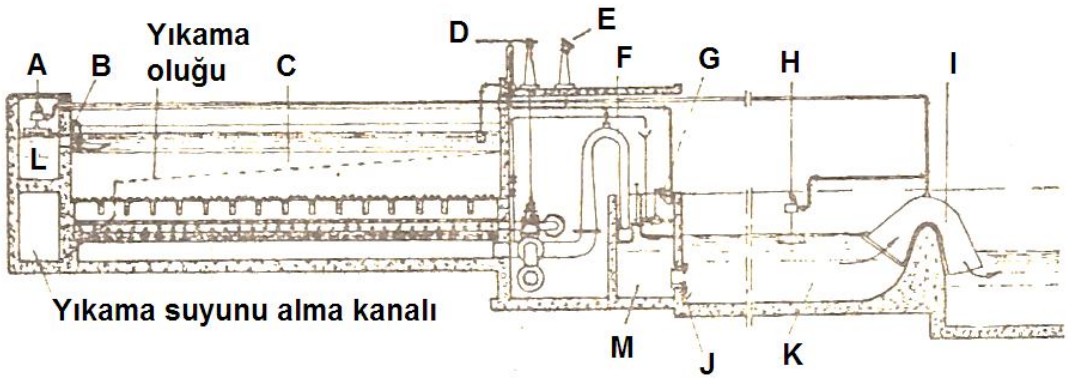
Şekil 3.10. Değişen su ihtiyacına göre filtre takımına giren ham suyu girişte kontrol eden (E) flatörlü vana sistemi [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Şekil 3.10'daki sistemde, şehirde çekilen su arttıkça filtrat deposundaki seviye düşmekte ve bu düşüş aynen (A) tankına yansıyarak (E) flatörlü kelebek vanayı açıp filtre takımına daha çok ham su girmesini sağlar. Duru su, bütün filtre havuzları için ortak olan (B) kanalına girer. (C) valfı yardımıyla bütün filtrelerdeki seviye eşit tutulur. Böylece (D) orifisinin iki tarafındaki su seviyesi farkı, yani kullanılabilecek basınç herbir filtrede aynı olduğundan bunlara giden sular da eşit miktarda olur. Genel debinin değişmesi ile sadece (B) kanalındaki su yüzey kotu değişmektedir.



Şekil 3.11. Ham su girişine göre eşit dağılımı sağlayan sistem [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

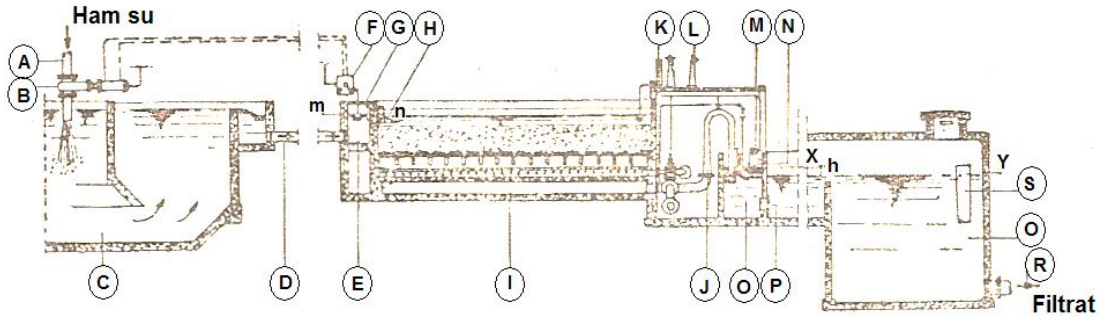
Şekil 3.11'deki sistemde giriş suyu ayarı, basit bir vana ile yapılabileceğinden veya suyu ileten pompaların debisine bağlı olduğundan, burada gösterilmemiştir. (C) ortak kanalındaki (m) su yüzü kotu ile filtredeki (n) su yüzü kotu farkı olan (h) kullanılabilecek yük kaybı, her filtre için aynı olduğu ve her filtredeki (D) kalibreli orifisi de eşit bulunduğundan filtrelere debi dağılımı eşittir. (I) çıkış kanalı da filtreler için ortak kanaldır.



Şekil 3.12. Ham su debisine uygun olarak filtrelere eşit debi dağıtımı [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Şekil 3.12.'deki sistemde duru su, filtreler için ortak olan bir kanala alınmaktadır ve buraya (I) ana sifonunu kontrol eden (A) flatörlü kontrol valfı konulmuştur. (K) ortak kanalındaki (H) sifon kontrol valfı, kanaldaki suyun belirli

bir seviyeden aşağı inerek sifonu kırmaması (durmaması) için emniyet valfı olarak konulmuştur. (I) ana sifonu (K) ortak kanalı ile depo girişini irtibatlandıran, genel debiyi taşıyacak büyük bir sifondur. (L) kanalındaki ham su seviyesi düşünce (A) hava valfı açılmakta, böylece (I) ana sifonu boğazına daha çok hava dolarak akış kesitini daraltmakta ve dolayısıyla ham su gelişine göre çıkış debisi ayarlanmaktadır. (K) kanalındaki su seviyesinin üst limiti daima (M) tankındaki seviyeden aşağıdadır. (K)'daki seviye müsaade edilen alt sınıra doğru giderken, (H) valfı (I) sifonuna hava girişini artırarak su geçişini kısmakta ve denge sağlanmaktadır. Münferit (F) sifonlarının çalışması Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Filtrat ihtiyacına göre debiyi çıkışta ayarlayan eşit dağıtım sistemi [Gölhan ve Aksoğan, 1970].

Şekil 3.13.'deki sistem Şekil 3.5'teki ile aynıdır. Ancak buraya bir de ayrıca giriş suyunun çıkış suyuna göre ayarlanabilmesi için (E) kanalındaki seviyeye göre ham suyu kontrol eden (B) ham su ayar vanası konulması gerekmektedir. Ortak olan (m) su seviyesi ile her filtrede aynı olan (n) su seviyesi arasındaki fark her filtre için aynı olduğundan bu filtrelere dağılan su miktarları da daima birbirinin aynı olmaktadır. Her filtre tankına birbirinin aynı (G) kalibreli orifisler konulmuştur. (F) seviye kontrolörü olup, (B) valfına kumanda etmektedir. (Q) süzülmüş su tankını, (S) dolu savak sistemini, (R) de filtrat deposu çıkışını göstermektedir. (x) ve (y) arasındaki (h) kot farkında bir artma olunca (m) ile (n) arasındaki farkta bir azalma olacaktır. Böylece ihtiyacı karşılamak için hem (J) münferit sifonları, hem de (B) ortak ham su vanası daha çok açılacaktır. (Q) ve (P)'deki ortak su seviyesi, (O)'daki seviyeyle bir olursa (O)'daki seviye haliyle yükselmekte ve dolayısıyla sifondan

gelen debi de sıfıra inmektedir. Tabi bu sırada (m-n) farkı da maksimum olacak ve (B) vanası kendi kendine kapanacaktır.

3.1.2.2. El ile debi kontrolü

3.1.2.2.1. Giriş debisinin kontrolü

Filtre girişindeki vana istenilen sabit debiye göre ayarlanır ve bir daha el sürülmez. Çıkış tarafındaki vana başlangıçta, gelen debiyi geçirecek şekilde gayet az açılır. Filtre kirlendikçe çıkan debi de azalmaya başlar. Buna meydan vermemek için çıkış vanası gittikçe açılır ve bu işe, vana tam açık duruma gelinceye kadar devam edilir. Vana tam açık duruma gelince filtre oldukça kirlenmiştir; bu yüzden servisten çıkarılarak yıkanır.

3.1.2.2.2. Çıkış debisinin kontrolü

Başlangıçta filtre üzerinde asgari derinlikte su var iken istenilen sabit debi geçecek şekilde giriş ve çıkış vanaları, bir defaya mahsus olmak üzere ayarlanır. Gittikçe filtre kirlenmeye başlayacağından ve vanalar da hep ilk ayarlanmış konumunda olduğundan, gittikçe kum üzerindeki su kalınlığı artacak böylece de filtreden gene başlangıçta istenen debi geçecektir. Su kalınlığı arta arta müsaade edilebilen en yüksek seviyesine gelince çıkış tarafındaki vana biraz açılır, böylece de filtre üstündeki su kotu alçalır ve bu işlem, çıkış vanası tamamen açılıncaya kadar devam eder. Çıkış vanasını başlangıçta kısarak, kum üzerinde giriş suyunun kumu dalgalandıramayacağı kalınlıkta, bir su tabakası tutulması, drenaj sistemi çıkış borusunun yukarı doğru, takriben kum üst seviyesine kadar uzatılması ile de sağlanabilir.

Büyük tesislerde el ile kumanda pek uygulanmaz. Fakat daha ziyade tesis masraflarını asgariye indirmek için küçük tesislerde ve geçici tesislerde uygulanır. Filtrasyon sonuçları otomatik kontrole nazaran daha düşüktür ve muhtemelen işletme masrafları da daha yüksektir.

3.1.2.3. Kontrol cihazları kullanmadan debiye göre işletme (Mekanik olmayan kontrol sistemleri)

Senelerden beri, kum filtrelerinde debi kontrolü, klasik bir yöntem olarak, süzülmüş su çıkışı üzerine konulan ve istenilen bir debiye ayarlanan sabit debi kontrol tertibatı sayesinde yapıla gelmiştir (Şekil 3.8 ve 3.9). Eski birçok tesislerde ve hatta bazı yeni tesislerde, bu cihazlar normal çalışmamakta yahut da sıkça bakım gerektirmektedir. Bu yüzden debi kontrollerinde farklı yöntemler ortaya konmaktadır. Bu yöntemler, debi kontrol cihazlarının kullanılmadığı sistemler adlı başlık altında toplanabilir:

3.1.2.3.1. Çıkış debisinin kontrolü

3.1.2.3.1.1. Sabit debi kontrolü

Bu sistemde ham su, filtre tankındaki mevcut su seviyesinin altındaki bir kotta girdiğinden giriş debisi kısıtlanmamıştır. Debi kontrol sistemi filtrenin çıkışına, filtrat hattı üzerine konulmuştur. Kontrol sistemi, debi değişikliğini haber veren venturi borusu gibi bir düzenleme, debi ayar düzeneği (kantar kolu gibi), kontrol mekanizması (esnek disk) ve vanadan (dengelenmiş valf) meydana gelmektedir (Şekil 3.8 gibi). Esnek disk, otomatik olarak çıkış debisini, önceden ayarlanmış olan belli bir değerde sabit tutar. Bu sistemin dezavantajları şunlardır: (i) Oldukça karışık teçhizat gerektirdiğinden ilk tesis masrafı ve işletme-bakım giderleri fazladır, (ii) Filtre tanklarındaki su seviyesini el ile veya otomatik olarak kontrol etme ihtiyacı mevcuttur. Çünkü eğer filtreye gelen su debisi, filtrat debisinden fazla ise filtre tankında taşma meydana gelebilir, ya da tam tersi olarak seviye fazla düşebilir, (iii) Sabit debili sistemin sağladığı su kalitesinin gittikçe azalan debili sistemin sağladığı su kalitesinden düşük olması.

3.1.2.3.1.2. Sabit seviye kontrolü

Bu sistem (Şekil 3.2) esas itibariyle sabit debi kontrolünün aynıdır. Başlıca farkı, filtrat çıkışını kontrol eden valfin, kum üstündeki su seviyesini otomatik

olarak, önceden kararlaştırılmış bir seviyede tutmasıdır. Bu sistemde de çıkışta sabit debi kontrolündeki dezavantajlar aynen mevcuttur. Ayrıca önemli bir diğer sakınca da, filtrelere giren toplam su debisi artması veya filtrelerden birisi geri yıkamaya alındığında işletmede kalan filtrelerin debilerinin artması neticesinde filtrasyon hızındaki artışın su kalitesinde bozulmaya sebep olabilmesidir. Operatörler, filtrasyon hızında kısa süreli de olsa dalgalanmalar, darbeler meydana getirebilmektedirler. Su kalitesini bozucu etkisi olan bu hal oldukça dikkat çekmiştir. Bununla birlikte, süzme hızındaki bu küçük değişikliğin sakıncası operatörlerin her gün rutin olarak, sarfiyat saatlerine göre yaptıkları giriş debisi ayarları yanında çok önemsizdir. Eğer seviye kontrol sistemi, valf kendini ayarlarken, seviyenin genişçe bir limit içinde değişmesine imkan verirse, bu süzme hızı artışı 10-20 dakika gibi uzun bir zamana yayılarak yavaş yavaş meydana gelir; zararı da hızlı değişmeye kıyasla çok azalır. Maalesef bu tip kontrol sistemlerinin çoğu su seviyesinin ancak dar limitler içerisinde oynamasına müsaade etmekte dolayısıyla süzme hızının aniden değişmesine sebep olmaktadırlar.

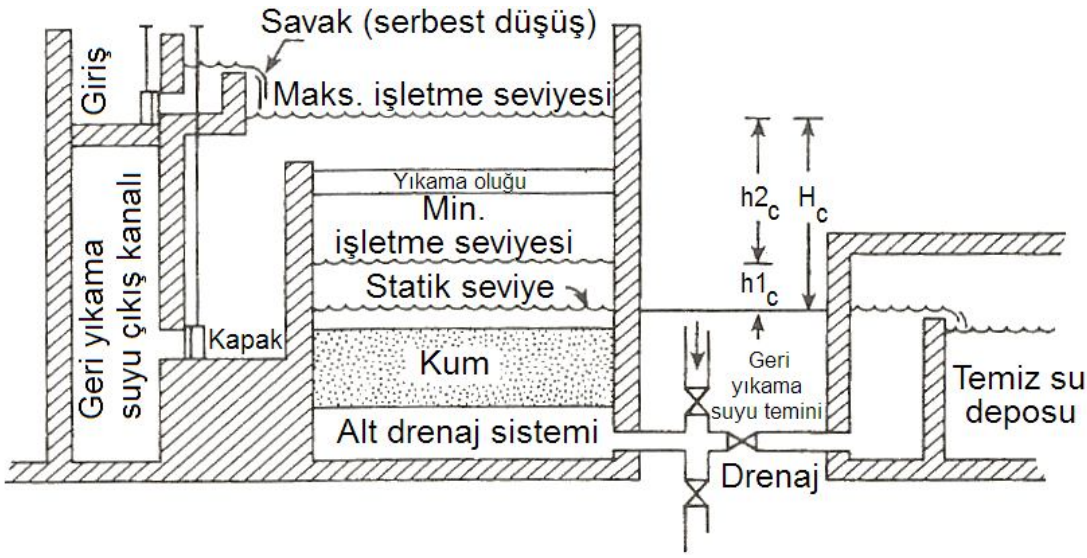
3.1.2.3.1.3. Filtratın pompalanması ile kontrol

Çıkış suyunun şehrin içme suyu ihtiyacına (pompa talebine) göre kontrol edildiği sistemdir. Bazı büyük tesisler, filtrelere giren ham su ile şebekeye süzülmüş su temin eden yüksek basınç pompalarının debisini, şehrin değişen ihtiyacına göre otomatik olarak ayarlamaktadır. Bunun sonucu olarak, filtre hızı filtrat ihtiyacına göre değişmekte, bu da su kalitesinde bozulmaya sebep olabilmektedir. Eğer değişikliklerin düzgün ve ağır olması sağlanırsa su kalitesi iyi sınırlarda kalabilir. Fakat bu gibi sistemlerin tasarımı da çok komplike olabilir. Su kalitesinin iyi olması için filtrenin en azından bir gün, daha iyisi birkaç gün sabit hızla çalıştırılması arzu edilir. Bu ise şehir deposunun yeterli derecede büyük olması ve bu hacmin iyi şekilde kullanılması ile sağlanır. Doğru bir karara varılması için, saatlik ihtiyaç değişmelerine paralel olarak arıtma tesisini çalıştırmak ve buna göre çıkan suyu depoya basmak sistemi ile arıtma tesisini sabit debide çalıştırıp şehir deposunu, değişen ihtiyaçları karşılayacak kadar geniş yapmak opsiyonu, yıllık maliyetler açısından karşılaştırılmalıdır.

3.1.2.3.2. Giriş debisinin kontrolü

3.1.2.3.2.1. Giriş akımının bölünmesi

Bazı tesisler ham su debisini, çalışan filtre tanklarına eşit olarak böler. Bunun için genellikle giriş tarafına bir savak kutusu konur. Böyle bir filtrenin şeması Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Giriş akımının eşit olarak filtrelere dağıtıldığı sistem [Cleasby and Di Bernardo, 1980].

Bu sistemin belli başlı faydaları şunlardır: (i) Eğer tesise giren ham su debisi sabit ise, debi kontrol cihazı kullanmadan sabit hızlı filtrasyonun sağlanmış olur, (ii) Filtre tanklarından biri geri yıkanacak olursa, bu filtrenin su yükünü diğer filtreler eşit olarak karşılar, böylece her filtredeki su seviyesi yavaş yavaş yükselir ve böylece su kalitesinin bozulması engellenmiş olur, (iii) Yıkanan filtre tekrar işletmeye alındığında meydana gelecek hız azalmaları da yavaşça ve düzgün bir şekilde meydana gelir, (iv) Operatör, herhangi bir filtre havuzundaki kirlenme derecesini, su seviyelerine bakarak kolayca söyleyebilir. Seviye belli bir yüksekliğe geldiğinde o filtre devreden çıkarılarak geri yıkanabilir, (v) Her filtre havuzundan geçen debi aynı olduğu için her filtre çıkışına ayrı bir debimetre (hız ölçer) koymaya lüzum yoktur, (vi) Çıkış suyu savağı, üst seviyesi kum yatağı üstünden biraz yukarıda olacak

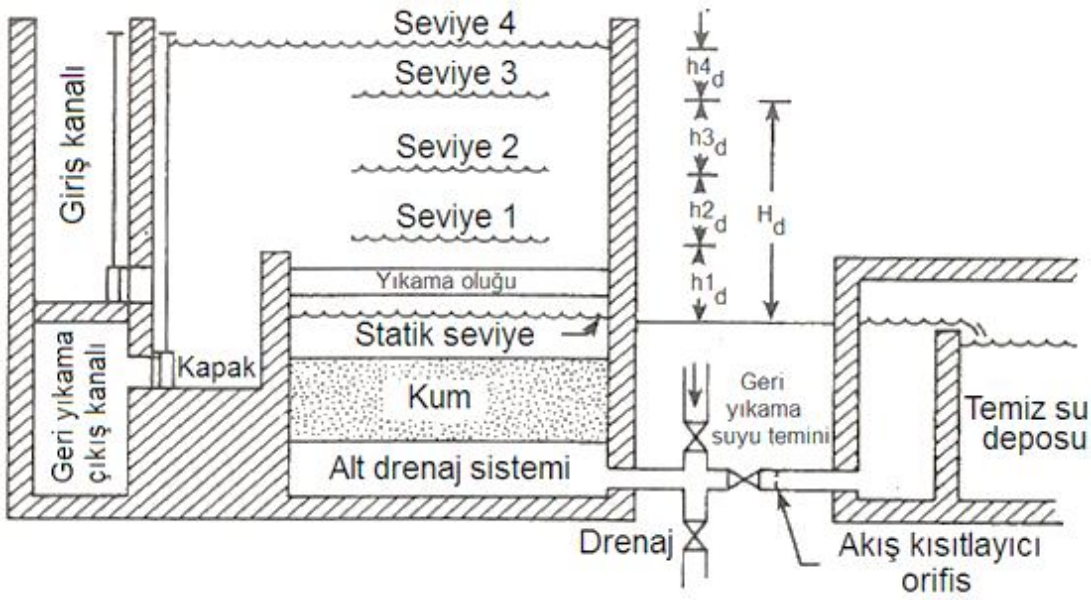
şekilde düzenlenmektedir. Böylece, hem kazara kum yatağının kuru kalıp içerisine hava girmesi önlenir, hem de filtre içinde negatif basınç doğmasına imkan kalmaz.

Ancak giriş suyunun filtre tanklarına eşit olarak dağıtıldığı sistemlerin bir dezavantajı, filtre tankının/havuzunun daha derin olması zorunluluğudur. Derinlik filtrede meydana gelecek yeterli bir yük kaybını karşılayacak kadar olmalıdır. Bu sebeple konvansiyonel filtrelere kıyasla filtre derinliği 1.5-2 m daha fazla olmalıdır. Böylece ortaya çıkacak ekstra inşaat masrafı, kontrol cihazlarının sistemden kaldırılması ile düşecek olan ilk yatırım maliyetleri ve ortadan kalkacak bakım masrafları ve diğer avantajların kazancı ile karşılaştırılmalı ve ona göre hangi filtre sisteminin seçileceğine karar verilmelidir.

3.1.2.3.2.2. Değişken ve azalan debili sistem

Bu sistemin çalışması, eşit giriş suyu dağıtımı sisteminin çalışmasına çok benzemektedir ve aynı avantajları sağladığı gibi, fazladan bazı avantajları da vardır. Buna karşılık herhangi bir dezavantajı da bulunmamaktadır.

Debi kontrol cihazları bozuk olan ya da sık sık arıza yapan eski tesisler kolaylıkla değişken azalan debili giriş sistemine çevrilebilirler. Bazı filtre tesisleri bu esasa göre kurulmakta bazıları da iyi çalışmayan debi kontrol cihazları yüzünden bu sisteme göre çalışmaya mecbur olunmaktadır. Ancak bütün bu iyi özelliklerine rağmen bu sistemin hidroliğinin zorluğu, mühendisler ve filtre operatörlerinin bu sistemi uygulamaktan genellikle kaçınmalarına sebep olmuştur. Bu sisteme ait şematik gösterim Şekil 3.15'de sunulmuştur.



Şekil 3.15. Değişken azalan debili sistem [Cleasby and Di Bernardo, 1980].

Değişken azalan debili sistemin giriş akımının eşit bölündüğü sistemden başlıca farkı ham suyun filtreye giriş yeri ve de yük kaybı için filtre havuzunda daha az derinliğe ihtiyaç duymasıdır. Ham su ortak kanalı, işletme esnasında filtredeki su seviyesinin daha altından bir yerden giriş yaptığı için sistemdeki bütün filtrelerin su seviyesi hemen hemen birbirinin aynıdır. Bunu sağlamak için her filtrenin giriş suyu boruları ve vanaları oldukça büyük seçilmelidir. Böylece giriş borusundaki yük kaybı çok azalacak ve filtrelere akışı kısıtlamayacaktır. Dağıtıcı boru ve filtre valfları, herhangi bir filtreye bir anda gelmesi muhtemel debiyi rahatça alabilecek kadar büyük olmalıdır.

Aynı dağıtıcı giriş borusundan beslenen filtre havuzları gittikçe çeşitli derecelerde kirlenecektir. En çok kirlenmiş olandan geçen suyun hızı böylece en hızlı şekilde azalmaya başlayacaktır. İşte bu filtrenin kaybettiği kapasite diğer ve daha temiz olan filtreler tarafından telafi edilecektir. Bunun için de bütün filtrelerdeki seviye biraz yükselerek, kendisini kirli filtrelerde kaybolan kapasiteyi telafi edecek seviyeye getirecektir. En temiz filtre en yüksek debiyi geçirecektir. Su seviyesinin yükselmesi en kirli filtredeki azalan debiyi de kısmen artıracak ve azalmanın yavaşça gerçekleşmesini sağlayacaktır. Bu çeşit işletmede her filtre temiz iken fazla su geçirecek, kirlendikçe geçireceği su miktarı da yavaş yavaş azalacaktır ki filtrenin bu

doğal koşullar altında çalışması sonucu çıkış suyu kalitesinin bozulmasının da önüne geçilmiş olacaktır.

Bu sistemde yük kaybına (kirlenme vs.) karşı gerekli basınç miktarının daha düşük olması üç sebeple olabilir: (i) Filtre kirlendikçe kapasitesi düşmekte, böylece tabandaki drenaj sisteminden ve çıkış borusundan geçen debi azalmakta ve buralardaki yük kayıpları da haliyle düşmektedir. Böylece sabit debili sistemlere kıyasla kazanılan bu basınç sayesinde filtrenin çalışma süresi daha da uzayabilmektedir. Debinin azalmasından dolayı filtre tabanı ve çıkış borularından kazanılan basınç yaklaşık olarak debinin karesi ile orantılı şekilde değişmektedir. Örneğin debi 10 m^3/m^2.saat iken taban ve çıkış borusundaki yük kaybı 1.2 m ise, debi 7 m^3/m^2.saat'e düşünce yük kaybı da takriben $1.20 \times (7/10)^2 = 0.6$ metreye düşmekte, böylece, $1.2 - 0.6 = 0.6$ metre bir basınç kazanılmış olmakta, bu da en kirli filtrenin bir süre daha çalışmasını karşılamaktadır. (ii) En kirli filtrenin kaybettiği kapasite çok sayıdaki temiz filtrelere dağıtıldığından su seviyesindeki yükselme miktarı çok az ve yavaş olmaktadır. Bu sırada kirli filtre rahatlıkla ve istenilen sürede yıkanmaktadır. Yıkanan filtre işletmeye alındığında, diğer filtrelerin yükünü paylaşacağından bütün filtrelerdeki seviye en yüksek hızla çalışan bu temiz filtredeki seviyeye gelmek üzere biraz düşecektir. (iii) Her filtreye eşit debi girmesi için bir savak kutusu kullanılır ki bu da savak yükü ve serbest düşüş yüksekliği kadar bir basınç kaybına sebep olmaktadır. İşte bu kayıplar değişken azalan debili sistemde meydana gelmemektedir. Böylece filtre derinliği de giriş akımının filtrelere eşit dağıtıldığı sisteme nazaran daha az olacaktır.

3.1.3. Mevcut tesislere değişken azalan debili (giriş) sisteminin uygulanması

Azalan debili sistem, avantajlarından dolayı sabit debi kontrol valfı iyi çalışmayan mevcut tesislere kolaylıkla uygulanabilmektedir. 1968 yılında Japonya Taipei'deki Chan Chu Shan filtre tesisinde Cleasby tarafından böyle bir uygulama yapılmıştır. Kapasitesi 8,600 m^3/saat olan bu tesis 1964 yılında tamamlandığı halde 8 filtre tankındaki sabit debi kontrolörlerinden hiçbiri istenildiği gibi çalıştırılamamış, yedek parça temininde sıkıntı çekilmiş, bu yüzden de sabit debi kontrolörleri iptal

edilerek azalan debili sisteme geçilmiş, filtreler başarıyla işletilmiştir [Cleasby, 1969; 1972]. Tesisin eski hali ile yeni hali arasındaki tek fark temiz su toplama deposunun durumudur. Yeni halde (değişken azalan debili sistem) filtreye süzebileceğinden çok az debi de girse, su seviyesi depo giriş savağından aşağı düşemeyeceği için, kumun kuruda kalması, operatör tarafından hata yapılması tehlikesi mevcut değilken, eski halde bu tehlike mevcuttur. Tesisin mevcut halinde yıkamadan sonraki periyoda dikkat etmek gerekir. Yıkamadan sonra temiz filtre normal süzme işlemine geçtiği zaman, filtre içindeki su seviyesinin yıkama oluklarının üst ağzından itibaren en az 7 cm yukarıda olması gerekmekte ve filtrat çıkışındaki vananın bunu sağlayacak şekilde, bir kereye mahsus olmak üzere kısılması lazımdır. Filtreler kirlendikçe ve yıkandıkça tesise giren ana debinin filtre havuzları arasında kolayca dağılması ve hepsinde aynı seviyenin meydana gelebilmesi için bu şartın gerçekleşmesi gereklidir. Eğer su seviyesi yıkama olukları ağzından aşağıya düşerse, o zaman oluklar Şekil 3.14'deki gibi savak kutusu gibi çalışmaya ve ana debiyi filtreler arasında eşit olarak dağıtmaya başlayacaktır. Sonuç olarak ana debi, hızın fazla olduğu temiz filtrelere doğru, kendi başına kayamayacak ve temiz filtrelerde, az su girip çok su çıktığı için seviye çok düşerek kum yatağı kuru kalabilecektir. Taipei'deki tesiste oluk üstünden itibaren 7 cm su payı koyduktan sonra filtre tankında, kirlenme sonucu suyun yükselmesi için ancak 40 cm bir yükseklik kalmıştır. Buna rağmen tesis, değişiklikten sonra daha başarılı bir şekilde işletilmiştir [Cleasby, 1969].

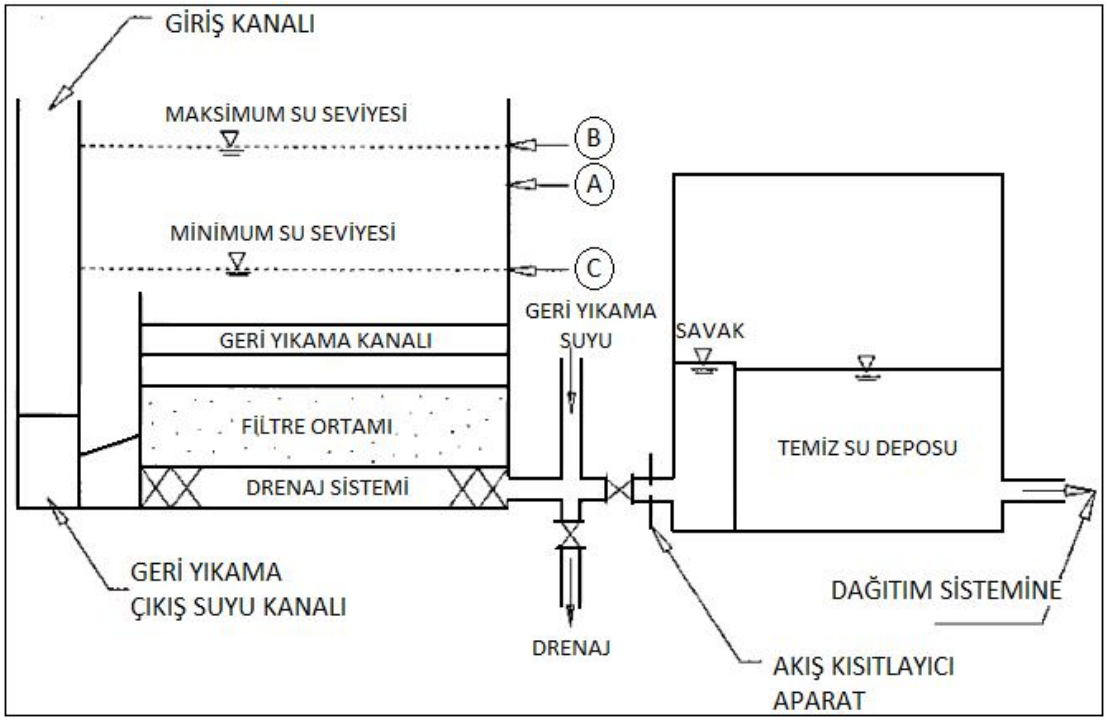
3.2. Azalan debili filtrasyonun tanımı, literatürdeki yeri ve ilgili çalışmalar

3.2.1. Azalan debili filtrasyonun tanımı

Filtrasyon işleminin su debisindeki değişmelere olan hassasiyeti iyi bilinmektedir. Filtre debisindeki ani artışlar filtre içinde tutulmuş olan bazı katıların (ki, bunların içinde patojenik (hastalık yapıcı) mikroorganizmalar da olabilir) yerlerinden ayrılarak çıkış suyu ile birlikte çıkmalarına ve çıkış suyu kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Mekanik olmayan sistemlerin faydaları arasında, mekanik kontrol aletlerine ihtiyaç bırakmamaları ve ani hız değişikliklerine imkan

tanımamaları önde gelmektedir [Akgiray ve Saatçı, 1996]. Bu bölümde, yukarıda filtre kontrol yöntemlerinin sınıflandırması anlatılırken filtre kontrol cihazlarının kullanılmadığı sistemler arasında adı geçen değişken ve azalan debili filtrasyon detaylı olarak anlatılmıştır. "Gerçek azalan debili" sistem (continuous/true DRF)'de filtre ortamı üzerindeki su seviyesi sabit tutulur. Ancak akış varyasyonlarının kontrolündeki zorluk sebebiyle bu sistemin pratikte uygulanmasının da oldukça zor olduğu belirtilmiştir [Arboleda et al., 1985; Akgiray ve Saatçi, 1996]. Bu yüzden uygulamada, tıkanmaya bağlı olarak filtre su seviyelerinde değişmeye izin veren ve müsaade edilebilir bir su seviyesine bağlı olarak geri yıkama yapılan bir kontrol metodu olan "değişken ve azalan debili" (VDRF) filtrasyon tercih edilmektedir. Bu metot ilk kez Cleasby tarafından önerilmiştir [Cleasby, 1969].

Giriş suyu ve çıkış suyu kontrollü olmak üzere iki tip azalan debili filtrasyon mevcuttur. Her iki sistemde de prosesteki filtreler ortak ham su girişi ile birbirlerine bağlıdır ve her bir filtreye ham su girişi filtrenin işletilmesi sırasında meydana gelebilecek minimum su seviyesinin altından gerçekleştirilir. Yeterince geniş bir giriş borusu seçilerek buradaki yük kayıpları da minimize edilir ve böylece işletmedeki filtrelerdeki su seviyeleri hemen hemen aynı olur. Eğer giriş borusunda büyük yük kayıpları meydana gelirse, filtreler yine işletilebilir ancak her bir filtredeki su seviyesi birbirinden farklı olabilir ya da su seviyelerinin eşit hale gelmesi uzun zaman alabilir.

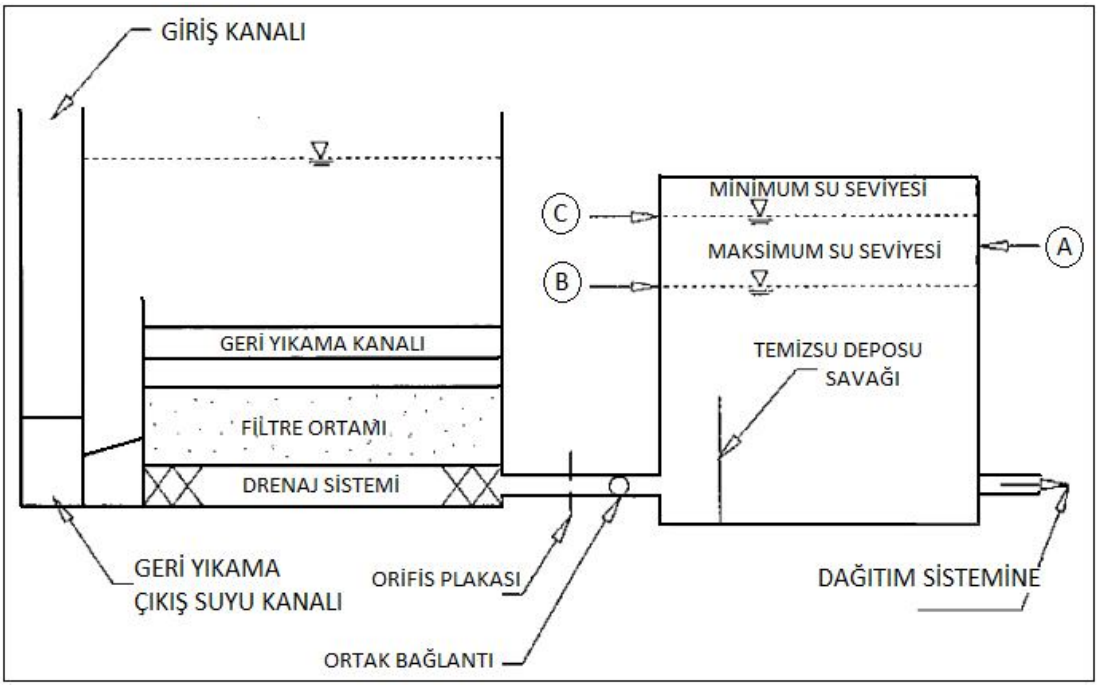


Şekil 3.16. Giriş debisi kontrollü azalan debili sistem [Cornwell et al., 1984].

Şekil 3.16'da giriş suyu kontrollü bir azalan debili filtre sistemi görülmektedir. Bu sistemde filtre edilen su bir savak üzerinden deşarj edilir. Filtredeki toplam yük kaybına bağlı olarak, filtre ortamı üzerindeki su seviyesi değişkenlik gösterir. Şekildeki C noktası, geri yıkamadan sonra işletmeye alınmış temiz bir filtredeki su seviyesini göstermektedir. Filtrede partiküller tutuldukça ve filtre ortamında akışa karşı direnç oluştukça su seviyesi yükselir. Bu yükseliş daha önceden belirlenmiş (filtrenin geri yıkamaya alınacağı) bir noktaya (A noktası) kadar devam eder. Bu nokta filtrenin en fazla işletmede kaldığı süredir. Bir filtre geri yıkamaya alındığında bu filtrenin su yükünü işletmede kalan diğer filtreler paylaşır ve su seviyesi bir miktar daha yükselir (B noktası). Geri yıkanan filtre işletmeye alındığında su seviyesi tekrar C noktasına iner ve filtrasyon döngüsü devam eder.

Çıkış suyu kontrollü bir azalan debili filtre sistemi Şekil 3.17'de sunulmuştur. Bu sistemde giriş ve çıkış debileri dengelenmek suretiyle filtre yatağı üzerindeki su seviyesi sabit tutulmaya çalışılır. Fakat temiz su rezervuarı içerisindeki su seviyesi değişkendir. Filtre yatağı boyunca yük kaybı meydana geleceğinden temiz su rezervuarındaki su seviyesi düşecek ve filtre yatağı boyunca sürücü kuvvetler

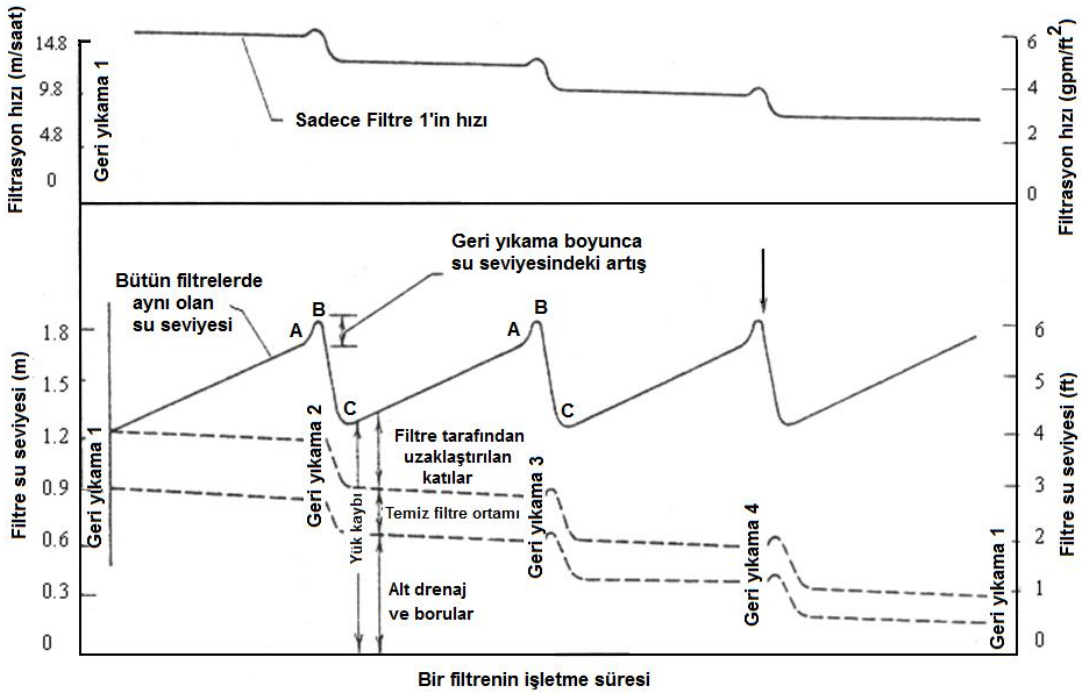
artacaktır. Bu kontrol metodunun başlıca avantajı yükün korunumudur. Şekildeki A, B ve C noktaları bir önceki şekildeki noktalarla benzer su seviyelerini temsil etmektedir. Buradaki tek fark, filtre geri yıkamaları arasındaki periyotta filtrelerdeki su seviyesinin yükselmesi yerine temiz su rezervuarındaki su seviyesinin düşmesidir. Bu kontrol metodunun başlıca dezavantajı ise arıtılmış suyun şebekeye pompalanmasının sebep olduğu yük değişimi, temiz su rezervuarındaki su seviyesinde de dalgalanmalara neden olacağından, operatörün giriş-çıkış akımını dengelerken hata yapmasına neden olabilmesidir. Bu yüzden filtre operatörü açısından, giriş akımının kontrol edildiği bir azalan debili filtre sistemi tercih edilir [Cornwell et al., 1984].



Şekil 3.17. Çıkış debisi kontrollü azalan debili sistem [Cornwell et al., 1984].

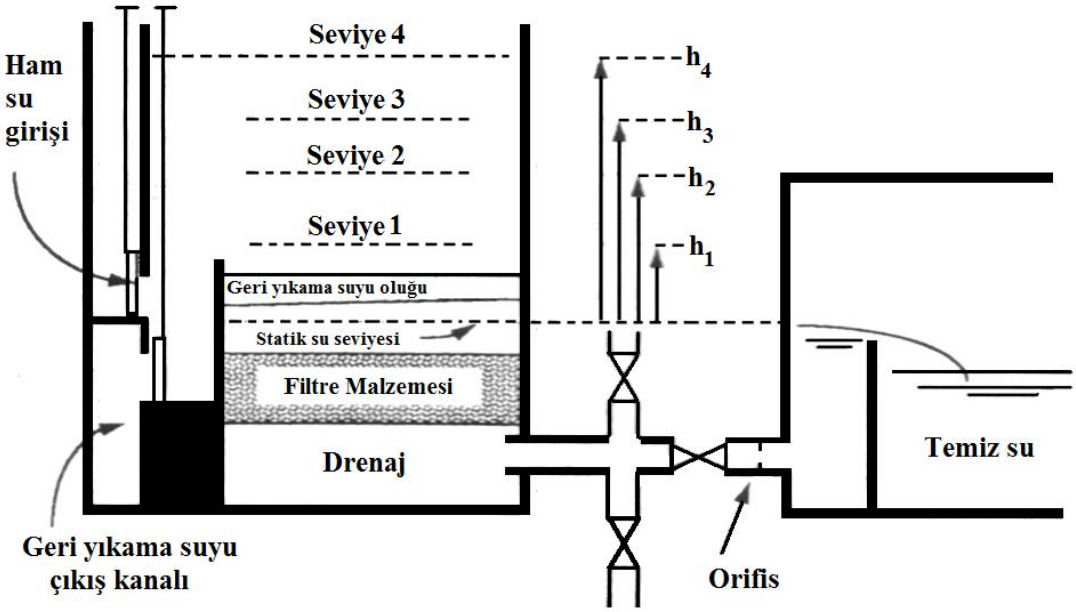
Aşağıdaki şekilde bir azalan debili filtre sisteminin hidrolik özellikleri görülmektedir. Bu diyagram hem giriş hem de çıkış suyu kontrollü sistemler için geçerlidir. Dört filtrenin yer aldığı bu sistemde sadece bir filtre üzerindeki döngüye bağlı olarak filtrasyon hızı ve yük kaybı değişimi verilmiştir. Şekildeki başlangıç noktası, filtrenin geri yıkamadan sonra işletmeye alındığı zamandır. Filtre ortamında katı maddeler biriktikleri için, yük kaybı zamanla giderek artmaktadır. Giriş akımının kontrol edildiği bir sistemde bu yük kaybı filtrelerin üzerindeki su seviyesi ile filtre

çıkış savağı arasındaki seviye farkına eşittir. Çıkış suyunun kontrol edildiği sistemde ise yük kaybı filtrelerin üzerindeki su seviyesi ile temiz su rezervuarındaki su seviyesi farkına eşittir.

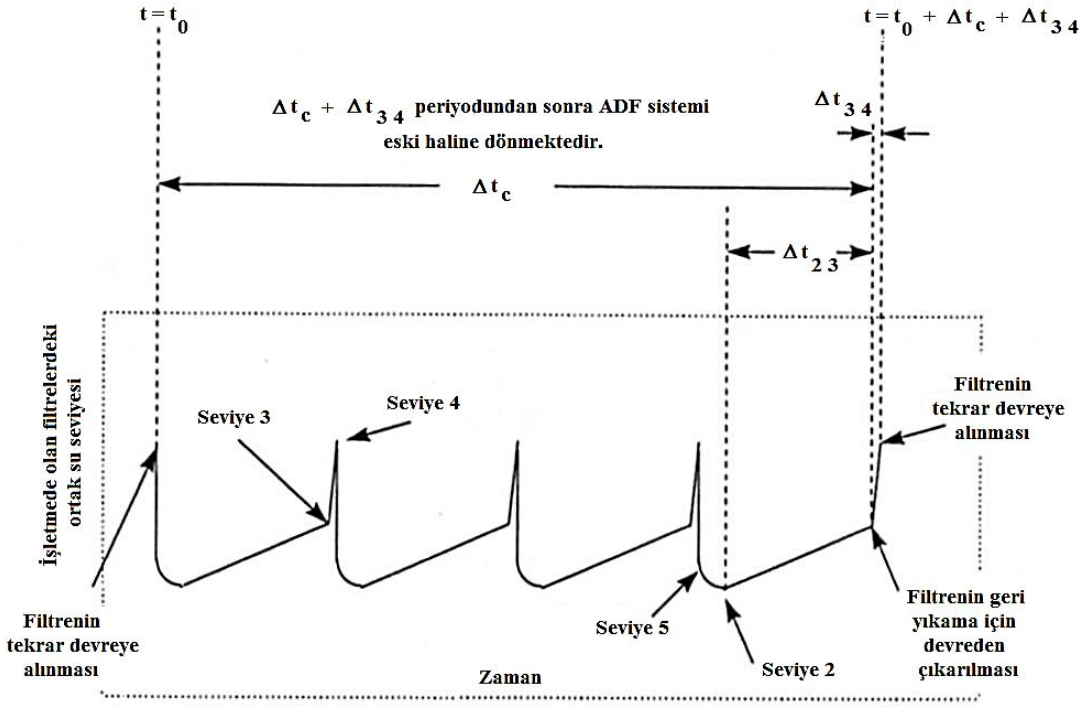


Şekil 3.18. Dört filtreden oluşan bir azalan debili filtre sistemindeki 1 filtrenin yük kaybı, filtre hızı ve su seviyesi özellikleri [Cleasby, 1981].

Azalan debili filtrelerin çıkışında (veya girişinde) herhangi bir akış kontrol cihazı mevcut değildir. Tesisteki bütün filtreler batık bir giriş kanalı veya borusu ile birbirlerine bağlıdır. Filtrelere su girişi asgari su seviyesinin altındadır. Bunun neticesi olarak, herhangi bir zamanda; bütün filtrelerdeki su seviyesi ve toplam yük kaybı yaklaşık olarak aynıdır. Çıkış savağı filtre yatağının üstündedir. Bu tasarımın iki faydası vardır: (1) Kaza ile (meselâ, elektrik kesildiğinde) filtre yatağının boşaltılmasına mani olunur. (2) Filtrede negatif yük ihtimali ortadan kalkar. Aşağıda bahsedilen su seviyelerinin (yük kayıplarının) hepsi filtre kutusundaki suyun çıkış savağına göre olan yüksekliğini bildirmektedir (örneğin, Seviye 2=h_2) (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Azalan debili olarak çalıştırılan bir filtrede işletme süresince su seviyelerinin şematik gösterimi [Akgiray ve Saatçi, 1998b].



Şekil 3.20 Azalan debili olarak çalıştırılan bir filtrede işletme süresince su seviye eğrisi [Akgiray ve Saatçi, 1998b].

En basit misal olarak, dört tane filtreden meydana gelen bir tesis düşünülebilir. Şekil 3.20'deki eğri Filtre 1'in hızını zamana bağlı olarak göstermektedir. Filtre 1 geri yıkandıktan sonra temiz olarak işletmeye alınmaktadır. Normal operasyon sırasında bütün filtreler kirlenmeye devam edecek ve su seviyesi bütün filtrelerde yavaş yavaş yükselerek Seviye 3'e ulaşacaktır. Bu noktada en kirli olan filtre, yani Filtre 2, servisten çıkarılacak ve geri yıkanacaktır. (Bu örnekte filtreler geri yıkama sırasına göre numaralandırılmıştır). Geri yıkama süresince diğer filtreler geri yıkanan filtrenin akış yükünü paylaşırlar. Bunun neticesinde çalıştırılmakta olan üç filtrenin seviyesi maksimum seviye olan Seviye 4'e yükselecektir. Geri yıkanan filtre tekrar işletmeye alındığında önce bütün filtrelerin su seviyesi hızlı bir şekilde (birkaç dakika içinde) eşitlenerek Seviye 5'e gelecek [Akgiray ve Saatçi, 1996], daha sonra bir süre (yarım saat kadar) seviye düşmeye devam ederek Seviye 2'ye ulaşacaktır [Cleasby and Di Bernardo, 1980]. Bu son bahsedilen seviye azalmasının sebebi, yeni geri yıkanmış olan bir filtrenin başlangıçta yüksek hızda çalışmasıdır. Filtrasyon işlemi sırasında bu ve diğer filtreler kirlenmeye devam edeceği için su seviyesi (toplam sistem yük kaybı) tekrar artmaya başlayacak ve Seviye 3'e varacaktır. Bu noktada en kirli filtre olan Filtre 3 devreden çıkarılıp geri yıkanacaktır. Şekil 3.18'den de görülebileceği gibi, Filtre 1'in debisi (filtrasyon hızı) zamanla adım adım azalmaktadır. Filtre 1 kirlendikçe toplam tesis debisinin daha ufak bir kısmını geçirmekte, geri yıkanıp tekrar işletmeye alınan bir filtre ise en yüksek hızda çalışmaktadır. Şekil 3.19'da gösterilen Seviye 1, bütün filtreler temiz olarak ilk çalışmaya başladığı zaman gözlenebilecek su seviyesidir. Su seviyesi sistemin dengeye geldiği Seviye 2 ile Seviye 4 arasında periyodik olarak değişecektir.

Herhangi bir anda, en temiz filtre en yüksek hızda, en kirli filtre de en düşük hızda çalışmaktadır. Geri yıkanmış temiz bir filtrenin hızı bu filtre tekrar geri yıkanana kadar adım adım azalır (Şekil 3.18, üst grafikteki eğri). Fakat bir filtre geri yıkanırken çalışmaya devam eden diğer filtrelerin hızları geçici olarak artar. Toplam filtre sayısı ne kadar çoksa, bu geçici artışın oranı da o kadar az olacaktır. Filtre hızındaki ani artışların çıkış suyuna olumsuz etkileri yukarıda bildirilmişti. Filtre hızındaki bir artışın çıkış suyunun kalitesine zarar verip vermeyeceği iki faktöre bağlıdır: (1) Artışın süresi: Artış ne kadar ani (kısa sürede) ise, tesiri o kadar fazla olur. (2) Artışın miktarı: Azalan debili filtrasyonda kontrol cihazları kullanılmadığı için hız artışları çok ani olamazlar. Bir filtre geri yıkanmak üzere işletmeden

çıkarıldığı zaman, diğer filtrelerin hızlarındaki artış bir 'zıplama' şeklinde olmayacaktır. Su seviyelerinin yükselme hızı aniden artar fakat filtrasyon hızları belli bir zaman zarfında artacaktır (Matematiksel olarak ifadesi: su seviyesi eğrisinin eğimi *dh/dt* süreksiz olmakla beraber, filtrasyon hızı eğrisinin kendisi süreklidir.) İkinci faktör, yani artışın miktarı ise toplam kaç tane filtrenin kullanıldığına bağlıdır. Azalan debili filtrasyon ancak dört veya daha fazla sayıda filtre kullanıldığı takdirde tavsiye edilmektedir [Cleasby, 1993]. Filtre sayısı arttıkça Seviye 3 ile Seviye 4 arasındaki fark azalmakta ve bir filtre geri yıkanırken diğer filtrelerde meydana gelen hız artışlarının su kalitesi üzerindeki olumsuz etkisi de ortadan kalkmaktadır.

3.2.2. Azalan debili filtrelerin hidroliği ve hidrolik olarak sınıflandırılmaları

Azalan debili filtrasyonda giriş ve çıkış hızları ayarlanmaz; hız, filtrenin tıkanmasıyla belirlenir. Her bir filtrenin hızı giderek azalır, ancak toplam tesis girişi sabitse çıkış debisi de hep sabit kalır. Azalan debili filtre sistemi, tıkanmaya bağlı olarak filtre su seviyelerinde değişmeye izin veren bir kontrol metodudur. Filtrasyon hızı sürekli değil kademeli azalmakta ancak iki geri yıkama arasında ortalama hızın değeri korunmaktadır. Azalan debili filtreleri hidrolik olarak sınıflandırmadan önce aşağıdaki kavramlar kısaca açıklanmıştır:

Laminer yük kayıpları: Filtrasyon süresince Reynolds sayısı 6'dan küçük olursa (Camp'a göre kritik sayı) meydana gelir. Laminer yük kayıpları denince filtre yatağında meydana gelen yük kayıpları anlaşılır.

Temiz yatak yük kaybı (başlangıç yük kaybı): Filtre yatağı kirlenmeden önce akışa karşı gösterdiği dirençtir. Filtre yatağı temizken meydana geldiği için filtre edilecek akışkanın karakteristiklerinden bağımsızdır ve zamanla değişmez.

Tıkanma yük kaybı: Granül ortamda parçacık birikmesiyle oluşur. Dolayısıyla filtre edilecek akışkanın özelliklerine ve filtrasyon süresine kuvvetle bağlıdır. Zamanla değişir.

Türbülanslı yük kayıpları: Drenaj yapısı, borular, vanalar vs. sebebiyle yüksek Reynold's sayılarında ortaya çıkar. Akışın (hızın) karesiyle orantılıdır.

Bu yük kayıplarının büyüklüğü filtre kutusundaki su seviyesini belirler:

Statik seviye: Filtrede akış olmadığından meydana gelir (Şekil 3.19).

Minimum seviye: Bütün filtrelerin temiz olduğu ve dizayn hızı ile işletildiği seviyedir. Çıkış savağının üstündedir (Şekil 3.19, Seviye 1).

Minimum seviye = Başlangıç yük kaybı + Türbülanslı yük kayıpları (3.1)

Denge Seviyesi: Geri yıkamadan sonra meydana gelen ve minimum seviyenin her zaman üstünde olan seviyedir. Pratikte bir geri yıkamadan diğer geri yıkamaya değişir (Şekil 3.19, Seviye 2).

Tıkanma Seviyesi: Sistemdeki bir filtrenin geri yıkanmaya alınmadan hemen önceki, filtrelerin ortak su seviyeleridir (Şekil 3.19, Seviye 3).

Geri yıkama seviyesi (geri yıkama piki): Sistemdeki bir filtre geri yıkanırken diğer filtrelerin alabileceği maksimum su seviyesidir. Akışkanın karakteristiklerine, filtre sayısına, filtrasyon hızına ve geri yıkama süresine bağlıdır (Şekil 3.19, Seviye 4).

3.2.2.1. Azalan debili filtrelerin sınıflandırılması (Hidrolik Sınıflama)

1. ***Giriş ve çıkışta düşük türbülanslı yük kayıpları:*** Bu durumda, ham su bütün filtrelere bir manifold (dağıtıcı boru) yardımıyla dağıtılır:

- Filtreler arasındaki akış transferi için kullanılan dağıtım borusu yeterince geniş tutulur ve ham su girişinden kaynaklanan yük kayıpları minimize edilir.

- Giriş hattı ve manifold, filtrasyon boyunca denge seviyesinin altında kalacak şekilde yerleştirilir; böylece çalışma süresince filtrenin içinde her zaman su bulunur ve negatif yük kayıpları engellenmiş olur. Bu seçenekte giriş manifoldundaki su seviyesi, ünitede yer alan filtrelerdeki su seviyesine eşit olur.

- Çıkış suyu sistemden bir taşırma savağı ile alınır. Bu savak her bir filtre için ayrı ayrı yerleştirebileceği gibi, sistemdeki bütün filtreler için tek bir tane de kullanılabilir. Filtrasyonun başlangıcında filtre yatağının susuz kalmasını engellemek için taşırmalı savak kullanılarak çıkış suyu drene edilir.

- Bazen de diğer filtrelerin çıkış suyuyla bir filtrenin geri yıkanabilmesi için bütün filtre çıkışları ortak bir manifold ile alınır. Bu sistemde giriş ve çıkışta hidrolik bir kısıtlama yoktur ve filtreler birbirine bağlıdır. Bütün filtrelerdeki su seviyeleri aynı anda azalır ya da artar.

2. ***Girişte yüksek, çıkışta düşük türbülanslı yük kayıpları:*** Bu durum, her bir filtrenin girişinde hidrolik bir kısıtlama uygulandığında meydana gelir:

- Filtre kutularındaki su seviyeleri giriş manifoldundan daha aşağıdadır ve bütün filtrelerin su seviyeleri birbirinden farklıdır.

- En son geri yıkanan filtrenin su seviyesi en düşüktür çünkü filtrasyon kapasitesi giriş kanalının akış kapasitesini aşmıştır.

3. ***Girişte düşük, çıkışta yüksek türbülanslı yük kayıpları:*** Bu durum 1.'de bahsedilene çok benzemekle birlikte çıkış yapısında bir hidrolik kısıtlama mevcuttur.

- Bu sistem normal filtrelerden kontrol sistemlerinin kaldırılmasıyla oluşur, ancak çıkış tarafında boru galerileri ya da çıkış suyu (filtrat) borularında orifis mevcuttur.

4. ***Giriş ve çıkışta yüksek türbülanslı yük kayıpları:*** Bu durumda girişte bir manifold ve denge seviyesinin altında geçişler ve hem giriş hem de çıkış yapısında hidrolik kısıtlamalar olmalıdır:

- Bu sistem hem giriş suyu hem de filtrat için zor hidrolik hesaplamalar gerektirir. Bu sistem, geniş filtrasyon alanı ve küçük borular ve vanalar kullanılması gerektiği zaman tercih edilir/ortaya çıkar [Arboleda et al., 1985].

3.2.3. Azalan debili filtrasyon ile ilgili literatürdeki çalışmalar

Sabit debili ve hızlı filtreler, filtrasyon tekniği olarak kabul edildikten sonra azalan debili filtrelerin kullanımı ve ilgili araştırmalar da yoğunlaşmıştır ve bu yüzden sabit debili sistemlerle azalan debili sistemler mukayese edilmiştir [Logsdon et al., 1981; Di Bernardo and Cleasby, 1980; Cleasby, 1969; Sanks, 1980; Arboleda 1974; Hudson, 1981; Baylis, 1959; Hudson, 1959; Hutchinson and Foley, 1974]. Buna ilâveten mevcut tesislerin azalan debiliye çevrildiği araştırmalar [Cleasby, 1981; Baylis, 1959; Hudson, 1959] ile tam ölçekte [Cleasby 1969; Arboleda 1974] ve pilot ölçekte [Di Bernardo and Cleasby 1980; Arboleda, 1974] uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda hem su kalitesi hem de filtrat üretim miktarı bakımından azalan debili sistemler lehine oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir [Baylis 1959; Hudson 1959, Aultman 1959, Cleasby, 1981, Di Bernardo and Cleasby 1980]. Ancak azalan debili filtrelerin ilk kullanıldığı yer olan Amerika'da mühendisler azalan debili filtre dizaynı ve işletmesi ile ilgili tereddütte kalmışlardır. Yerel yönetimlerin filtrasyonla ilgili düzenlemelerine göre filtrelerde izin verilebilen maksimum hızlar 10—15 m^3/m^2.saat'tir. Azalan debili filtrelerde ise ortalama 10 m^3/m^2.saat'lik debi elde edebilmek için çalışma aralığı 5—15 m^3/m^2.saat olarak seçilmelidir. Dolayısıyla, aynı özelliklerde bir sabit debili filtrenin üretebileceği filtrat hacmini oluşturabilmek için daha fazla sayıda azalan debili filtreye ihtiyaç duyulmaktadır. Mühendislerin diğer bir endişesi ise, azalan debili filtrelerin dizayn ve işletme hidroliğinin tamamen anlaşılabilmiş olmamasından kaynaklanmaktadır. Filtre operatörü azalan debili filtrasyon prosesini anlamadığı takdirde, filtredeki su seviyesinin yükselip alçalmasını da oldukça karışık bir işlem olarak görecektir.

[Cornwell et al., 1991]. Buna karşılık arıtma tesisi operatörleri, azalan debili filtredeki yük kaybı-su seviyesi değişimi ilişkisini anladıklarında, azalan debili filtre ile ilgili herhangi bir problemle karşılaşmayacaklarını düşünmektedirler [Cornwell et al., 1984; Bishop, 1989].

Baylis, Chicago Filtrasyon Tesisi'nde gerçekleştirdiği çalışmasında filtre hızı kontrol cihazlarından biri olan vanaların düzgün olarak işletilmediği takdirde (herhangi bir sebeple arzu edilenden farklı olarak açılıp kapanması) çıkış suyu kalitesinin bozulduğunu gözlemlemiştir [Baylis, 1958]. Bilindiği gibi vanalar ve benzeri akış kontrol cihazları filtrasyon hızını mümkün olduğu kadar sabit tutmak için tesise yerleştirilen cihazlardır. Akış kontrol cihazlarının su kalitesinde istenmeyen etkilere sebep olmasını önlemek için sistemden çıkarılması ve filtrelerin herhangi bir hız kontrol cihazı olmaksızın işletilmesi ise değişken hızlı filtrasyon olarak tanımlanabilir. Sabit debili filtrelerden farklı olarak, filtre işletmede olduğu sürece hız azalmakta ve yük kaybı da artmaktadır. Örneğin bir filtre maksimum 10 m/saat hızla işletilmek isteniyorsa, geri yıkanan her bir filtre işletmeye alınır alınmaz hızının buna göre ayarlanması gerekmektedir. İlk kum filtreleri çalıştırılırken filtrasyon hızının ayarlanması, filtre çıkış hattına yerleştirilen kontrol vanaları ile gerçekleştirilmekteydi [Baylis, 1959]. Değişken hızlı filtrelerin ise ilk kullanılabilirliği Hudson tarafından ortaya konmuştur [Hudson, 1959].

Değişken hızlı filtrasyon ile ilgili literatürdeki ilk çalışmalardan birisi South Distriction Filtrasyon Tesisi'nde gerçekleştirilmiştir. Filtrelerin yarısı değişken hızlı (azalan debili) yarısı ise sabit hızlı olarak işletilmiştir. Bu çalışmada her iki sistem arasında su kalitesi açısından fark gözlemlenmezken azalan debili filtre, aynı yük kayıplarında sabit hızlı filtreden %50 daha fazla süre ile işletilebilmiştir [Baylis, 1959].

Önceleri hızlı filtreler işletilirken filtrasyon hızının mümkün olduğunca sabit tutulmasının çıkış suyu kalitesini olumlu etkilediğine inanılıyordu. 1959'da Hudson tarafından Wyandotte Mich. Filtrasyon Tesisi'nde azalan debili ve sabit debili (konvansiyonel filtrasyon) filtreler arasında karşılaştırma deneyleri yapılmıştır.

Tesisteki iki filtreden birisi sabit hızlı olarak işletilmiş, diğerinde ise hız kontrol cihazı sistemden çıkarılarak yerine büyüklüğü sabit bir orifis yerleştirilmiştir. Orifisin boyutu, azalan debili filtredeki ortalama hızı sabit debili filtre hızına eşit tutabilecek şekilde seçilmiştir. Her iki filtrenin de yaklaşık hızı 6 m/saat seçilmiştir. Azalan debili filtre 6.75 m/saat filtrasyon hızıyla işletmeye alınmış, hızı 5.25 m/saat'e düştüğünde ve yük kaybı 150 cm'ye ulaştığında geri yıkamaya alınmıştır. Filtrelerde 0.7—0.8 mm efektif çapında filtre kumu kullanılmıştır. Çıkış suyu kalitesi değerlendirilirken filtre edilmiş sudaki askıda katı madde konsantrasyonu dikkate alınmıştır. Azalan debili filtrede daha iyi çıkış suyu kalitesi ve % 37 daha uzun işletme süresi elde edilmiştir [Hudson, 1959].

Filtre kontrol cihazlarının kullanılmadığı ilk filtrasyon ünitelerinden birisinin de Kaliforniya Ventura'daki bir arıtma tesisinde bulunduğu bildirilmiştir. Filtredeki minimum su seviyesini filtre kumunun üzerinde elde edebilmek için filtre kumunun en üst seviyesinden daha yüksekte inşa edilen bir savak ile çıkış suyu deşarjının yapılması gerektiği belirtilmiştir [Aultman, 1959]. Ayrıca bu çalışmadaki tesis azalan debili sistemlerin en basiti olan her filtrenin kendisine ait bir savak kutusu ile giriş akımının filtrelere bölündüğü sistemdir.

Sürekli azalan debili filtre sistemine en yakın konsept Hudson tarafından geliştirilmiştir. Bu sistemde Wayne County Filtrasyon Tesisi'nde filtreler kontrol cihazı kullanılmadan işletilmiştir. Bunun yerine filtre çıkışları bir kolektörle birbirine bağlanmış ve filtrat bir dengeleme haznesine transfer edilerek filtrelerin hidrolik kontrolü sağlamıştır. Bu sistemde filtrat, ortak bir basınç yükseltici sayesinde suyun şebekeye pompalandığı yüksek seviyede bir dengeleme/depolama tankına iletilmektedir. Pompa debisi giriş debisine göre ayarlanarak sistemde su birikiminin önüne geçilmektedir [Hudson, 1963].

Aynı yıllarda yapılan çalışmalarda çıkış suyu kalitesinin direkt olarak filtre giriş suyu kalitesi ile ilişkili olmasının yanında hidrolik kontrol yönteminin de filtre çıkış suyu kalitesinin belirlenmesinde büyük önem taşıdığı bildirilmiştir. [Cleasby et al., 1963; Tuepker, 1965; Hudson, 1956; Robeck et al., 1962].

St. Louis County Water Company'deki arıtma tesislerinde beş farklı işletme koşulunda azalan debili filtreler ve sabit debili filtreler mukayese edilmiş, filtreleri azalan debili olarak işletmenin daha avantajlı olduğu rapor edilmiştir [Tuepker, 1965].

Bir diğer çalışmada Cleasby, filtre çıkış kontrol cihazlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmak için "gerçek" azalan debili filtrasyonun (sabit toplam yük kaybı ile işletilen sistemler) bir modifikasyonu olan ve adına "değişken" azalan debili filtrasyon dediği bir proses önermiş ve Taiwan'daki Chan Chu Shan Arıtma Tesisi'nde değişken azalan debili ve sabit debili filtrelerin mukayese edildiği deneyler gerçekleştirmiştir [Cleasby, 1969]. Bu çalışmadaki azalan debili filtreler ortak bir giriş kanalıyla birbirlerine bağlı olarak işletilmişlerdir. Bu filtrelerin çıkış hattında akış kısıtlayıcı olarak bir orifis kullanılmıştır. Bu sistemde bank sistemi içerisindeki filtrelerden her biri sırayla geri yıkanıp işletmeye alındığında diğer filtrelerin hızı kademeli olarak azalmaktadır. Deney sonuçları Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1'deki sonuçlara göre azalan debili filtrelerin sabit debili filtrelere göre daha iyi kalitede su ürettiği görülmüştür. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, filtre tankının kazara susuz kalmasını engellemek için temiz su deposunda yapılan dizayn değişiklikleri ve ayarlamalar filtreleri iyileştirmekte ve otomatik kontrol cihazları olmaksızın işler hale getirmektedir. Bu durum ayrıca filtredeki negatif yük kaybını da engellemektedir. Herhangi bir filtredeki hız değişimi ani değil yavaşça gerçekleşmektedir. Bu değişim filtre çıkış vanasına ihtiyaç duyulmadan oluşmaktadır. Su kalitesinin iyi olmasının başlıca sebebi de filtre hızlarında ani değişim meydana gelmemesidir. Ayrıca, değişken ve azalan debili filtre sistemi, tesiste ihtiyaç duyulan yük kaybını ve filtre tankı derinliğini azaltmaktadır. Yukarıdaki tabloda verilen yük kaybı eğrisinin eğiminin filtre periyodunun sonuna doğru azalmasının iki sebebi vardır: Azalan debili filtrede filtrasyon hızının azalması, sabit debili filtrede ise çıkış bulanıklığının giriş bulanıklığı değerine yaklaşması.

Tablo 3.1. Taiwan'daki Chan Chu Shan Arıtma Tesisi'ndeki azalan debili ve sabit debili filtrelerin karşılaştırıldığı testlerin sonuçları [Cleasby, 1969].

Filtre no.	**Azalan debili**				**Sabit debili**			
	2	**4**	**6**	**8**	**1**	**3**	**5**	7
Başlangıç hızı (m/saat)	15	15.62	14.75	15.25	15.75	15.75	15.5	15.75
Bitiş hızı (m/saat)	13.13	14.5	12.5	12.5	15.75	14.75	12.5*	15.25
Ortalama çıkış suyu bulanıklığı (ppm silika ölçeği)								
İlk 48 saat	0.21	0.21	0.38	0.31	0.3	0.75	1.05	0.7
48 saatten sonra	0.35	1.1	-	-	-	2.2	2.2	3.0
Yük kaybı								
Başlangıç hızındaki eğim (m/gün)	0.91	0.94	0.91	0.91	67.06	94.49	88.39	88.39
Bitiş hızındaki eğim (m/gün)	0.58	0.79	0.43	0.58	0.52	0.58	0.3	0.58
Filtrasyon süresi (saat)	71	71	40	37	40	64	64	94
Muhtemel yük kaybı (m)	2.83	2.59	1.86	1.89	1.52×	2.93	1.74	2.59

* Filtrasyon süresinin ortalarında hız 12.5 m/saate düşmüştür.

× Bu noktadan itibaren deneysel gözlem sona ermiş, filtre ise çalışmaya devam etmiştir.

Azalan debili filtrelerin işletilmesine dair ilk ayrıntılı prosedür de yine Cleasby maddeler halinde açıklanmıştır. Bunlardan birisinde geri yıkamadan sonra işletmeye alınan filtrenin hızının, tesis ortalama hızının % 10-20'si kadar artabileceği belirtilmiştir [Cleasby, 1969].

Cleasby azalan debili filtreler ile işletme prosedürünü maddeler halinde rapor etmesinden sonra azalan debili filtrelerin hidrolik özellikleri ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Arboleda, Cochabamba Arıtma Tesisi'ndeki (Bolivya) azalan debili filtreler; Lima Doğal Hidrolik Laboratuvarı'ndaki (Peru) pilot tesis; Villa Hermosa Su Arıtma Tesisi (Medellin, Kolombiya) ve Greensboro, N. C.'deki azalan debili filtreler ile ilgili işletme verilerini (filtrasyon hızları, filtre havuzlarındaki su seviyeleri ve yük kayıpları) değerlendirmiştir. Cleasby'nin aksine Arboleda akış kısıtlayıcılarını her bir filtrenin giriş hattına yerleştirmiştir. Bu yaklaşım sayesinde kirlenen bir filtreyi yıkamak için drenajları birbirine bağlı filtrelerin çıkış sularının kullanılmasına olanak sağlanmıştır. Arboleda'nın bu çalışmasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [Arboleda, 1974]:

- Vana vs. gibi kontrol cihazı kullanılan bir filtredeki hız değişiklikleri, kontrol cihazı kullanılmayan filtrelere göre daha ani olarak meydana gelmektedir. İlk durumda çıkış hattında sürtünme kaybı her meydana geldiğinde filtre hızında ani ve çok sayıda dalgalanmalar oluşmakta ve bu durum saniyeler içerisinde meydana gelmektedir. İkinci durumda ise bu dalgalanmalar sadece filtre havuzundaki ya da çöktürme havuzundaki su seviyesi değişikliklerinde oluşmakta ve aşama aşama, daha uzun sürede meydana gelmektedir.

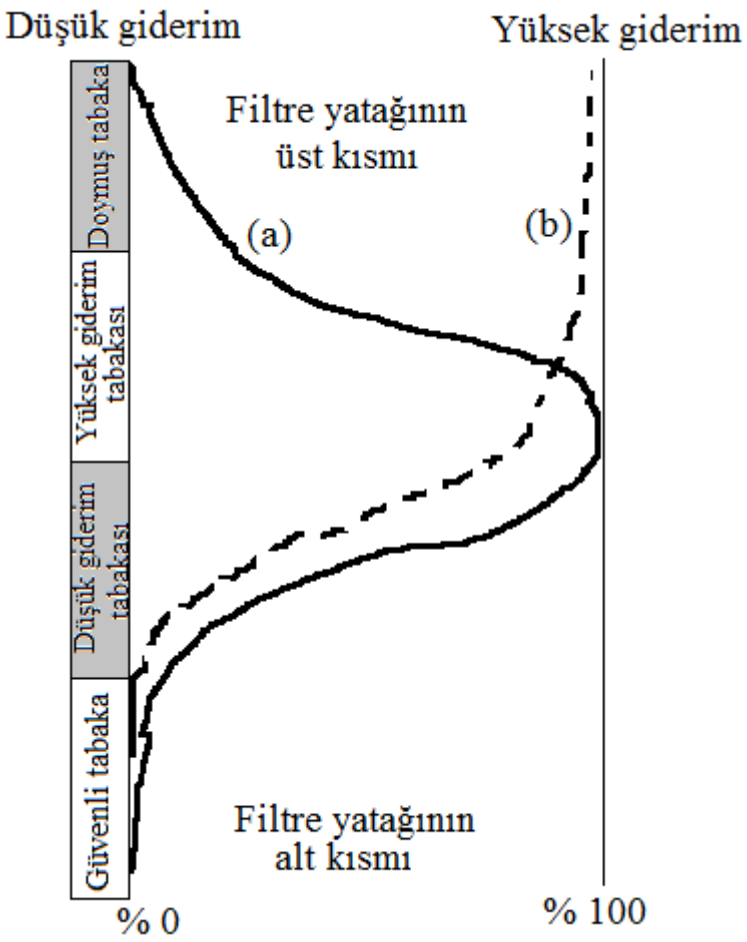
- Giriş kontrollü filtreler büyük hız değişikliklerine daha toleranslıdır.

- Sabit hızlı filtrede filtrasyon sonunda (filtre kirli ve tıkalı iken) azalan hızı, baştaki hızla eşit tutmak için kontrol cihazı kullanılmaktadır. Bu durumda su filtre yatağından zorla geçirilmiş olmaktadır. Bu durumda filtre gözeneklerindeki hız artar ve burada tutulmuş partiküller yerlerinden ayrılarak çıkış suyuyla birlikte temiz su rezervuarına karışırlar. Bundan

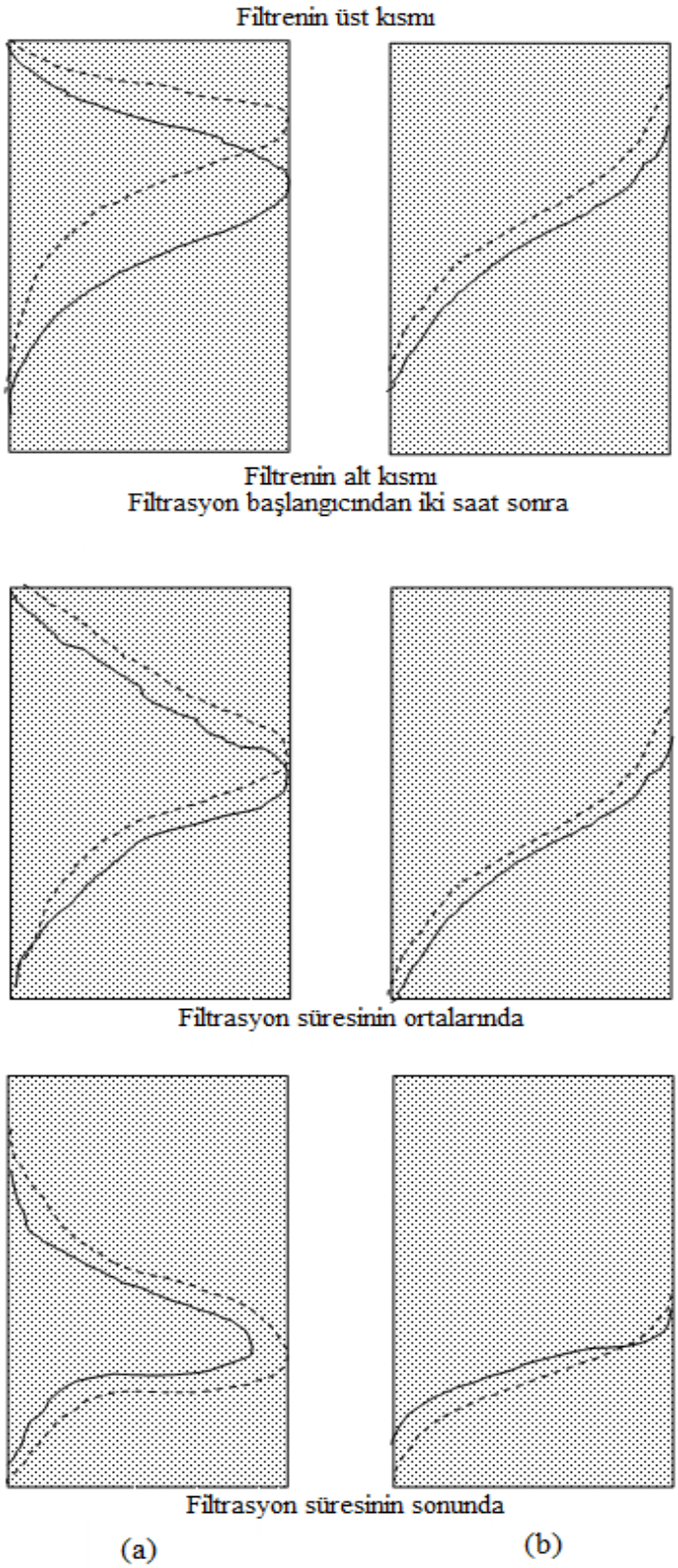
dolayı hızın gittikçe düşmesi teorik olarak faydalıdır. Azalan debili filtrenin sabit hızlı filtreye göre avantajı, kontrol cihazı olmadığı için filtre temiz iken hızlı, kirli iken yavaş çalışmasıdır. Böylece filtrede tutulmuş partiküllerin yerlerinden ayrılmaları engellenmiş olur.

- Hız kontrol cihazlarının olmadığı filtreler daha ekonomik ve kolay tasarımları da beraberinde getirecektir

Konvansiyonel filtrede filtre tıkanmaya başladıkça çıkış suyu bulanıklığında kademeli olarak artış görülmektedir. Camp (1954)'e göre su içerisindeki floklar filtrede tutulduklarında filtre malzemesi daneciklerinin üzerinde kaplama oluştururlar. Filtre yatağının üst taraflarında tutulmayan floklar daha alt kısımlarda tutulurlar. Üst tabaka doygun hale geldiği için bu kaplama oldukça kalınlaşır ve flok filtre yatağının daha derinlerinde tutulma eğilimi gösterir. Şekil 3.21'de filtrasyon periyodunun ortalarındaki bir zamanda su kalite parametreleri gösterilmektedir. Şekle göre bulanıklığın çoğu doymuş tabakanın hemen altındaki kısımda giderilmektedir. Kalın bir doymamış tabaka varsa bulanıklığın çok azı geçer. Doymuş tabakanın altında ne kadar fazla filtre ortamı varsa, bulanıklık da o derecede etkili giderilir. Filtrasyon hızı sabit kaldığında, doymamış ortam azaldığından filtre ortamını terk eden bulanıklık miktarı da artar. Şekildeki eğrilerin doğru olarak elde edilmesi flok şiddetine ve floku filtre içerisinde sürükleyen akış kuvvetlerine bağlıdır. Filtrasyon hızının değişmesine (azalmasına) izin verildiğinde filtreden kirlilik kaçması kendiliğinden engellenecektir. Doymuş tabakadan geçen flok miktarı ve flok üzerindeki kuvvetler aynı anda azalacak ve doymamış tabaka kalınlığı da azalacaktır. Bu durum filtrasyonun ilerleyen zamanlarında çıkış suyu bulanıklığındaki artışı da azaltacaktır. Azalan debili ve sabit debili filtre yatağındaki bulanıklık profili Şekil 3.22'de verilmiştir. Azalan debili filtrenin çıkış suyu kalitesini iyileştirdiği görülmektedir. Ancak filtre dizaynında tek kriter bulanıklık değildir. Aşağıdaki tabloda (Tablo 3.2) azalan debili filtrasyon ile sabit debili filtrasyon arasında karşılaştırma yapılmıştır [Bryant et al., 1974].



Şekil 3.21. Tek tabakalı bir filtredeki tipik bulanıklık giderim modeli, (a): Bulanıklık giderim oranı, (b): Kalan bulanıklık oranı [Bryant, et al., 1974].



Şekil 3.22. Tek tabakalı filtrede tipik bulanıklık giderim modellerinin karşılaştırılması, (a): Bulanıklık giderim oranı, (b): Kalan bulanıklık oranı, Kesikli çizgi: Sabit debili filtrasyon, Sürekli çizgi: Azalan debili filtrasyon.

Tablo 3.2. Azalan debili filtrasyon ile sabit debili filtrasyonun karşılaştırılması [Bryant et al., 1974].

Özellik	Azalan debili	Sabit debili
Borulama boyutu	Maksimum başlangıç hızında makul yük kayıpları elde edebilmek için her filtrede uygun boru ölçülendirme.	Makul yük kayıplarında minimum maliyet elde edebilmek için her bir filtrede ve ana boruda uygun ölçülendirme.
Filtre yüzey alanı	Sabit debili filtreler ile hemen hemen aynı. Ortalama filtrasyon hızı, sabit debili filtrenin hızına eşit olmalı.	İzin verilen maksimum hıza göre belirlenir.
Filtre havuzunun derinliği	Filtre drenajı ve destek malzemesindeki kayıplar ile filtre yatağındaki toplam yük kayıpları da dikkate alınarak derinlik seçilir. Emniyet olarak en üstte hava boşluğu da bırakılır.	Azalan debili filtre ile aynıdır.
Yük kaybı	Genellikle filtre yatağının en üstü ile temiz su rezervuarı arasında 0.6—1 m, 2—2.5 m dizayn hızında.	Tesis ömrü için genellikle 2—2.5 m
Filtrasyon süresi	Sabit debili filtrelere göre % 30—40 filtrasyon süresi ve % 20 daha fazla filtrat üretimi	
Filtrasyon periyotları sonundaki dönüm noktası (filtre çıkış suyu kalitesinin bozulması)	Filtrasyon periyodunun sonuna doğru gerçekleşen filtrasyon hızlarındaki azalma kesme kuvvetlerinde de azalmaya sebep olduğundan filtre çıkış suyuna parçacık kaçması da engellenmektedir/azaltılmaktadır.	Filtrenin bütün tabakalarında kesme kuvvetleri aynı kalır (Şekil 3.22)

Tablo 3.2. Azalan debili filtrasyon ile sabit debili filtrasyonun karşılaştırılması [Bryant et al., 1974] (devamı).

Özellik	Azalan debili	Sabit debili
Tesis üretimindeki değişikler esnasında işletme ve su kalitesi	Operatör filtrasyon hızını başlangıçta ayarlar, işletme süresince hız kendiliğinden değişir. filtrede ani hız değişiklikleri görülmez.	Operatör pompaları, her filtredeki kontrol cihazlarını ya da ana kontrol cihazını ayarlar ve filtrasyon süresince kontrol eder. Filtrede ani hız değişiklikleri meydana gelebilir ve filtre çıkış suyu kalitesinde bozulmalara yol açar.
Ham su kalitesindeki değişiklikler esnasında işletme	Filtre süresini operatör belirler.	Filtre süresini operatör belirler.
Geri yıkama sistemi geçici bir süre servis dışı kaldığında işletme	Geri yıkama olmadığında, bütün filtrelerin hızları yaklaşık olarak eşit hale gelir.	Mevcut filtreler tıkandıkça, operatör yeni filtreleri işletmeye alır.
Tesis kapasitesini artırma	Orifisin çapı büyütülür ya da değiştirilir.	Daha yüksek hızlarda çalışabilen kontrol cihazları kullanılır.
Yukarı akış kontrolü ile işletme	Her iki filtrasyon metodunda da filtrenin üst kısmındaki su seviyesi değişir. Filtre havuzları, akışı ve tesisin ilk çalışma aşamalarında müsaade edilemeyecek yük kayıplarını düzenleyebilmek için dengeleme havuzu gibi çalışır.	

Azalan debili filtre ile sabit debili filtrelerin yatırım (inşa) maliyetleri benzer olmasına rağmen, Detroit-Michigan, Greensboro-Kuzey Carolina, Poughkeepsie-NewYork, Kuzey Chicago-Illinois ve Güney Amerika tesislerinde işletilen azalan debili filtrelerin performans verileri, azalan debili filtrelerin, işletme kolaylığı, daha az kontrol ekipmanı, tesiste daha kolay modifikasyon imkanı, daha iyi kalitede çıkış suyu ve daha fazla filtrat üretimi ile ön plana çıkmasını sağlamıştır [Bryant et al., 1974].

Gregory ve Yadav (1979) İngiltere'de Medmenham'daki Su Araştırma Merkezi'nde gerçekleştirdikleri bir çalışmada dört filtreli bir azalan debili filtre sistemi ile bir sabit debili filtreyi karşılaştırmışlardır. Aynı filtreler ile Burham Su Arıtma Tesisi'nde deneyleri tamamlamışlardır. Her iki sistemde de, alum koagülasyonu ve çöktürme ile ön arıtımı yapılmış iki farklı yüzeysel su filtre edilmiştir. Azalan debili filtreler ile daha iyi çıkış suyu kalitesi ve daha uzun filtre süresi elde edilmiştir.

Buraya kadar anlatılan yaklaşık 20 yıllık bir süreçteki çalışmalar sonucunda şu aşağıdaki sorulara henüz tatmin edici cevaplar bulunamamıştır:

- Gerçekten azalan debili filtre çıkış suyu kalitesi sabit debili filtreninkinden iyi midir?

- Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu kalitesi üzerindeki etkisi nedir?

- Azalan debili filtre, sabit debili filtreye göre gerekli yük kaybı ihtiyacını azaltmakta mıdır?

- Filtre yatağı temizken, başlangıçtaki filtrasyon hızındaki kısıtlamanın filtrasyona nasıl bir etkisi vardır?

- Filtre çıkış suyu hattına konan bir kontrol cihazının filtrasyon süresine etkisi nedir?

- Farklı özelliklerde ham sular filtre havuzuna giriş yaptığında filtre yatağı üzerindeki su seviyesi ne olur? Belirlenebilir mi?

Di Bernardo ve Cleasby (1980) pilot filtre tesisleri çalıştırarak azalan debili filtre ile sabit debili filtre karşılaştırması yapmıştır. Çalışmada, filtrelerin çıkış suyu bulanıklığı ve ortalama hızını belirleyen çıkış hattı türbülanslı yük kayıpları dikkate alınarak filtre işletme süreleri belirlenmiştir. Yaklaşık 7, 12 ve 17 m/saat filtre hızlarında çalışılmıştır. Kireç sertliğinin giderildiği bir arıtma tesisinin suları ham su olarak kullanılmıştır. Ham su kalsiyum karbonat parçacıkları içermektedir, 13—15 °C sıcaklığındadır ve pH'sı yaklaşık 9.4'tür. İki pilot tesisten birisi sabit debili olarak işletilmiş ve filtre çıkış suyu, deşarjdan önce içerisinde bir şamandıra bulunan bir tanka alınmıştır. Bu tanktaki suyun çıkış vanası üzerindeki yükünü sabit tutabilmek için şamandıra su seviyesine göre filtre çıkış hattındaki vananın açıklığını artırmakta ya da azaltmaktadır. Filtre yatağı antrasit (efektif çap=0.95 ve uniformluk katsayısı=1.5) ve kum (efektif çap=0.5 ve uniformluk katsayısı=1.5) olmak üzere iki ortamlı olarak oluşturulmuştur. Filtre tankı olarak 101 mm çapında akrilik boru kullanılmıştır. Diğer pilot tesis ise dört filtreden oluşan azalan debili bir filtre sistemi olarak işletilmiştir. Yukarıdaki ile aynı özellikte 153 mm çapında borular tercih edilmiştir. Filtre ortamı sabit debili ile aynıdır. Her iki pilot tesiste de bulanıklık ve yük kaybı ölçümleri yapılmıştır. Geri yıkamada kumu %30 genişletecek büyüklükte bir geri yıkama hızı seçilmiştir.

İki filtre sistemi de aynı ortalama filtrasyon hızı ile işletilmiştir. İki sistemin çıkış kontrolü birbirinden farklı olduğu için sabit debili filtrenin ne kadar süre ile işletileceği ve filtrasyonun ne zaman sonlandırılacağı aşağıdaki işletme koşullarına göre ayarlanmıştır:

1. Her iki sistem de filtre yatağında aynı yük kaybı ile işletilmiştir.

2. Sabit debili filtre işletilirken çıkış suyu bulanıklığı dikkate alınmıştır. Terminal yük kaybı ya da filtrasyon süresi dikkate alınmaksızın çıkış suyu bulanıklığı 1.0 NTU'ya yükseldiğinde filtre geri yıkamaya alınmıştır.

1a. Koşul 1 ile aynıdır. Sabit debili filtrede muhtemel duraklamaların simulasyonu filtrasyon süresinin dörtte biri aralıklarla gerçekleştirilmiştir.

2a. Sabit debili filtre azalan debili ile aynı filtrasyon süresinde işletilmiştir. Terminal yük kaybı dikkate alınmamıştır. Geri yıkama simulasyonları da azalan debili ile aynı zaman aralıklarında gerçekleştirilmiştir.

Karşılaştırma sonuçlarına göre azalan debili sistemdeki dört filtrenin birleşik çıkış suyu ortalama bulanıklığı (0.1—0.25 NTU), sabit debili filtre çıkış suyuna (0.2—0.6 NTU) göre daha düşük elde edilmiştir. Azalan debili sistem, sabit debili sisteme göre 7 m/saat filtrasyon hızında %100, 12 m/saat hızında %39 ve 7 m/saat hızında %13 daha fazla filtrasyon süresi ile işletilebilmiştir.

Cleasby ve Di Bernardo (1980) azalan debili filtrelerin hidrolik davranışlarını incelemek üzere birkaç ampirik kabule dayanan bir aritmetik model geliştirmişlerdir. Bu modelin en önemli bulgusu (veya kabulü) aynı ortalama hızlarda işletilen azalan debili filtreler ile sabit debili filtrelerin yük kaybı eğrilerinin eğimlerinin eşit olduğu görüşüdür (azalan debili sistemde seviye 2 ile 3 arasındaki seviye artışı esas alınarak). Bu model azalan debili sistemdeki bütün parametrelerin etkisini aynı anda analiz edemese de bu sistemi anlamaya yönelik faydalı bir yaklaşım olmuştur. Bu çalışmada deneysel olarak dört adet filtrenin bulunduğu bir azalan debili pilot filtrasyon tesisi işletilerek yük kaybı ve filtrasyon hızları ölçülmüş, geri yıkamalar ve filtrasyon sırasındaki durum tespit edilmiştir ve şu sorulara cevap aranmıştır:

1. Azalan debili filtre sisteminde sağlanması gereken toplam yük kaybı ne olmalıdır?

2. Bir filtre geri yıkamadan sonra tekrar işletmeye alındığında filtrasyon hızının aşırı artması nasıl engellenebilir?

3. Filtre tankındaki su seviyeleri değişimleri nasıl tahmin edilebilir?

4. Sistemdeki filtre sayısı, su seviyesi değişimlerini nasıl etkiler?

5. Drenaj sistemi ve filtre çıkış borusundaki toplam türbülanslı yük kaybı filtrasyonu nasıl etkiler?

6. Giriş suyu debisinin değişken olduğu durumda günlük içme suyu ihtiyacını karşılayabilmek için azalan debili filtre sistemi nasıl işletilmelidir?

Gerek tam ölçekli tesisler gerekse de pilot ölçekli tesislerde yapılan deneylerde azalan debili filtrelerin sabit debili filtrelere göre daha uzun işletme süreleri sağlamaları ve daha iyi kalitede su üretmeleri başta Amerika olmak üzere diğer bazı ülkelerde de yeni inşa edilen filtrelerin azalan debili filtreler olarak tasarlanmasına yol açmıştır. Bununla birlikte mevcut sabit debili filtrelerin de azalan debili filtre sistemlerine çevrilip çevrilemeyeceği tartışılmaya başlanmıştır. Cleasby (1981) deneysel çalışmasında mevcut bir sabit debili filtrenin azalan debili bir filtreye çevrildiğinde gerekli toplam yük kaybının ne olması gerektiğini ve filtre tankındaki su seviyesindeki değişimlerin nasıl tahmin edilebileceğini araştırmış ve filtre sisteminin azalan debiliye çevrim alternatiflerini sıralamıştır:

- Filtredeki toplam yük kaybını sınırlandırmak ve filtredeki su seviyesini istenilen maksimum seviyede dengeleyebilmek için filtre çıkış hattına havalandırmalı bir ring takılabilir,

- Benzer şekilde, çıkış hattına atmosfere açık bir taşma savağı yerleştirilebilir,

- Temiz su deposunun tavanı yeterince yüksekse ters bir “u” borusu depo içerisine yerleştirilebilir,

- Çıkış borusundaki vananın iki-pozisyonlu vanaya (kapalı ya da kısmen açık) çevrilmesi, bir orifis yerleştirilmesi veya sabit konumlu bir vana eklenmesi yardımıyla çıkış borusunda ek bir türbülanslı yük kaybı elde edilebilir. Böylelikle temiz filtre yatağında izin verilebilir yük 1.5 × Debi (dizayn debisi)’yi aşmamış olur.

İlk üç alternatifte, taşma için konan ring ya da savak filtre yatağının yüzeyinden daha yüksek seviyede olursa filtre etkili bir şekilde işletilebilir. Ancak, gerekli yük kaybını temin edebilmek için taşma savağının filtre ortamının yüzeyinden daha aşağıda inşa edilmesi daha makuldür. Bu durumda iki muhtemel risk göz önünde bulundurulmalıdır:

1. Eğer filtreye gelen ham su akışı kesilirse, filtre çıkış vanası da kapatılmalıdır. Aksi takdirde su seviyesi filtre yüzeyinin altına inecektir.

2. Düşük su seviyesinde, temiz filtrenin geçirebileceği su kapasitesi giriş kapasitesini aşarsa, filtre ortamı susuz kalabilir.

İkinci seçenek daha uzak bir ihtimal olarak hesaplanabilir. Çünkü filtredeki su seviyesi düşeceğinden filtredeki akış hızı da düşecek ve su seviyesi filtre yüzeyine ulaşmadan giriş çıkış akışları dengeye ulaşacaktır.

Sabit debiliden azalan debiliye çevrilmiş bir filtre sisteminde gerek filtrasyon esnasında gerekse geri yıkama süresince su seviyelerinin bilinmesi filtre dizaynı açısından çok önemlidir. Bir azalan debili filtredeki tipik su seviye değişimleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir [Cleasby, 1981]:

- Geri yıkamalar arasındaki kademeli artış;

- Geri yıkama süresince (15-30 dakika) bir filtredeki keskin seviye artışı;

- Temiz filtrenin tekrar işletmeye alınmasıyla diğer filtrelerle birlikte su seviyesinin dengelenmesi için keskin seviye düşüşü (birkaç dakika içerisinde).

Cleasby (1981) azalan debili filtrelerdeki ani su seviye değişimlerinin filtre sayısına ve geri yıkama süresinin uzunluğuna bağlı olduğunu bildirmiştir. Sistemdeki filtre sayısı ne kadar fazla olursa su seviyesindeki artış o kadar az olacaktır. Aynı şekilde geri yıkama süresi ne kadar kısa olursa seviye artışı o kadar az olacaktır. Geri

yıkama süresi sadece 10-15 dakika olursa diğer filtreler geri yıkama sonlandırılmadan önce dengeye gelemeyecektir.

Azalan debili sistem için biraz daha ayrıntılı bir giriş kontrolü de Hudson tarafından tanımlanmıştır [Hudson, 1981]. Bu işletme metodunda filtrelerin her biri ortak derin bir giriş kanalından münferit borularla beslenmektedir ve her filtreye ait bu borular üzerinde kısıtlayıcı bir orifis yer almaktadır. Filtre edilen su ortak bir savak ile deşarj edilmektedir. Bu avantajlarına rağmen böyle sistemler sabit debili sistemlerdekinden daha fazla yük muhafaza edemediğinden daha derin filtre yatağı gerektirmektedirler. ancak, her ne kadar bank azalan debili sisteminde geri yıkama esnasında ortak su seviyesinde bir artış meydana gelse de, bu artış nispeten -özellikle filtre sayısının fazla olduğu sistemlerde- küçük olduğu için azalan debili sistemlerin de yükü muhafaza edebilecek şekilde tasarlanabilecekleri söylenebilir [Chaudry, 1987 (Part I)].

Arıtma tesisi ve filtre dizaynında içme suyu ihtiyacı, dolayısıyla nüfus göz önünde bulundurulur. İçme suyu sağlanan yerleşim yerinin, arıtılmış suları depolayacak yeterli kapasitesi varsa sabit debili filtreler kullanılabilir ve zaman zaman tipik filtrasyon sürelerini aşacak şekilde de işletilebilirler. Böyle bir durumda filtreler gerçek sabit debili veya gerçek azalan debili filtreler olarak çalıştırılabilirler. Bunun aksine, yerleşim yerinin arıtılmış suları depolayabilme kapasitesi sınırlı ve içme suyu ihtiyacına bağlı olarak tesiste gün boyunca giriş suyu debisinde değişmeler gözleniyorsa filtreler tam anlamıyla sabit debili ya da azalan debili olarak işletilemezler. Böyle bir durumda ise filtreleri işletmeden almak ve tekrar işletmeye sokmak hem sabit debili hem de azalan debili filtrelerde akış düzenini sağlamak için optimum bir yöntem değildir. Bu yüzden filtre kontrol metodu seçerken hem teknik hem ekonomik açıdan başlangıçta doğru karar verilmelidir [AWWA, 1984].

Detroit'deki Güneybatı Su Arıtma Tesisi'nde yapılan çalışmalar, azalan debili filtrelerin işletilmesinin sabit debili filtrelere nazaran daha kolay olduğunu ve düzgün işletildikleri takdirde tesiste daha az problemle karşılaşılacağını göstermiştir [Gray, 1983].

Yine Detroit'de bulunan bir başka arıtma tesisi, Water Works Park'daki filtrasyon tesisinde elde edilen tecrübelere göre hız kontrol cihazları kulanılmadığı takdirde tesisin daha ekonomik ve kolay yönetildiği rapor edilmiştir [Opachak, 1983].

St. Louis, Missouri'de biri sabit debili diğeri azalan debili olarak inşa edilen iki tesisin benzer şartlarda işletilmesi sonucu azalan debili sistemin çıkış suyu kalitesinin daha yüksek (bulanıklığının daha düşük) olduğu belirtilmiştir [Tuepker, 1983]. St. Louis'deki bir başka su arıtma tesisi, Chain of Rocks'daki filtre operatörleri azalan debili filtrelerin sabit debili filtrelerden daha kolay işletildiğini ve tesis bakımlarının da daha kolay olduğunu bildirmişlerdir [Johannteter, 1983].

Cornwell ve arkadaşları tarafından Chesapeake, VA'da gerçekleştirilen 40,000 m^3/gün kapasiteli tam ölçekli bir çalışmada filtrasyon süresince yüksek bulanıklık giderimleri elde edilmiştir. Sistemde altı azalan debili filtre çalıştırılmıştır. Filtreleri filtrasyon periyodunun üzerinde çalıştırmak bulanıklıkta herhangi bir azalma ya da artma eğilimine neden olmamıştır. Bu tesiste filtrelere 5 dakikalık bir "filter-to-waste" uygulanmıştır. Yani, geri yıkamadan işletmeye alınan filtrenin ilk filtratı (5 dakikalık) temiz su rezervuarına gönderilmemiş, atılmıştır. Böylece filtre yatağında kalan geri yıkamanın son suyunun rezervuara karışması engellenmiştir. Bu tesis rahatlıkla 0.5 NTU'dan düşük bulanıklıkta filtre çıkış suyu ile işletilebilmiştir. Ayrıca bu çalışmaların akabinde Detroit, MI; St. Louis, MO; Phoenix, AZ gibi birkaç su arıtma tesisinde yapılan incelemelerde filtre çıkış suyu bulanıklık değerlerinin 0.1—0.3 NTU arasında olduğu görülmüştür [Cornwell et al., 1984].

Filtrelerin hangi kontrol metodu ile işletileceği kararlaştırılırken ve kontrol sistemleri arasında karşılaştırma testleri yaparken filtre performansına etki edebilecek işletme parametreleri göz önünde bulundurulmalıdır. Sabit debili filtreler işletilirken aşağıdaki şartların oluşmasına mümkün mertebe izin verilmemelidir:

1. Arıtma tesisi üniteleri boyunca debi değişimleri,

2. Kirli bir filtre geri yıkama için işletmeden çıkarıldığında işletmede kalan filtre sayısının üçten az olması,

3. Filtre ortamında negatif basınca neden olabilecek aşırı yük kaybı,

Benzer şekilde, azalan debili filtrelerde ise aşağıdaki koşullar engellenmelidir:

1. Arıtma tesisi üniteleri boyunca debi değişimleri,

2. Kirli bir filtre geri yıkama için işletmeden çıkarıldığında işletmede kalan filtre sayısının üçten az olması,

3. Filtrasyonun başlangıcında temiz filtrede aşırı filtrasyon hızı.

Yukarıdaki kriterler su temininden sorumlu müesseseler ile arıtma tesisi işletmecilerini bazı düzenlemeler yapmaya itmiştir. Cornwell ve arkadaşları (1984) aşağıdaki tabloda (Tablo 3.3) içme suyu arıtımında kullanılan azalan debili filtreler ile ilgili mevcut yasal düzenlemeleri sunmuş ve azalan debili filtreleri kullanmaya başlayan Amerika'daki bazı su arıtma tesislerinin hidrolik profillerini ve su kalitesini incelemiştir. Bahsedilen yasal düzenlemelerin en önemli amacı filtrasyon hızının belli sınırlar içerisinde kalmasına yönelik kriterleri bildirmektedir çünkü filtrasyon hızındaki aşırı artışlar ve düzensizlikler çıkış suyu kalitesini olumsuz etkilemektedir. Tabloda verilen düzenlemeler yerel nitelikte olup, farklı bölgelerdeki uygulamalar için ayrı ayrı belirlenmiştir. Azalan debili filtrelerin dizayn ve hidroliği tam olarak anlaşılamadığından sabit debili filtreler için konulan işletme prosedürleri kısmen modifiye edilerek azalan debili filtrelere de uygulanmaya başlamıştır. Düzenlemeleri yapan bütün kuruluşlar maksimum filtrasyon hızının azalan debili filtrenin ilk hızı olarak uygulanmasını belirtmektedirler. Bu durumda azalan debili filtrenin ortalama hızı sabit debili filtrenin (sabit debili filtrede ortalama hız = maksimum hız olmalı) ortalama hızından daha düşük olacaktır. Bu durumda daha geniş filtre alanı gerekecek ve gerçek bir azalan debili filtrenin avantajları sağlanabilecektir.

Tablo 3.3. İçme suyu arıtımında kullanılan azalan debili filtreler ile ilgili mevcut yasal düzenlemeler [Cornwell et al., 1984].

Kamu Dairesi	Yönetmelik/Talimat Özeti
New Jersey—İçme Suyu Bürosu	Sadece genel filtrasyon talimatları geçerlidir. Azalan debili filtreler için ayrıca spesifik bir talimat hazırlanmamıştır.
New York—Sağlık Müdürlüğü	Azalan debili filtreler için özel bir düzenleme yapılmamıştır. Genel kurallar geçerlidir. 10 m/saat'i aşan filtre hızları için pilot tesis testleri gerekmektedir.
Connecticut—Sağlık Müdürlüğü	Düzenlemeler sabit debili filtreler için olanlarla aynıdır. 10 m/saat'i aşan filtre hızları için pilot tesis testleri gerekmektedir.
Ohio—Çevre Koruma Ajansı, İçme Suyu Temini Bölümü	Genel filtrasyon kaideleri geçerlidir. 7.5 m/saat'i aşan filtre hızları için pilot ve/veya tam ölçekli tesis testleri gerekmektedir.
Alabama—İçme Suyu Temini Bölümü	Genel filtrasyon kaideleri geçerlidir. Azalan debili filtreler için spesifik bir düzenleme yapılmamıştır. 5 m/saat'i aşan filtre hızları gözlenirse, bir yıllık tam ölçekli tesis testleri gerçekleştirilir. Bu testlerde de sadece 2.5 m/saat'lik filtre hızı artışlarına izin verilebilir.

Tablo 3.3. İçme suyu arıtımında kullanılan azalan debili filtreler ile ilgili mevcut yasal düzenlemeler [Cornwell et al., 1984] (devamı).

Kamu Dairesi	Yönetmelik/Talimat Özeti
Florida—Dade, Broward ve Palm Beach İlçelerine Yönelik Çevresel Düzenlemeler Birimi	Genel filtrasyon kaideleri geçerlidir. Filtrasyon hızı 7.5 m/saat'i aşıyorsa ön denemeler yapılmalıdır.
Teksas—Sağlık Müdürlüğü	Azalan debili filtreler için verilen düzenlemeler, genel filtrasyon kuralları altında verilmiştir. Filtrasyon hızının 12.5 m/saat'i aşmasına izin verilmez.
Pennsylvania—Çevresel Kaynaklar Departmanı	Azalan debili filtreler için özellikle bir düzenleme yapılmamıştır. Sabit debili filtreler için gereken şartlar aynen geçerlidir. 5 m/saat filtrasyon hızı aşılmak isteniyorsa pilot testler yapılmalıdır. Filtredeki hızın 10 m/saat'i aşmaması tercih edilir.
California—Sağlık Hizmetleri Departmanı	Su arıtma tesisleri için belirlenmiş genel bir kriter mevcut değildir. Düzenlemeler su ihtiyacı ya da tesis operatörünün/operatörlerinin teklifleri doğrultusunda yapılır. 15 m/saat'e kadar olan filtrasyon hızlarına müsaade edilir. Ancak 25 m/saat gibi yüksek filtrasyon hızlarına çıkılacaksa kapsamlı testler gerekmektedir.

Araştırmacı Cornwell ve ekibi tam ölçekli azalan debili ve sabit debili filtrelerde gerçekleştirilen eş zamanlı deneyler sonucunda işletme tecrübelerine dayanarak azalan debili filtrelerin avantajlarını aşağıdaki maddeler halinde özetlemiştir:

1) Filtrasyon işleminin sonlarına doğru akış hızı azaltılırsa çıkış suyu kalitesinde iyileşme sağlanabilir çünkü sabit debili filtrelerde filtrasyonun sonlarına doğru çıkış suyu kalitesinin bozulduğu bilinmektedir,

2) Azalan debili kontrol sisteminde birim yük kaybı başına üretilen filtrat miktarı daha fazladır,

3) Azalan debili olarak işletilen filtreler, sabit debili filtrelere göre aynı filtrasyon süresinde daha az yük kaybı gerektirmektedir,

4) Filtreler azalan debili olarak işletilerek kontrol cihazlarının alım ve bakım maliyetleri ortadan kaldırılmıştır.

Yukarıda bahsedilen avantajların yanında azalan debili filtrelerin işletilmesiyle ilgili zaman içinde bazı endişeler de ortaya çıkmıştır. Örneğin, azalan debili filtrelerin işletme özellikleri mevcut standartlara ya da yerel yönetimin koyduğu kısıtlamalara uygun olmayabilir. Ayrıca azalan debili filtrelerin hidrolik davranışlarının tahmin edilmesindeki zorluk, bu sistemlerin tasarımını ve düzgün bir şekilde işletilmesini de güçleştirmektedir [Cornwell et al., 1984]. Buna rağmen azalan debili sistemlerin avantajları öncelikli olarak dikkate alınarak 1975-1985 yılları arasında Latin Amerika'da 100'den fazla arıtma tesisi azalan debili olarak dizayn edilmiş veya mevcut sabit debili sistemler azalan debiliye dönüştürülmüştür. Bu tesislerin başlangıç maliyetleri konvansiyonel tesislerin başlangıç maliyetlerinin % 30-40'ı kadardır [Arboleda et al., 1985].

Arboleda ve çalışma arkadaşları azalan debili filtrelerin hidrolik davranışlarını süreklilik denklemi ve bir ampirik laminer direnç denklemi içeren bir matematik model yardımıyla incelemişlerdir. Filtre sayısının etkisi, türbülanslı yük kaybı, temiz yatak toplam laminer yük kayıpları etkileri araştırılırken, ortak su seviyesindeki

değişim, q_{maks}/q_{ort} ve q_{min}/q_{ort} oranları, filtrasyon süresi, toplam yük kaybı ve türbülanslı yük kaybı yüzdesinin bir fonksiyonu olarak q_{maks}/q_{ort} oranları dikkate alınmıştır. Modelden elde edilen yük kaybı ve hızdaki değişimler daha önceki deneysel bazı çalışmaların [Di Bernardo and Cleasby, 1980; Gregory and Yadav, 1979] sonuçları ile genellikle örtüşmüştür [Arboleda et al., 1985]. Bu çalışmadaki yaklaşım matematiksel denklem olarak aşağıdaki gibi özetlenebilir:

$$h = \left(\frac{K_i}{a}\right) q_i + K_e {q_i}^n + f(t) \qquad < z\ adet\ denklem > \tag{3.2}$$

$$K_i = K_0(1 + \alpha V_i)(1 - \beta V_i)^{bV_i} \quad < z\ adet\ denklem > \tag{3.3}$$

$$Q = \sum_{i=1}^{i=z} q_i + A\frac{dh}{dt} \qquad < 1\ adet\ denklem > \tag{3.4}$$

$$q_i = \frac{dV_i}{dt} \qquad < z\ adet\ denklem > \tag{3.5}$$

Burada h: toplam yük kaybı, K_i: laminer yük kaybı katsayısı, a: bir filtrenin yüzey alanı, q_i: i'nci filtrenin filtrasyon hızı, K_e: Türbülanslı yük kaybı katsayısı, n: $1 < n \leq 2$ olmak üzere bir ampirik katsayı, t: zaman, K_0: başlangıç laminer yük kaybı katsayısı, α: filtrasyon süresi ile ilgili ampirik bir katsayı, β: Filtredeki akış davranışları ile ilgili ampirik bir katsayı, b: ampirik bir katsayı, Q: filtrasyon tesisi giriş debisi, z: tesisteki toplam filtre sayısı, A: tesisteki işletmede olan z adet filtrenin toplam alanıdır (bir filtre geri yıkanırken z-1 adet filtrenin toplam alanı).

Cleasby ve Hilmoe iki yıllık bir çalışmada küçük bir yerleşim yerinin su temini için paralel olarak sabit debili ve azalan debili filtreler çalıştırmıştır. Çalışmanın bir kısmında ham su olarak bir çakıl ocağından gelen yüksek kalitede yüzeysel su kullanılmıştır. Bir ay boyunca iki farklı fitre sistemi yan yana işletilmiş ve su kalitesi yönünden iki sistem arasında fark görülmemiştir. İki sistemin de yük kaybı gelişimleri eşit bulunmuştur [Cleasby et al., 1984].

Birçok çalışmada, kireçle yumuşatılmış yer altı sularının arıtımında SDF ve ADF direkt filtrasyon modunda paralel olarak işletilmiş, yumaklaştırma ve çöktürme prosesleri uygulanmıştır. Ancak, in-line filtrasyonun ilk uygulandığı çalışma Hilmoe ve Cleasby (1986) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yüksek kalitede bir yüzeysel suyun arıtımında SDF ve dört filtre içeren ADF uygulanmıştır. SDF olarak giriş akımının bölündüğü sistem kullanılmıştır. İki farklı ortalama hızda (7.7 ve 13.4 m/saat) çalışılmış, yumaklaştırıcı olarak alum ya da katyonik polimer tercih edilmiştir. Filtre malzemesi, 35 cm antrasit (1.4 mm efektif çap ve 1.36 uniformluk katsayısı) ile 25 cm kumdan (0.52 mm efektif çap ve 1.40 uniformluk katsayısı) oluşturulmuştur. Çıkış suyu kalitesi SDF'nin, ADF'lerden birinin ve ADF'lerin kombine çıkış suyunda bulanıklık ve parçacık sayısı izlenerek ölçülmüştür. SDF ve ADF proseslerindeki yük kayıpları ölçülürken sıfır noktası olarak filtre çıkışının statik seviyesi alınmıştır. Hem sadece bir ADF çıkış suyunda hem de kombine çıkış suyunda yapılan ölçüm sonuçlarına göre SDF ile ADF arasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Daha önceki çalışmalara benzer şekilde ADF için gerekli toplam yük kaybının SDF prosesinde gereken toplam yük kaybından daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

Azalan debili filtre tasarımında başlıca incelenmesi gereken iki parametreden birisi olan hız değişimlerini (diğeri su seviyelerinin değişimi) tahmin edebilmek amacıyla Di Bernardo tarafından bir hidrolik model geliştirilmiştir. Bu model, azalan debili sistemde her bir geri yıkama döngüsünde hidrolik iletkenliğin kademeli olarak değiştiği kabulüne dayanmaktadır [Di Bernardo, 1986].

Azalan debili filtrelerle ilgili gerek pilot gerekse de tam ölçekli tesislerde yapılan çalışmalar arttıkça, bu tür sistemlere yönelik modelleme çalışmalarında da daha fazla işletme parametresi ve tasarım kriteri hakkında bir genel prosedür oluşturma imkanı doğmuştur. Di Bernardo matematiksel modelleme çalışmasında eldeki tam ölçekli ve pilot ölçekli tesis verilerine [Di Bernardo and Cleasby, 1980; Di Bernardo, 1986] dayanarak azalan debili filtrelerin hidrolik davranışlarını tahmin etmek üzere bir matematiksel model geliştirmiştir ve aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır [Di Bernardo, 1987]:

1) Ortalama hız ve hidrolik yük sabit tutularak, bank sistemindeki azalan debili filtre sayısı arttıkça maksimum hız artmakta, minimum hız azalmakta ve iki geri yıkama arasındaki su seviyesi değişimleri azalmaktadır.
2) Hidrolik yük ve filtre sayısı sabit tutularak, ortalama filtre hızı arttırıldıkça maksimum hız artmakta minimum hız ve iki geri yıkama arasındaki su seviyesi değişimleri azalmaktadır.
3) Filtre sayısı ve ortalama hız sabit tutularak, hidrolik yük arttırıldıkça maksimum hız artmakta ve minimum hız azalmaktadır.
4) Hidrolik yük ve sistemdeki filtre sayısı sabit iken, geri yıkamanın sonlarına doğru işletmede kalan filtrelerden en az kirlenen filtrede (filtre yatağının en az tıkanmasına bağlı olarak en az yük kaybı içeren filtre) en fazla hız artışı meydana gelir.
5) Ortalama filtrasyon hızı ve hidrolik yük sabit tutulmak şartıyla, bank sistemindeki filtre sayısının artırılmasıyla geri yıkama esnasındaki ortak su seviyesindeki yükselmenin seviyesi azalır.

Chaudry [1987] çalışmasında yukarıdaki bütün çalışmaları da dikkate alarak sürekli işletilen azalan debili kum filtrelerini, hızdaki değişimler, yük kaybı ve konsantrasyonlar açısından formülize eden ve birinci dereceden non-lineer diferansiyel denklem içeren bir basit model ile matematiksel olarak açıklamaya çalışmıştır. Modelinde filtrat hacimlerini birimsiz olarak almıştır. Modelini oluştururken, sabit debili filtreler üzerine daha önce [Heertjes and Lerk, 1967; Adin and Rebhun 1977; Saatçı and Oulman, 1979] tarafından geliştirilmiş modelleri modifiye etmiştir. Modelindeki diferansiyel denklem numerik olarak Runge-Kutta yöntemiyle çözülmüş ve sonuç, zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Chaudry'nin yaklaşımında Darcy Kanunu'nun yerine Shekthman'in modelini esas alan bir filtre yatağı hidrolik iletkenliği kullanılarak filtrasyon hızının azalması zaman bağlı olarak tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Bir başka çalışmada [Saatçı, 1989] azalan debili filtreler için filtre yatağındaki spesifik birikmeyi hesaplamada kullanılan hidrolik iletkenlik [Chaudry, 1987] yerine harmonik ortalama iletkenliği kullanılmış ve bu iki yaklaşım arasındaki farklar ortaya konmuştur. Aynı araştırmacı [Saatçı, 1990], laboratuar ölçekli azalan debili, sabit debili ve bölünmüş giriş akımlı filtrelerde polielektrolit ilaveli/ilavesiz deneyler

yaparak, Ives, Mint ve Shekhtman'in katı madde birikim modelleri yardımıyla azalan debili filtrasyon teorisinde harmonik ortalama iletkenliğini de kapsayan denklemler türetmiştir. Denklemlerden elde edilen simülasyon sonuçları ile laboratuar ölçekli filtrelerin çeşitli yatak derinliklerindeki katı madde birikiminin ölçümleri mukayese edilmiştir. Elde edilen yaklaşımla filtrat hacminin veya filtre (azalan debili ve bölünmüş giriş akımlı filtrelerde) üzerinde biriken ham su miktarının tahminleri laboratuar çalışmalarıyla örtüşmüştür.

Cornwell ve arkadaşları Kuzey Carolina Arıtma Tesisi'nde gerçekleştirdikleri filtrasyon testlerinde 9.7, 16.6 ve 19.5 m/saat ortalama işletme hızlarında çalıştırılan azalan debili ve sabit debili filtre sistemlerini mukayese etmişler, çıkış suyu kalitesi açısından iki sistem arasında belirgin bir fark gözlemleyemezken, aynı yük kaybıyla işletilen iki sistemden azalan debilinin daha uzun filtrasyon sürelerine sahip olduğunu rapor etmişlerdir [Cornwell et al., 1991].

Azalan debili filtrelerin hidrolik karakteristikleri üzerine çalışmalar yoğunlaştıkça ortaya özel tasarımlı bazı filtreler de çıkmaya başlamıştır. Bir çalışmada değişken ve azalan debili filtrelerde maksimum giriş akımını belirleyen orifis ve vana gibi kısıtlayıcıların ve geri yıkamadaki pompaların yerine sifon sistemi tasarlanmıştır [Miller, 1992].

Değişken ve azalan debili filtrelerin hidrolik özellikleriyle ilgili bir çalışma da Rudawa nehri üzerindeki bir içme suyu arıtma tesisinde gerçekleştirilmiştir. Bu defa sıcaklık parametresi ele alınmıştır. Farklı mevsimlerde ham su ihtiyacı, su kalitesi ve geri yıkama için gerekli su miktarı gözlenmiştir [Dąbrowski and Mackie, 1994].

Yeni tasarlanan su tasfiyesi tesislerinde azalan debili filtrasyon sabit debili sistemlere ciddi bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, başlangıcında sabit debili olarak tasarlanan ve bu şekilde işletilen bazı eski filtrelerin, işletmede ortaya çıkan problemler sebebiyle azalan debili filtreler haline çevrildiği de bilinmektedir. Sabit debili filtrelerin kontrol mekanizmaları (arızalı oldukları için veya başka bir sebeple) çalışmadığı zaman, azalan debili filtrasyon tek alternatif olarak gözükmektedir. Hatta sabit debili olarak tasarlanmış ve inşa edilmiş birçok filtre tesisi, kontrol sistemleri çalışmadığı zaman, azalan debili olarak işletilmeye (çoğu

zaman bunun böyle olduğunun farkına varılmadan) devam etmiştir. [Akgiray ve Saatçı, 1997].

Akgiray ve Saatçı (1997) tarafından hazırlanan bir bildiride İstanbul'da kurulacak bir arıtma tesisindeki filtrelerin azalan debili olarak inşa edilmesi tavsiye edilmiştir. Yeni kurulacak tesis diğer mevcut bir tesisin benzeri olacağı için, mevcut tesis üzerinde yapılacak değişiklikler ile hem mevcut tesis azalan debili sisteme çevrilmiş olacak hem de yeni tesis için model olacaktır. Buna göre, çıkış su seviyesi (negatif basınçlara mani olmak maksadıyla) yüksek olacağı için filtre duvarları da yükseltilmelidir. Gerekli yük kaybı bu şekilde temin edilmiş olur ("Gerekli yük kaybı" ile kastedilen filtredeki azami su seviyesi ile çıkış savağının seviyesi arasındaki farktır. Çıkış savağı seviyesi kumun üst yüzeyinin seviyesinden alçak olmamalıdır). Suyun çıkış seviyesi yükseltilince, filtre duvarlarını da yükseltmek gerekmektedir. Yeni geri yıkanmış bir filtredeki ilk filtrasyon hızını tahdit etmek için çıkış borusunda ilave bir vana kullanılabilir. Bu vana işletme sırasında sabit tutulacaktır (açılıp kapanmayacaktır). Vana ilk hızı ortalama filtrasyon hızının 1.5 katı olarak tespit edecek miktarda kısılmalıdır.

Azalan debili filtreler genellikle filtre yatağındaki laminer yük kayıpları ve her bir filtrenin çıkışındaki drenaj sistemleri ile orifislerdeki türbülanslı yük kayıplarının etkileşimleri ile kontrol edilirler. Lineer olmayan türbülanslı yük kayıpları temiz filtreler için oldukça yüksek olabilir ancak filtre kirlendikçe (tıkandıkça) filtre hızı da azalacağından türbülanslı yük kayıpları da azalır. Geri yıkama sırasında filtrelerden birinin devreden çıkmasıyla işletmede kalan filtrelerin ortak su seviyesi ani olarak yükselir ve bu durum çıkış suyu kalitesini de önemli ölçüde etkiler [Dąbrowski and Mackie, 1997]. Bu nedenle Dąbrowski ve Mackie (1997) tarafından geri yıkamayla birlikte filtre hızındaki ivmelenmeyi hesaplayan bir metot geliştirilmiş ve nümerik çözümlerle doğrulanmıştır. Hızdaki artışın normal işletme şartlarındaki hızla doğru orantılı olduğu görülmüş, böylece geri yıkama esnasında filtrelerdeki ortak su seviyesindeki muhtemel en yüksek dalgalanmaları hesaplayabilecek pratik bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem geliştirilirken aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

1. Bütün filtrelerdeki hız değişimi yalnızca geri yıkama süresince ve sonrasında meydana gelmektedir. Birbirini takip eden iki geri yıkama arasında filtre hızı hemen hemen sabittir,
2. Geri yıkama süresi, işletmede kalan filtrelerin hidrolik dirençlerinde belirli ölçüde değişiklik meydana getirmeyecek şekilde kısa tutulmuştur.

Yukarıda bahsedilen bu yöntemde filtre giriş borusundaki akış değişiminin filtrelerdeki ortak su seviyesi üzerindeki muhtemel etkileri hesaba katılmamıştır. Bu etkilerin önemi suyun filtrelere serbest yüzey şartları altında iletildiği durumlarda artacaktır [Dąbrowski and Mackie, 1997].

Modelleme çalışmalarından birinde de azalan debili filtrasyon sistemini modelleyen bir matematiksel teori ve bir bilgisayar algoritması sunulmuştur. Bu yaklaşımla, filtre yatağı boyunca meydana gelen laminer yük kaybının hesaplanmasında harmonik ortalama iletkenliğinin kullanımı açıklanmış ve hidrolik iletkenliğe göre farklılıkları ortaya konmuştur. Geliştirilen ADF algoritması sayesinde su seviyesindeki değişimler, çıkış suyu kalitesi ve her bir filtrenin hızı, zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Ayrıca bu algoritmayla, filtre alanının suyun biriktiği filtre alanına oranı, filtre yatağının derinliği, filtre sayısı ve türbülanslı yük kaybı katsayısı gibi fiziksel parametrelerin etkileri de simüle edilebilmiştir [Akgiray and Saatçı, 1998 (a)].

Bir başka çalışmada azalan debili filtre üzerine yapılan deneysel ve teorik çalışmalar incelenmiş, daha önceki deneysel bulgulardan biri olan "aynı (ortalama) hızda işletilen sabit debili bir filtre ile azalan debili filtre sistemi içerisindeki bir azalan debili filtrenin yük kaybı eğrilerinin eğimleri eşittir" kabulüne dayanarak aşağıdaki sonuçlar ortaya konmuştur:

1. Azalan debili filtre sistemi içerisindeki filtre sayısı az olmalıdır,
2. Suyun toplandığı yüzey alanının filtre yatağının alanına oranı, azalan debili sistem ve giriş akımı bölünmüş sabit debili filtre için eşit olmalıdır,
3. Azalan debili filtre sisteminin ortalama hızı ile (seviye 2 ile seviye 3 arasındaki hız) sabit debili filtrenin hızları eşit olmalıdır.

Ancak pratikte bu şartların bazen biri bile sağlanamamaktadır. Azalan debili filtrelerin kurulmasında genel olarak uygulanabilecek dizayn yöntemlerine ihtiyaç bulunmaktadır ve bu amaçla da daha ileride deneysel ve teorik çalışmaların devam ettirilmesi gerekmektedir [Akgiray and Saatçı, 1998 (b)].

Van der Walt and Ceronio (1998), Kuzey Afrika'da bulunan Cullinan Su Arıtma Tesisi'ndeki azalan debili filtre sisteminin çıkış suyu kalitesi, filtrasyon hızı ve yük kaybı ölçüm sonuçlarını azalan debili filtre modelleriyle karşılaştırmışlar ve aşağıdaki tabloda (Tablo 3.4.) yer alan tasarım parametreleriyle işletilen sistemin modellerle uyumlu sonuçlar verdiğini bulmuşlardır. Arıtma tesisinde katyonik polielektrolitin kullanıldığı hızlı karıştırma ünitesinden çıkan su, kireç ilavesi, yavaş karıştırma ve çöktürme işlemlerinden sonra dört adet filtre içeren filtrasyon sistemine gönderilmiştir. Mevsimsel değişmelere bağlı olarak ortalama bulanıklığı 50 NTU olan ham su, filtrelerden 0.3 NTU olarak çıkmıştır.

Tablo 3.4. Cullinan Su Arıtma Tesisisi'ndeki azalan debili filtrelere ait dizayn parametreleri [Van der Walt and Ceronio, 1998)].

Parametre	Değeri
Debi (m^3/gün)	16
Filtre sayısı	4
Ortalama filtrasyon hızı (m/saat)	5.6
Maksimum filtrasyon hızı (m/saat)	8.9
Minimum filtrasyon hızı (m/saat)	2.2
Maksimum filtrasyon hızının ortalama filtrasyon hızına oranı	1.6
Minimum filtrasyon hızının ortalama filtrasyon hızına oranı	0.4
İzin verilebilir yük kaybı (m)	1.4
Filtre yatağının derinliği (mm)	Ortam 1: 1,000 (0.6-1.18 mm) Ortam 2: 100 (2.36-4.75 mm) Ortam 3: 150 (7-12 mm)
Filtre nozüllerinin yerleşim yoğunluğu (adet/m^2)	31
Orifis özellikleri	300 mm'lik boru içerisinde 203 mm
Geri yıkama sistemi	Hava (6.7 L/m^2s) Su (7.3 mm/s)

Zielina ve arkadaşları (2002), Di Bernardo'nun azalan debili filtre dizaynına yönelik geliştirmiş olduğu matematiksel bir modeli [Di Bernardo, 1987] bir pilot tesiste deneysel olarak test etmişler ve azalan debili bir filtrenin debisinin (geri yıkamadan sonra ulaşılan debi) ortalama filtre debisine oranının 1.1'den küçük olduğu durumlarda, azalan debilinin sabit debiliye nazaran avantajlı olmadığını tespit etmişlerdir.

Mackie ve Zhao (1999) tarafından geliştirilmiş olan bir azalan debi filtre tasarım modeli daha sonraki birkaç teorik ve deneysel çalışmada azalan debili filtre ile sabit debili filtre mukayesesinde kullanılmıştır. Performans kriterleri olarak su

kalitesi ve filtrasyon süreleri takip edilmiştir. Aynı filtrasyon sürelerinde sabit debili daha avantajlı bulunurken, aynı yük kayıplarında işletilen iki sistemde avantajlı olan ise azalan debili olmuştur. Bu çalışmada ayrıca arıtılan süspansiyonun parçacık boyutu da dikkate alınmıştır. Küçük dane çapında azalan debili filtrenin daha verimli olduğu, parçacık boyutu büyüdükçe ise giderme veriminin düştüğü gözlemlenmiştir. Filtre hızının sabit tutulup h_{maks}/h_{ort} oranının artırıldıkça azalan debili sistemin performansının düştüğü, yük kaybının sabit tutulup q_1/q_{ort} oranının artırıldığında ise azalan debili sistemin performansı düşmektedir [Dąbrowski et al., 2002; Mackie et al., 2003].

Deneysel çalışmalardan birinde de azalan debili filtrelerin performansına sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Yük kaybı ve giriş suyu kalitesi sabit tutularak sıcaklığın artmasıyla bir geri yıkama sonrası yük kaybının ($H-h_0$) ve h_0 (temiz yatak yük kaybının azaldığı, filtrasyon süresinin arttığı rapor edilmiştir. Yine bu çalışmaya göre, sıcaklık arttıkça q_1/q_{ort} oranının arttığı; C/C_0 (%) oranının da azaldığı bildirilmiştir [Zielina et al., 2003].

Yukarıdakine benzer bir çalışmada Di Bernardo (1987) tarafından geliştirilen model n + 1 adet (n: azalan debili filtre sistemindeki filtre sayısı) non-lineer denklem ile ifade edilmiş, üç farklı yaklaşımla bu denklemler çözülmüş ve sonuçlar, mevcut deneysel sonuçlar ile mukayese edilmiştir. Bu yaklaşımlara göre azalan debili filtre sistemindeki filtre hızlarının geometrik bir dizinin öğeleri olduğu saptanmıştır [Zielina et al., 2005; Dąbrowski, 2006].

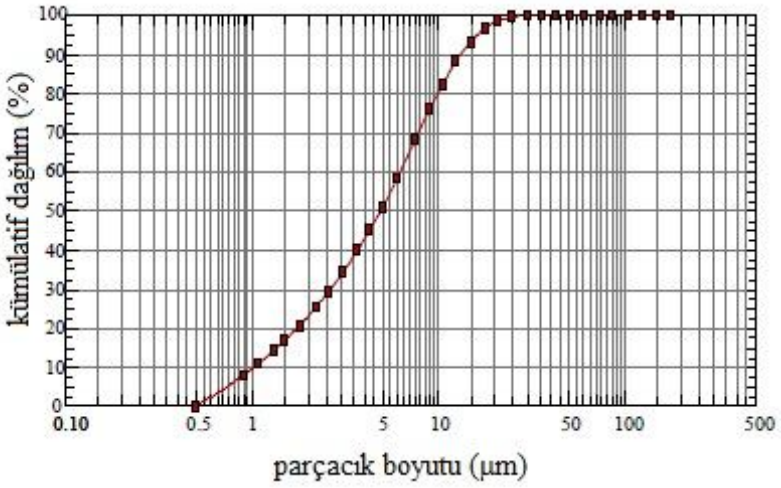
4. MATERYAL VE METOT

4.1. Sentetik ham suyun hazırlanışı ve depolanması

Filtre edilecek sentetik ham suyun hazırlanmasında Mikron's (Mikron's Co., İstanbul) firmasından temin edilen "Mikron's Kaolin 5" isimli kaolin kullanılmıştır. Kaolinin fiziksel/kimyasal özellikleri ve elek analizi grafiği sırasıyla Tablo 4.1 ve Şekil 4.1'de verilmiştir. 40 g kaolin balon jojeye alınarak, saf su ile 1,000 ml'ye tamamlanıp stok çözelti hazırlanmıştır. Sentetik ham su hazırlanırken bu stok çözelti homojen bir şekilde karıştırılarak 3 m^3 hacminde şebeke suyuna ilave edilmiştir. Hazırlanan bu ham suyun bulanıklığı yaklaşık 10 NTU'dur. Bu bulanıklık değeri, deneylerde kullanılan direkt filtrasyon prosesi için uygundur [National Research Council, 1997]. Bununla beraber, her deney öncesi parçacık sayısı da ölçülmüş, ortalama olarak 2-5 mm ve >5 mm boyutlarındaki parçacıklar için sırasıyla bu değerler (19,713 ± 76) ve (12,725 ± 152) şeklinde elde edilmiştir. Şebeke suyu, deney süresince 3 m^3'lük hacme sahip polietilenden yapılmış 150 cm çapında ve 180 cm yüksekliğindeki dairesel su tankında depolanmıştır. Tanktaki ham suyun bulanıklığını sabit tutmak amacıyla tank içerisine yerleştirilen motorlu bir karıştırıcı yardımıyla deney boyunca 300 rpm hızında karıştırma yapılmıştır. Tanktaki su deneylerde tüketildikçe, şebeke suyu ve kaolin ilave edilerek tamamlanmıştır.

Tablo 4.1. Sentetik bulanıklık hazırlamada kullanılan kaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	**Değeri**
Kimyasal özellikleri	
SiO_2	< % 76
Al_2O_3	> % 15
Fe_2O_3	< % 0.5
HCl'de çözünmeyen	% 85
Fiziksel özellikleri	
Yoğunluk (ISO 787-10)	2.6 g/cm^3
Sertlik	2.2 mohs
pH değeri (ISO 787-9)	7
Tane boyut dağılımı	
d_{50} (ortalama boyut)$_{max.}$	5.5 µm
d_{97} (en büyük tane)$_{max.}$	26 µm
2 µm altı tanecikler$_{min.}$	% 24
45 µm elek bakiyesi (ISO 787-7)$_{max.}$	% 0.1



Şekil 4.1. 45 mm elek bakiyesi ((ISO 787-7)$_{max.}$: % 0.1).

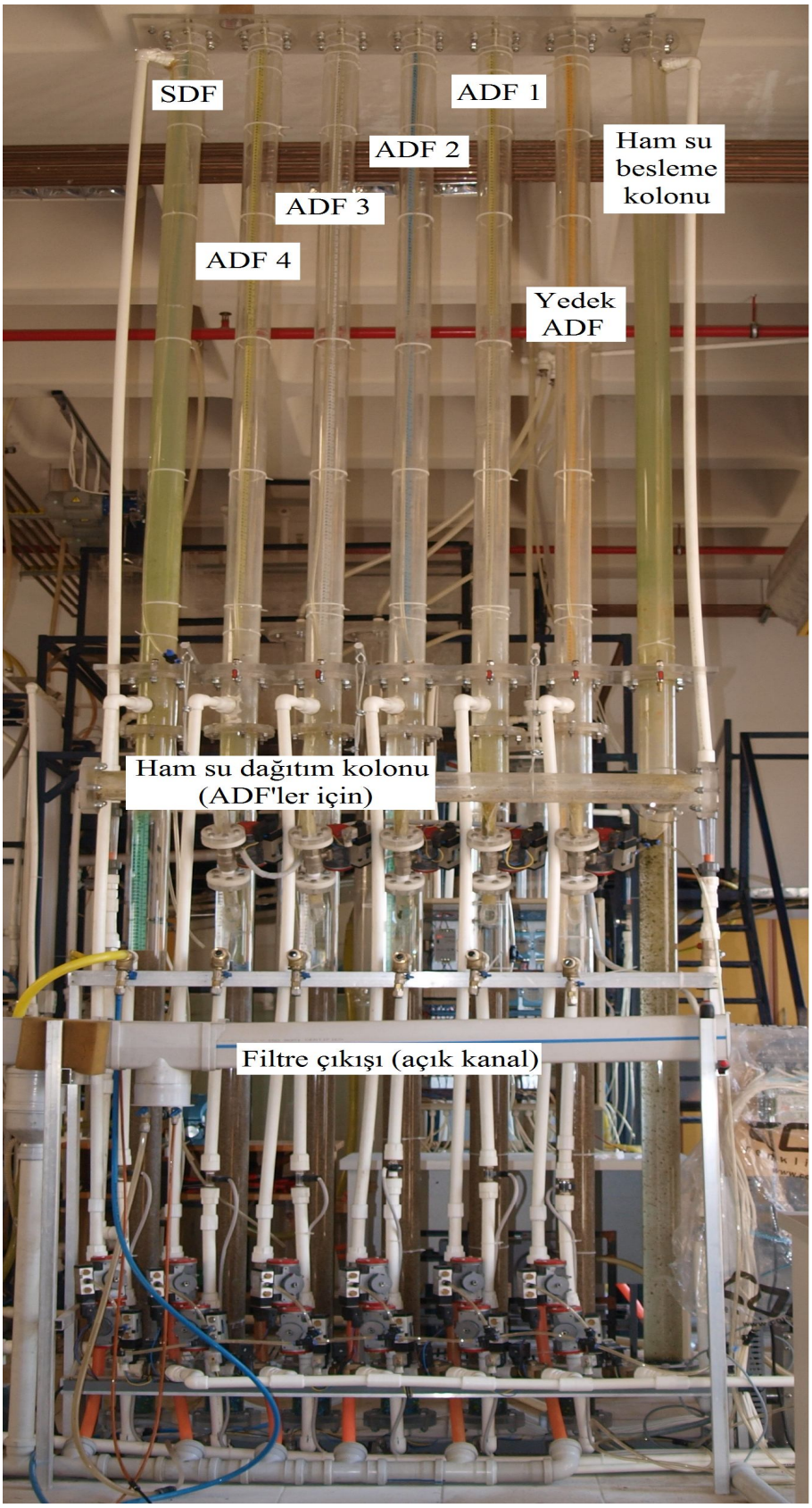
4.2. Filtre malzemesinin (kumun) özellikleri

Filtre malzemesi olarak kullanılan kum, İSKİ'nin Kâğıthane Su Arıtma Tesisleri'nden temin edilen ve İstanbul'daki bütün arıtma tesislerinde kullanılan 0.8-

1.25 mm çapında silisli kumdur. Efektif çapı 0.82 ve üniformluk katsayısı 1.45'tir. Bu değerler filtre kumu için gerekli kriterlere uygundur [AWWA, 1990]. Bu özellikler belirlenirken Restch marka elekler kullanılmıştır. Filtre kolonlarının her birinin eşdeğer özellikte olabilmesi için içerisinde yer alan filtre malzemesinin de eşdeğer özellik ve miktarlarda olması gerekmektedir. Bu amaçla her kolona, tartılarak eşit ağırlıkta (6 kg) kum konulmuştur. Kum yatağının yüksekliği 109 cm'dir ve bu yükseklik her geri yıkamadan sonra tekrar temin edilmiştir.

4.3. Sabit debili ve azalan debili filtre düzenekleri

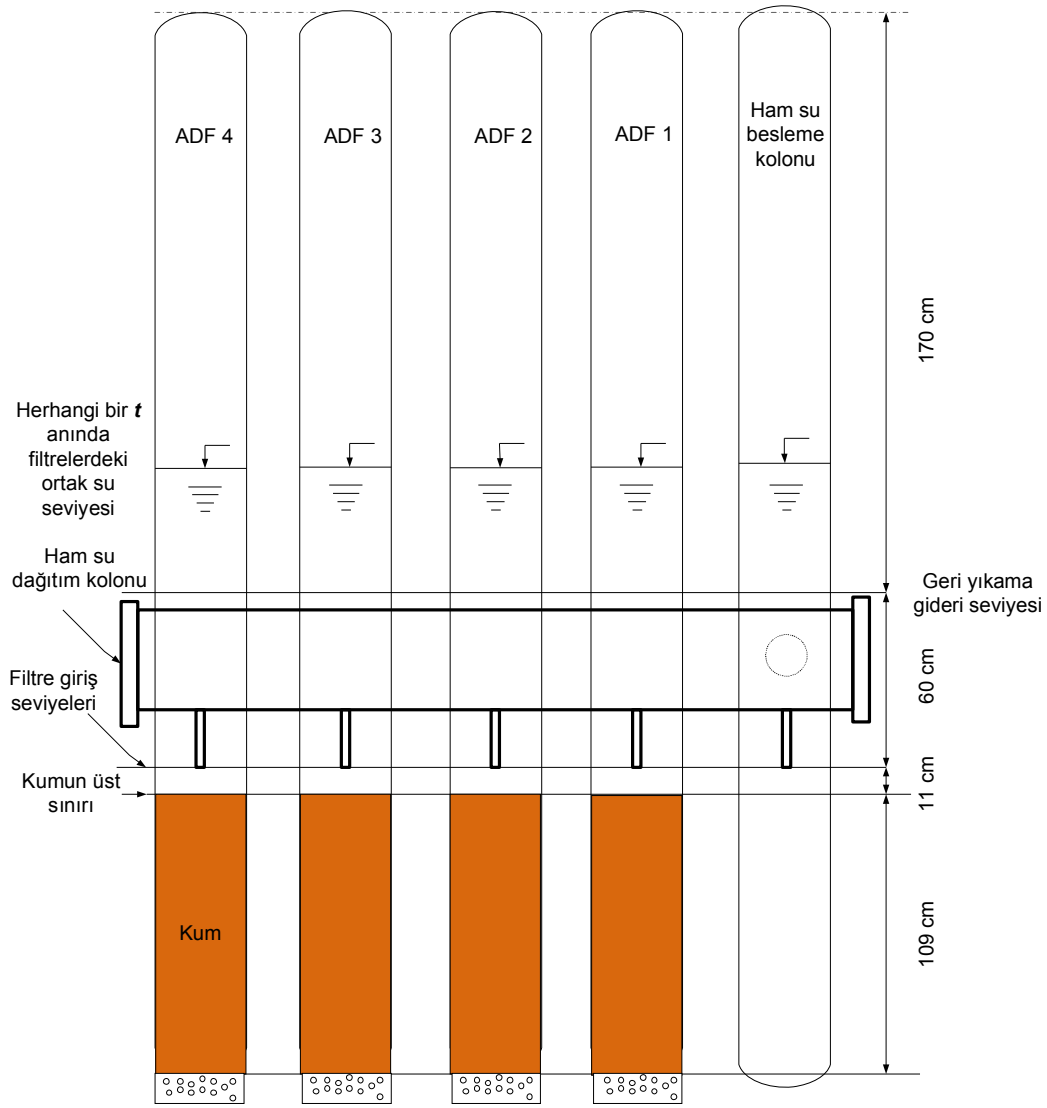
Pilot tesiste 7 adet 7 cm iç çapına sahip eşdeğer özellikte pleksiglas kolonlar kullanılmıştır. Bunlardan 4 tanesi azalan debili filtre (ADF) olarak, 1 tanesi karşılaştırma yapabilmek amacıyla sabit debili filtre (SDF) olarak düzenlenmiştir. 1 tanesi de ADF'lere ham su beslemesi yapacak olan ana kolondur. Geriye kalan diğer kolon ise ADF'lerden birisi geri yıkamaya alındığında işletmeye alınabilecek yedek filtre olarak yerleştirilmiştir. Deney düzeneği, ileriki aşamalarda ADF kolonu sayısını artırmaya müsait olarak inşa edilmiştir. Düzeneğin fotoğrafları Şekil 4.2 ve 3.3'de, ADF kısmının şematik gösterimi ise çeşitli açılardan Şekil 4.4 ve 3.5'de sunulmuştur.



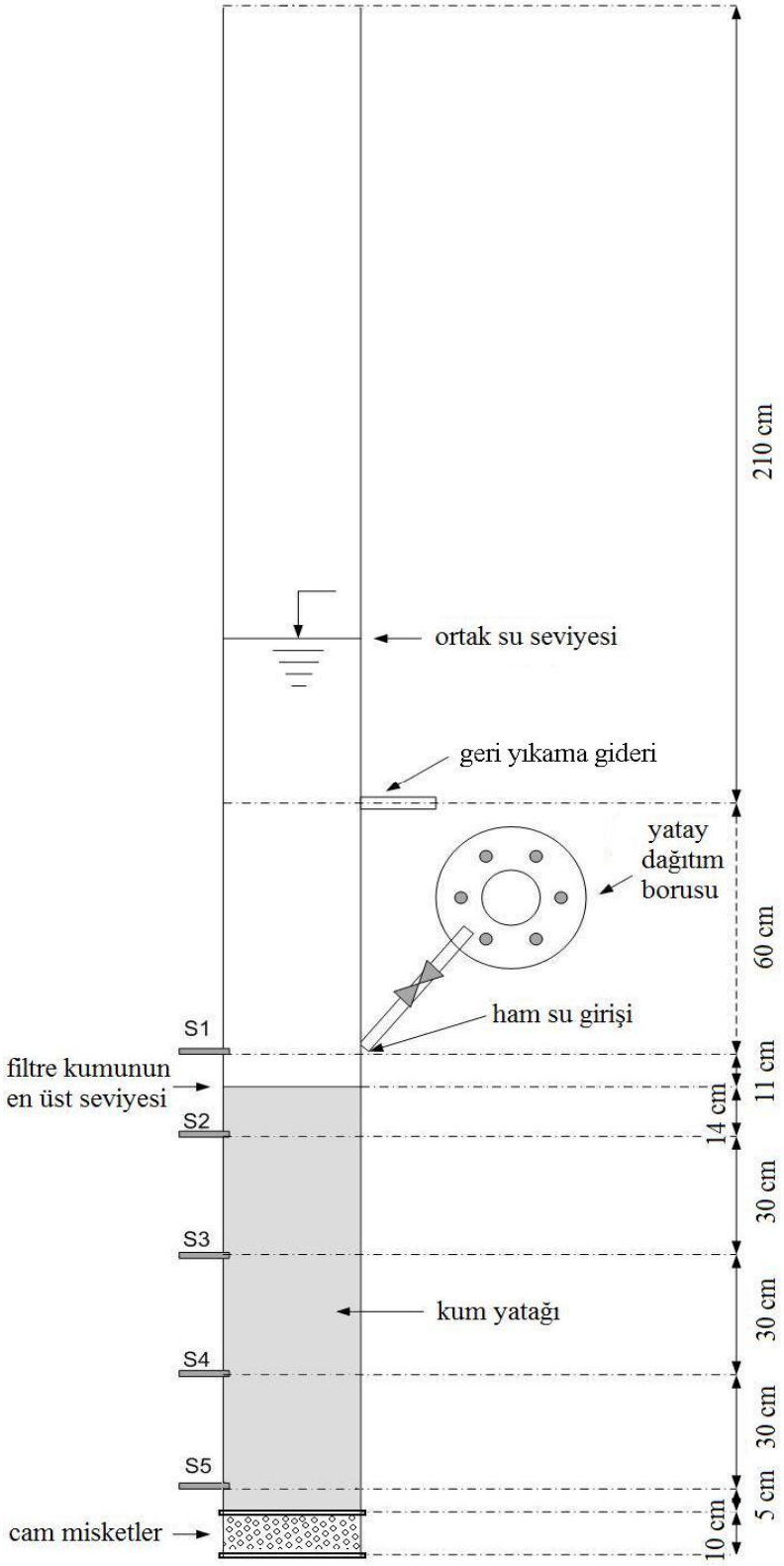
Şekil 4.2. Deneylerin yapıldığı pilot tesis (önden görünüş).



Şekil 4.3. Deneylerin yapıldığı pilot tesis (arkadan görünüş).

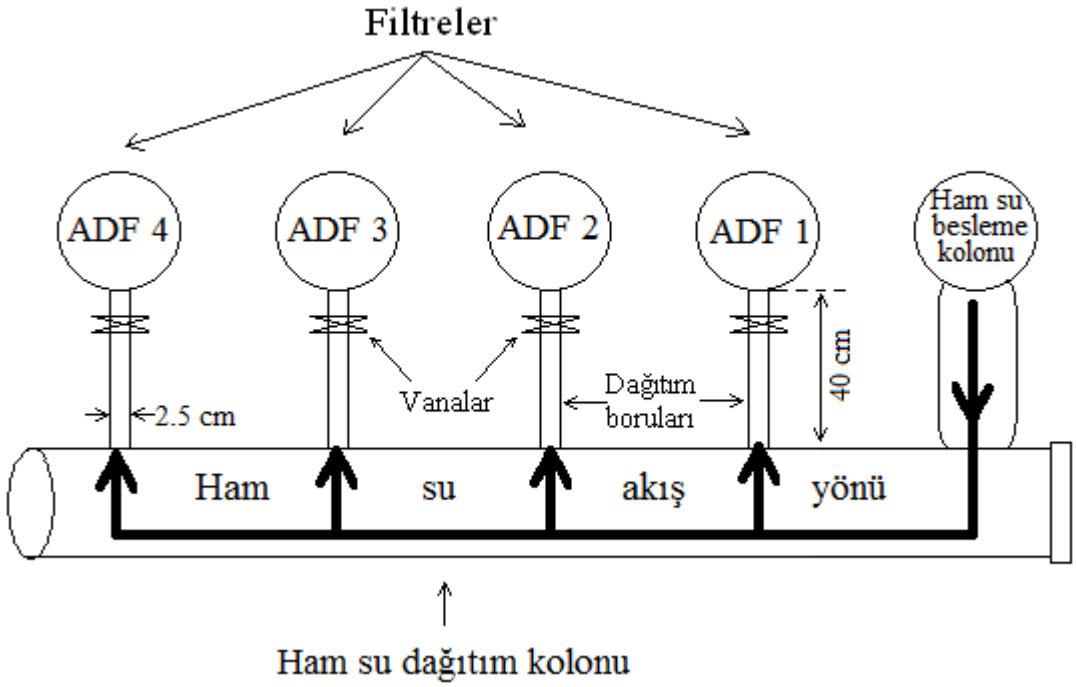


Şekil 4.4. Pilot ADF düzeneğinin şematik gösterimi (önden görünüş).



Şekil 4.5. ADF sisteminin şematik olarak yandan görünüşü (S1-S5 basınç sensörlerini temsil etmektedir, uzunluklar birimler arasındaki mesafeleri göstermektedir).

Ham su dağıtım kolonundan filtrelere yapılacak besleme, 2.5 cm çapında ve 40 cm uzunluğundaki 4 adet eşdeğer dağıtım borusu ile gerçekleştirilmektedir. Geri yıkamada kumun giriş yapısından kaçmasını engellemek için dağıtım boruları eğimli yapılmıştır. Ayrıca bu borular üzerinde yer alan solenoid vanalar da, geri yıkamaya geçildiğinde otomatik olarak kapalı konuma geçtiklerinden filtre malzemesinin kaçışı engellenmektedir. Dağıtım borularının şematik gösterimi Şekil 4.6'da verilmiştir. İlgili kısmın fotoğrafları da farklı açılardan Şekil 4.7 (a), (b), (c) ve (d)' de gösterilmektedir.

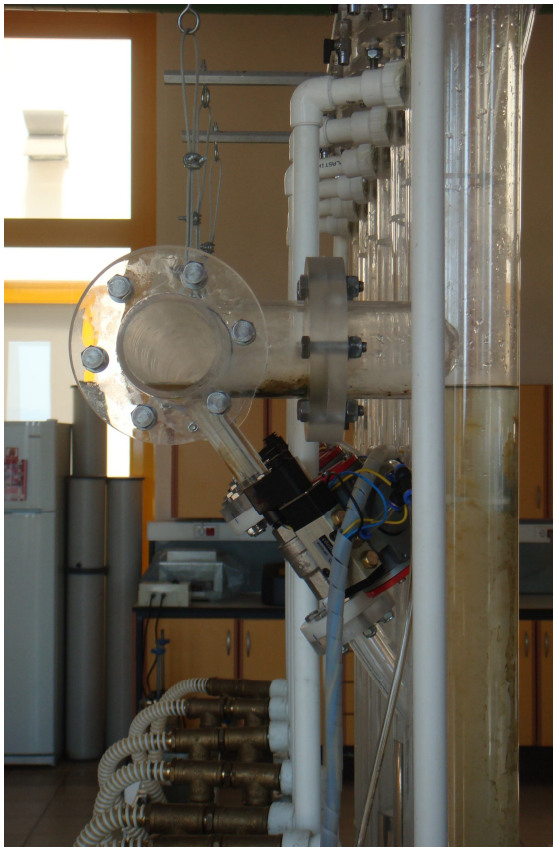


Şekil 4.6. Pilot ADF sisteminin üstten görünüşü.



(a)





(b) (c)

Şekil 4.7. Pilot ADF sistemine ait dağıtım borularının çeşitli açılardan görünümü.

4.4. Filtrasyon prosedürü

Hem SDF hem de ADF sistemleri, çöktürme tankı içermeyen ve katı maddelerin filtre yatağı derinliklerinde tutulduğu direkt filtrasyon modunda işletilmiştir. Direkt filtrasyon, giriş suyu bulanıklığının, parçacık sayısının, renk ve organik madde içeriğinin uygun olması halinde uygulanabilen ve çöktürme tankı da içermediğinden ekonomik olan bir prosestir. Proses öncesinde giriş hattı üzerinde kimyasal ilave edilebileceği gibi ayrı bir yumaklaştırıcı ünitesi de kullanılabilir. Kimyasal ilave edilen su, sonrasında filtreden geçirilir [Petrusevski, 1996]. Ortalama bulanıklığı 10 NTU'yu geçmeyen yüzeysel sular için direkt filtrasyon prosesi tercih edilebilir [National Research Council, 1997]. Bu çalışmadaki deneylerde kullanılan şebeke suyu Ömerli Barajı'ndan temin edilmektedir. İSKİ'nin İstanbul Su Kalitesi Raporu'na göre Ömerli'deki yüzeysel su –aşırı yağışla karşılaşılması durumu haricinde- yüksek kaliteli, düşük bulanıklık ve sertliğe sahip bir ham su olarak nitelendirilmektedir [İSKİ, 2012]. Bu sebeple bu çalışmada hazırlanan suyun, çalışmanın yapıldığı bölgeyi temsil edebilmesi amacıyla bulanıklığı 10 NTU olarak ayarlanmış ve proses olarak da direkt filtrasyon tercih edilmiştir.

Ham suyun depolandığı rezervuarda deney süresince karıştırılan ham su, tankın alt kısmındaki çıkış vanasına bağlı bir pompa (Elettro Meccanica Conforto, 0.75 kW) yardımıyla zeminden 385 cm yükseklikte bulunan sabit yük tankına gönderilmiş ve buradan iki adet eşdeğer özellikte pompa (Mur-Cell, 0.37 kW) ile ayrı ayrı sabit debili ve azalan debili filtre kolonlarına iletilmiştir. Sabit yük tankı kullanımı sayesinde filtrelere ham su ileten pompaların basma verimleri sabit tutulmakta ve filtrelere gelen ham su debisi hiçbir zaman ham su rezervuarındaki seviye değişiminden etkilenmemektedir. Dolayısıyla filtre giriş debisi sabit kalmaktadır. Filtre kolonlarına gelen su, sabit debili ve azalan debili filtre sistemleri ana girişinde bulunan eşdeğer şiber vanalar ve rotametreler yardımıyla istenilen filtrasyon debisine ayarlanmıştır. Böylelikle sabit debili filtreye gelen ham su debisi ile azalan debili filtrelere gelen ortalama ham su debisi eşit tutulmaya çalışılmıştır.

Filtrasyon prosedürü sırasıyla şu şekildedir: Filtrasyon başlatılırken kontrol panelinden verilen komut ile sabit yük tankındaki ham suyu filtrelere iletmek üzere pompa çalıştırılır. Filtre giriş hattında bulunan (SDF'de kolonun en üst kısmından ham su besleyen giriş hattı, ADF'lerde ise eğimli dağıtım boruları) solenoid valfler (AMISCO EVI, 5M/13, 12 V DC bobin ve ATG-NMR1 solenoid valf) yardımıyla ham su girişi başlatılır. Aynı filtre çıkışı da aynı komutla açılır. Komut verilmediğinde (stand-by modunda iken) bütün solenoid valfler kapalı konumdadır. Ancak kontrol panelinden verilecek bir komutla açık hale getirilir. Dolayısıyla filtre tabanındaki geri yıkama giriş hattı ve filtre kumunun 71 cm üzerinde yer alan geri yıkama gideri kapalı konumdadır.

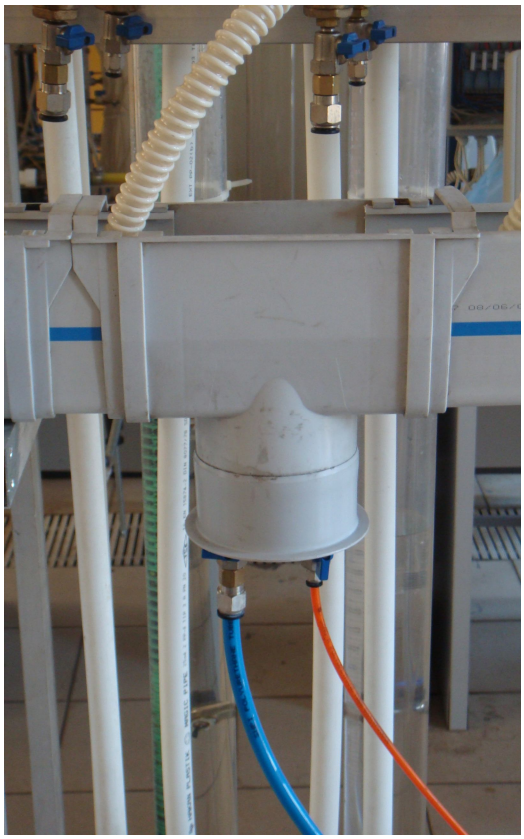
ADF sisteminde ham su, besleme kolonunun üst kısmından sisteme girmekte ve yatay dağıtım kolonunu doldurduktan sonra eğimli dağıtım boruları yardımıyla kum yatağının 11 cm üzerinden giriş yaparak, kum yatağından, elekten ve destek tabakasından geçerek çıkış yapısına yönelmektedir. Deney boyunca ham su girişi, anlık su seviyesinin daima altında bir seviyede gerçekleşmektedir. SDF kolonunda ise ham su, kolonun en üst kısmından giriş yapmakta ve deney boyunca seviyesi daima anlık su seviyesinin üstünde bir seviyede kalmaktadır. Filtre kolonları atmosfere açıktır.

Filtre çıkışları Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Çıkış yapısını oluşturan dairesel boruların alt cidarları, her bir kolonda filtre kumunun üst seviyesi ile aynı seviyededir. Filtrat açık bir kanala (düzenekte yağmur oluğu kullanılmıştır) dökülmektedir. Her filtre çıkış hattı üzerinde ayrıca iki adet vanalı çıkış bırakılarak bulanıklık ölçer ve parçacık sayıcısına bağlantı sağlanmıştır. Böylece istenildiği zaman filtrelerde birbirinden bağımsız olarak online bulanıklık ve parçacık sayısı değişimi izlenebilmektedir.



Şekil 4.8. Filtre çıkışları ve filtratın döküldüğü açık kanal.

Bütün ADF'lerin filtratlarının eğimli açık kanal içinde birleştiği noktada iki adet vanalı çıkış açılarak ADF çıkışlarının toplamının bulanıklığı ve parçacık sayıları ölçülebilmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Açık kanalda azalan debili filtrelerin çıkış sularının birleştiği noktadaki bulanıklık (mavi hat) ve parçacık ölçer (turuncu hat) cihazlarına giden hatlar.

4.5. Geri yıkama prosedürü

Kirlenen bir filtrenin ne zaman geri yıkanacağına (bir başka deyişle filtrasyonun ne kadar sürdürüleceğine) genellikle üç şekilde karar verilir:

1. Yük kaybı dikkate alınarak (Yük kaybı çok yüksek olduğunda, arzu edilen hızda (debide) filtrat üretilemeyeceğinden belli bir yük kaybına ulaşıldığında filtre geri yıkanmalıdır),

2. Filtrat kalitesi takip edilerek (Çıkış suyu bulanıklığı ve/veya parçacık sayısı, standart değeri aştığında filtre devreden çıkarılarak geri yıkanmalıdır, örneğin bir filtre sisteminde filtrelerin ortak çıkış suyu bulanıklığı en çok 0.3 NTU olmalı, ancak sistemdeki bir filtrenin çıkış

suyunun 0.1 NTU'yu geçmesi halinde geri yıkanmaya alınması operatörün arıtma sistemindeki muhtemel bir probleme zamanında müdahale edebilmesi açısından iyi olur) [US EPA, 2002]. SD filtrelerde filtrasyonun ilerleyen zamanlarında filtrenin katı maddelerle dolmasına bağlı olarak filtre yatağındaki gözeneklerin boyutu/çapı küçülmekte ve filtre ortamından geçen sıvıya karşı bir direnç meydana gelmektedir. Eğer filtrede bu direnci yenebilecek ve hızın (debinin) normal olarak devam etmesini sağlayacak (gerekli) yük sağlanmışsa, daralmış filtre yatağı gözeneklerinden geçen sıvının hızı artmakta ve bu artış filtre yatağında birikmiş katıları tutundukları filtre malzemesinden koparıp çıkış suyuna (rezervuara) taşıyabilmektedir. Böylelikle filtrat kalitesi bozulmakta ve çıkış suyunda gerçekleştirilen bulanıklık (ve/veya parçacık sayısı) ölçümlerinde artışa rastlanmaktadır. SD fitrelerinde görülen bu tipik bulanıklık artışı, "breakthrough" olarak adlandırılmaktadır (ADF sistemlerinde ise hız kademeli ve yavaş yavaş azaldığı için, filtre zamanla kirlenip kısmen tıkandığında bile çıkış suyuna katı madde kaçışı gerçekleşmemektedir).

3. Operatörün belirlediği süre uygulanarak (İlk iki madde kadar yaygın olmasa da filtre operatörü sayısı veya çalışma koşullarına göre 12-18-24 saatlik filtrasyon süreleri seçilebilmektedir. Bu süre sonunda yük kaybı ya da çıkış suyu kalitesi dikkate alınmaksızın (filtrasyon süresince su kalite standartları zaten sağlanmakta ise) filtre otomatik olarak ya da operatörün müdahalesiyle geri yıkamaya alınır).

Bu tez çalışması kapsamında yukarıdaki üçüncü maddeye göre filtreler işletilmiştir dolayısıyla SD filtresinde "breakthrough" meydana gelmesi beklenmeden (24 saat sonunda) geri yıkama yapılmıştır.

Geri yıkama suyu şebekeden temin edilmektedir. Şebeke suyu 2 m^3'lük hacme sahip polietilenden yapılmış yatay bir su tankında depolanmakta ve geri yıkama başlatıldığında bir pompa (Mur-Cell, 0.37 kW) vasıtasıyla filtreye iletilmektedir. Geri yıkama suyunu homojen bir şekilde dağıtacak ve filtre yatağına destek olacak malzemenin (7 mm cam misket kullanılmıştır) yüksekliği filtre kolonu tabanından 10

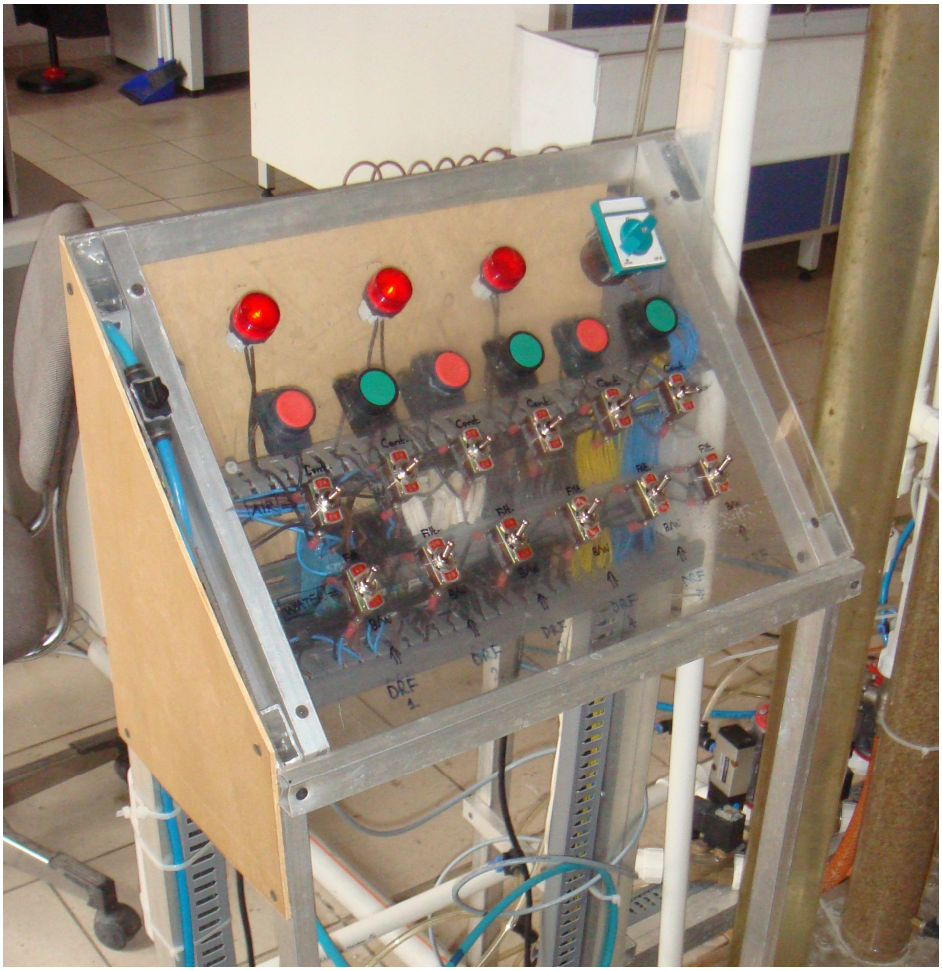
cm'dir ve üzerinde paslanmaz elek yer almaktadır. Eleğin üzerinde de kum yatağı bulunmaktadır.

Her bir deneyde SDF ile ADF sistemindeki filtrelerin geri yıkama sıklığı ve süreleri eşit tutulmuştur. Örneğin SDF 24 saatte bir geri yıkanıyorsa ADF sisteminde de 4 filtre olduğu için birbirini takip eden iki filtre arasındaki filtrasyon süresi (geri yıkama sıklığı) 6 saattir. Böylece her ADF filtresine 24 saatte bir geri yıkama sırası gelmektedir.

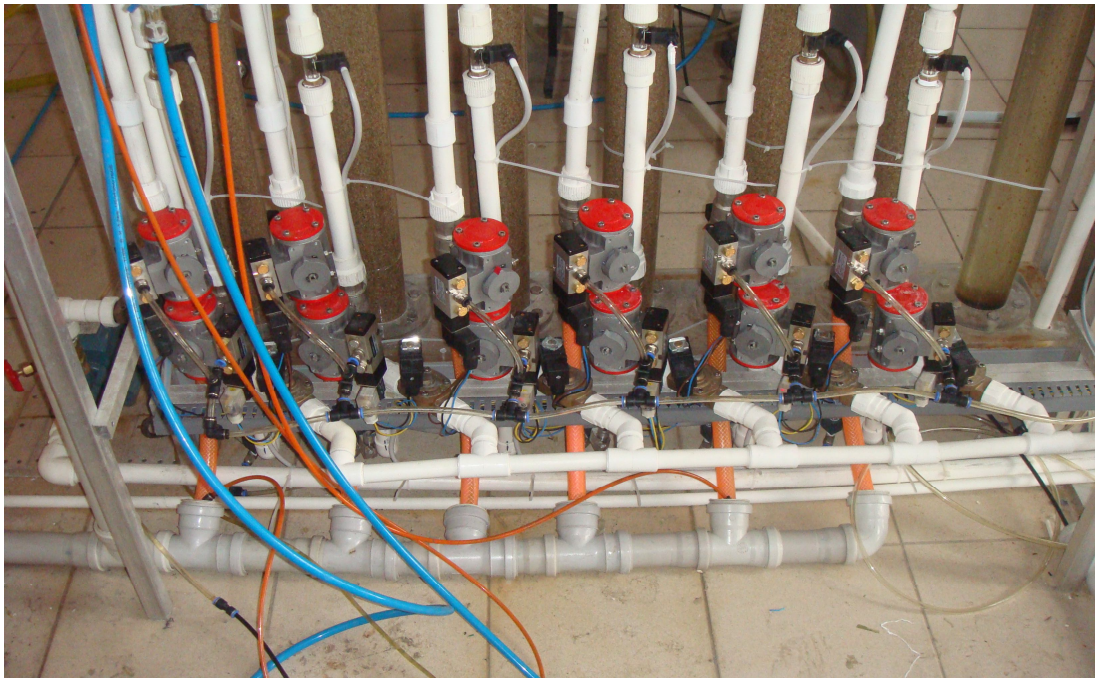
Geri yıkanacak filtrede kontrol panelinden verilen komut ile filtre giriş hattında bulunan (SDF'de kolonun en üst kısmından ham su besleyen giriş hattı, ADF'lerde ise eğimli dağıtım boruları) solenoid valfler (AMISCO EVI, 5M/13, 12 V DC bobin ve ATG-NMR1 solenoid valf) yardımıyla ham su girişi durdurulur. Aynı zamanda geri yıkanan filtrenin filtre çıkışı da aynı komutla kapatılır. İkinci bir komutla benzer valf sistemi (AMISCO EVI, 5M/13, 12 V DC bobin ve GEVAX solenoid valf) yardımıyla filtre tabanındaki geri yıkama giriş hattı ve filtre kumunun 71 cm üzerinde yer alan geri yıkama gideri açılır. Geri yıkama işlemi bittiğinde bu işlemlerin tersi uygulanarak filtre tekrar işletmeye alınır.

Filtre geri yıkama hızı 35 m/saat olarak ayarlanmıştır. Filtrelerde geri yıkama sonucu oluşan kum yatağı genleşmesinin yaklaşık 30 cm (yaklaşık % 30 yatak genleşmesi) olduğu görülmüş, filtrasyon başlamadan önce filtre ortamı 109 cm kum yatağı olacak şekilde lastik bir tokmak ile filtre kolonuna vurmak sûretiyle sıkıştırılmıştır.

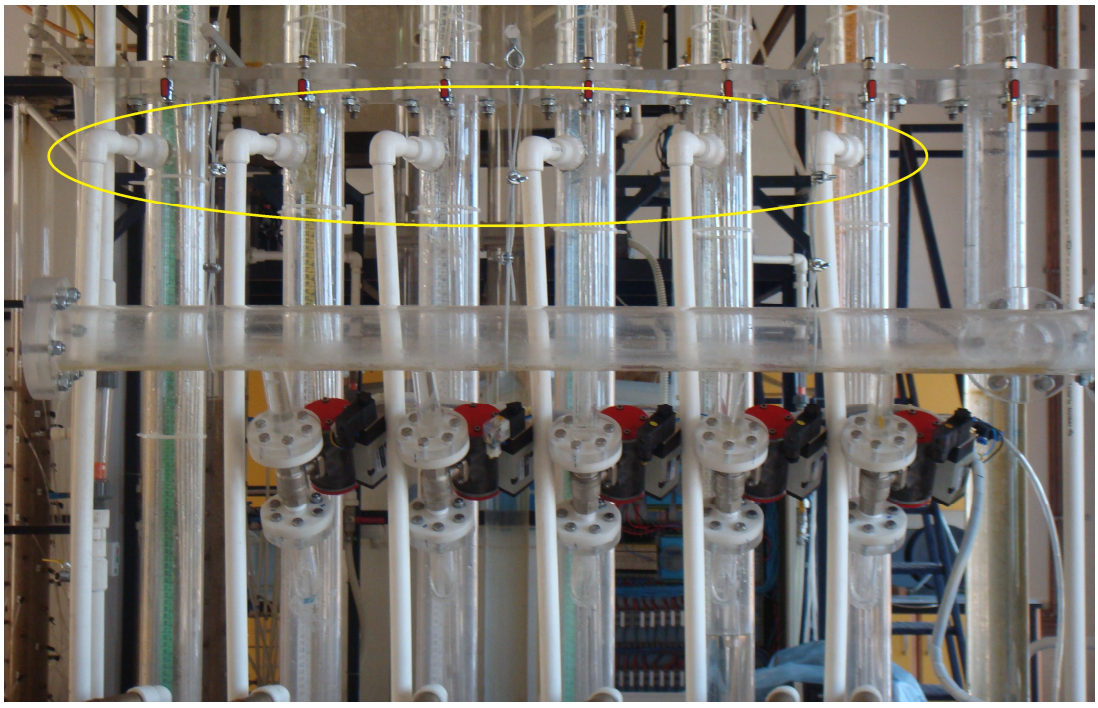
Geri yıkama tesisatı içerisine hava girişi de konularak, geri yıkamada hava kullanılmasına da olanak tanınmıştır. Hava ile geri yıkama sistemi filtrasyon ve geri yıkamada olduğu gibi kontrol panelinden (Şekil 4.10) yönetilebilmekte ve kesikli ya da sürekli hava vererek geri yıkama yapılabilmektedir. Geri yıkama giriş ve çıkış tertibatları Şekil 4.11 ve 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Pilot tesis kontrol paneli.



Şekil 4.11. Filtre tabanında yer alan geri yıkama suyu giriş tertibatı (solenoid vanalar).



Şekil 4.12. Kum yatağının (71 cm) yukarısında yer alan geri yıkama giderleri.

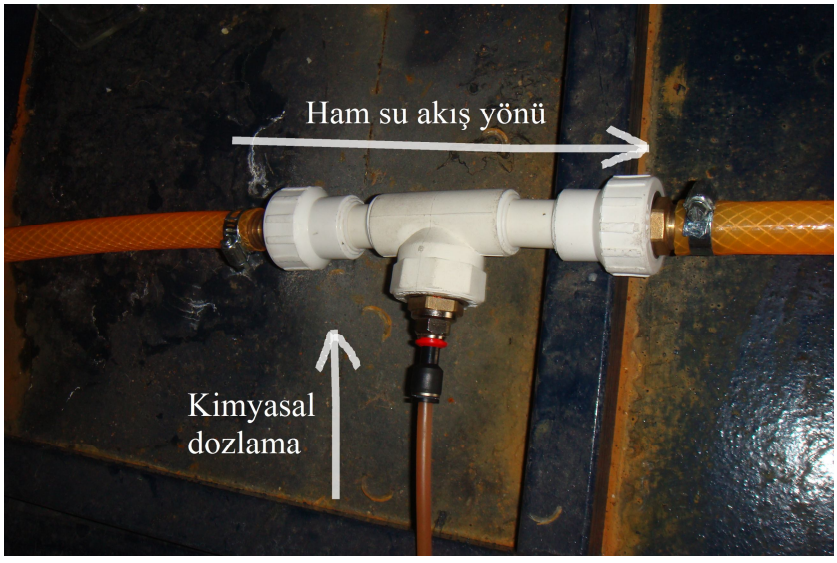
4.6. Yumaklaştırıcı çözeltisinin hazırlanması ve dozlama prosedürü

Kimyasal ilâvesi, sabit yük tankından filtre kolonlarına gelen ham su hattı üzerinde oluşturulan dozlama noktasından sıvı çözelti olarak uygulanmıştır (Şekil 4.13). Bu işlem bir solenoid pompa ile (Prominent Gamma L, 17 W) gerçekleştirilmiştir. Çözelti aşağıdaki formüle göre hazırlanmıştır:

$$A = \frac{D \times C}{B} \tag{4.1}$$

Burada,

A: Yumaklaştırıcı dozajı (mg/L) (filtreye giriş yapan ham sudaki miktar)
B: Ham su debisi (L/sa)
C: Yumaklaştırıcı çözeltisinin debisi (L/sa)
D: Sıvı yumaklaştırıcı çözeltisi hazırlamada gerekli alum miktarı (mg/L)



Şekil 4.13. Filtre giriş hattı üzerinde yumaklaştırıcı dozlanması.

4.7. Analitik ölçümler

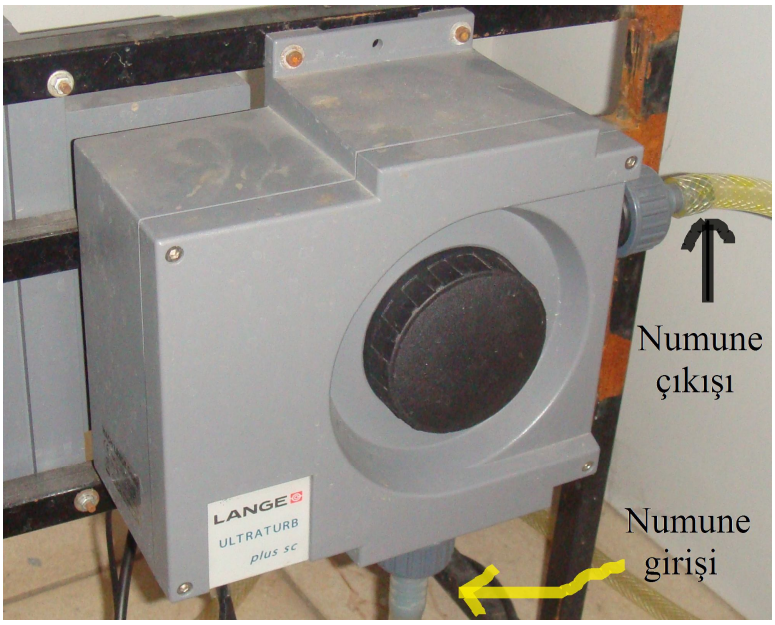
4.7.1. Bulanıklık ve Parçacık Sayısı Ölçümü

Ham su rezervuarı ile filtreler arasında bulunan giriş hattından deney boyunca her 30 dakikada bir numune alınarak giriş suyu bulanıklığı ölçülmüştür. Ölçümde nefelometrik ölçüm prensibine dayanan taşınabilir bulanıklık ölçer (HACH Co., Model 2100P) kullanılmıştır. Bu cihazla yapılan ölçümler US EPA (Çevre Koruma Ajansı)'nın 180.1 no'lu metot kriterlerine uygundur.

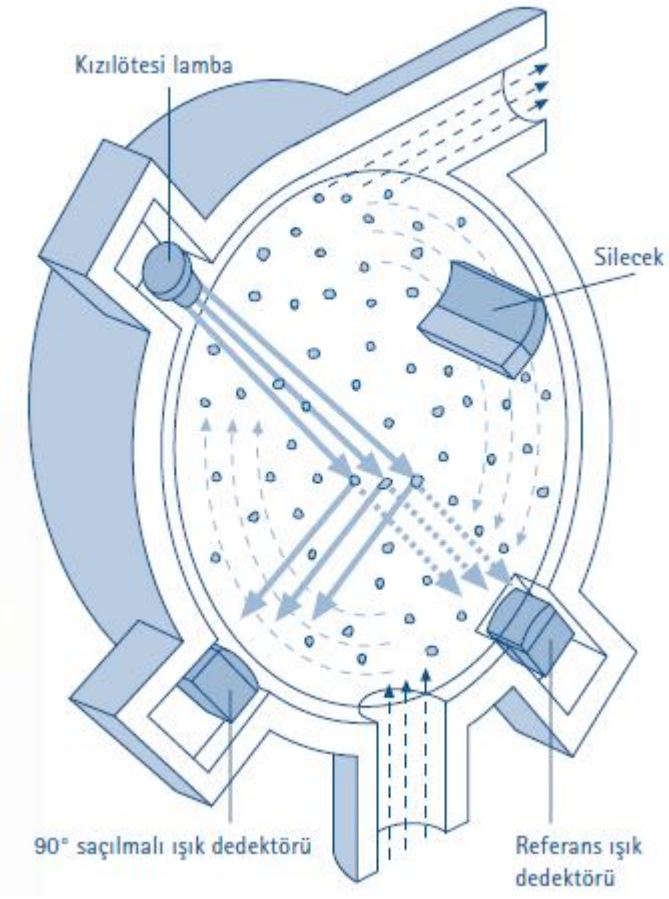
Filtre edilen suda ise sürekli (online) olarak bulanıklık ve parçacık sayısı ölçümü yapılmış, ölçümlerde sırasıyla Hach–Lange Ultraturb Plus SC bulanıklık ölçer (türbidimetre)ve Hach-Lange WPC–22 parçacık sayıcı (Şekil 4.14-3.17) kullanılmıştır. Bu ölçümler online olarak Hach-Lange SC1000 (Şekil 4.18) monitöründen izlenmiş ve bilgisayara kaydedilmiştir. Bulanıklık ölçümü 5 dakikada bir, parçacık sayısı ölçümü ise dakikada bir raporlanmaktadır. Bulanıklık ölçer cihazının teknik özellikleri Tablo 4.2 ve çalışma prensibinin şematik gösterimi Şekil 4.16'da gösterilirken, parçacık sayıcı ile ilgili olanlar ise Tablo 4.3 ve Şekil 4.17'de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Bulanıklık ölçer cihazı teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
Bileşenler	Mikroişlemci kontrollü bulanıklık Bypass sensörü
Ölçüm yöntemi	90° kızıl ötesi empülsiyonlu dağılma ışığı yöntemi; DIN EN ISO 7027'ye göre, 860 nm.
Ölçüm aralığı	0.0001–1000 FNU (TE/F, NTU, FTU) serbest olarak programlanabilir.
Hassasiyet	Ölçüm değerinin ±0.008 FNU ya da ± %1'i (0–10 FNU).
Tekrar edilebilirlik	Ölçüm değerinin ±0.003 FNU ya da ± %0.5'i (0-2 FNU).
Tepki verme süresi	1–60 s (programlanabilir).
Kalibrasyon	(Formazin, StablCal, Katı madde standardı CVM'ye doğrulama).
Numune akışı	Minimum 0.2 L/dakika, maksimum 1 L/dakika, Maksimum 6 bar (20 °C'de).
Numune sıcaklığı	Maksimum 50 °C.
Çevre sıcaklığı	+2 °C ila +40 °C.
Numune bağlantısı	Hortum ID 13 mm ya da G + F sistem parçalarıyla sabit bağlantı.
Ölçüm odasının otomatik temizlenmesi (sadece *plus* versiyonunda)	Otomatik silecek temizliği, zaman ve ihtiyaç kumandalı.
Hammaddeler	Ölçüm penceresi: Kuvars Ölçüm odası: Noryl GFN2 Silecek aksı: Paslanmaz çelik 1.4571 Silecek profili: Silikon.
Ölçüler	(G × Y × D) 250 × 240 × 110 mm.



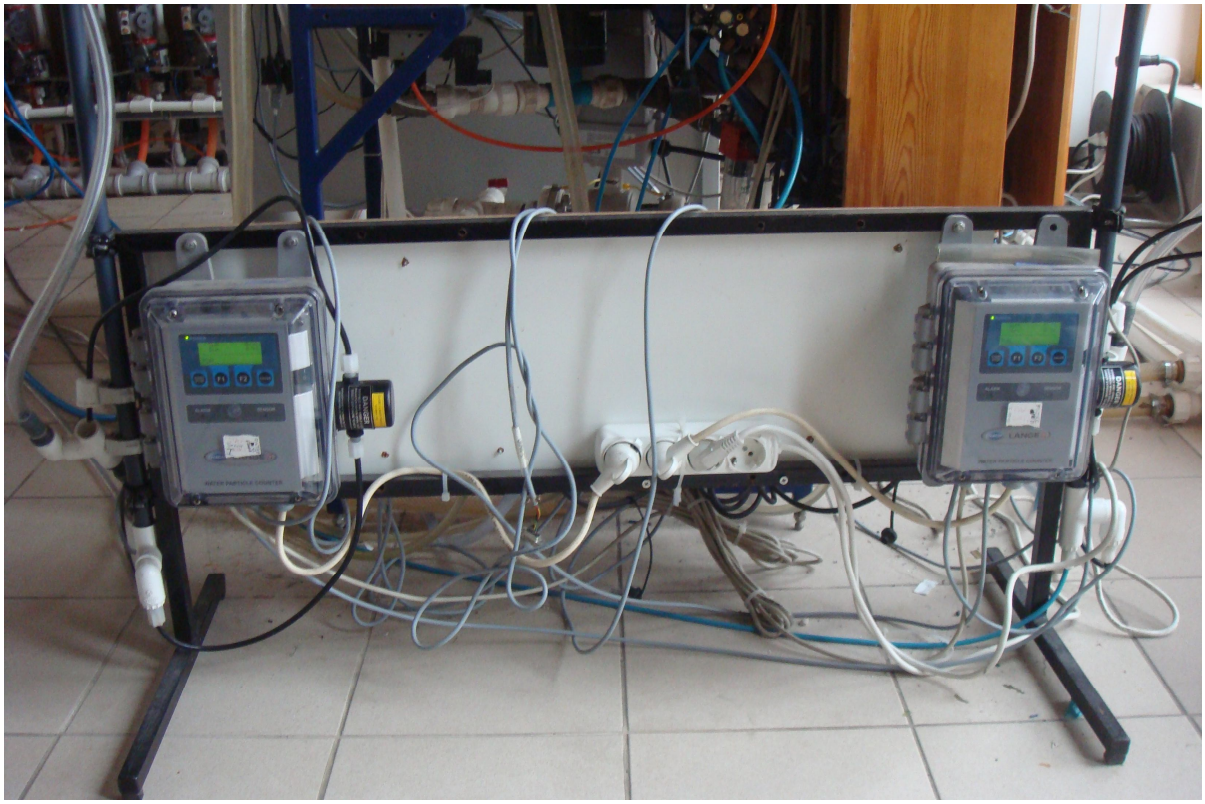
Şekil 4.14. Online bulanıklık ölçer.



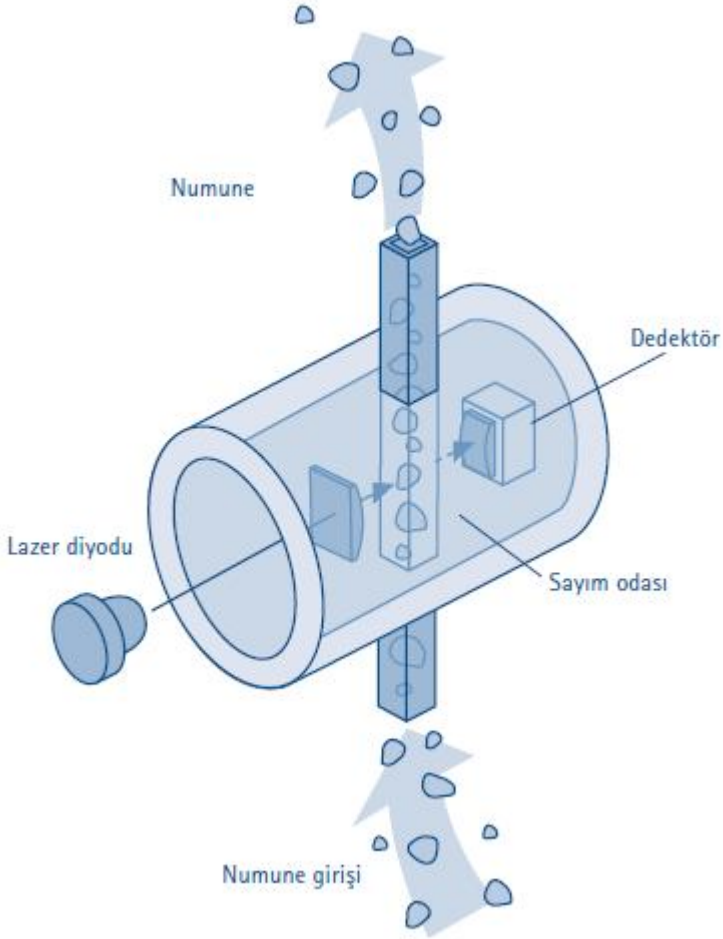
Şekil 4.15. Bulanıklık ölçer çalışma prensibi.

Tablo 4.3. Parçacık sayıcı cihazı teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
Ölçüm cihazı ve model no.	ARTI WPC-22 partikül sayıcı, LXV436
Partikül boyutu	2; 5; 7; 10; 15; 25; 50; 100 µm
Numune akışı	90-110 mL/dakika
Kalibrasyon	Suda PSL (polistren lateks küreler) ile kalibre edilirler; numune akışı 100 mL/dakika
Uyuşma hataları	15.000 partikül/mL'de %10 kayıp
Çevre sıcaklığı	0–45°C
Numune sıcaklığı	0–50°C
Ölçüm yöntemi	Işık blokajı
Işık kaynağı	Lazer diyodu, 780 nm
Birim	Partikül sayısı/mL



Şekil 4.16. Online parçacık sayıcılar.



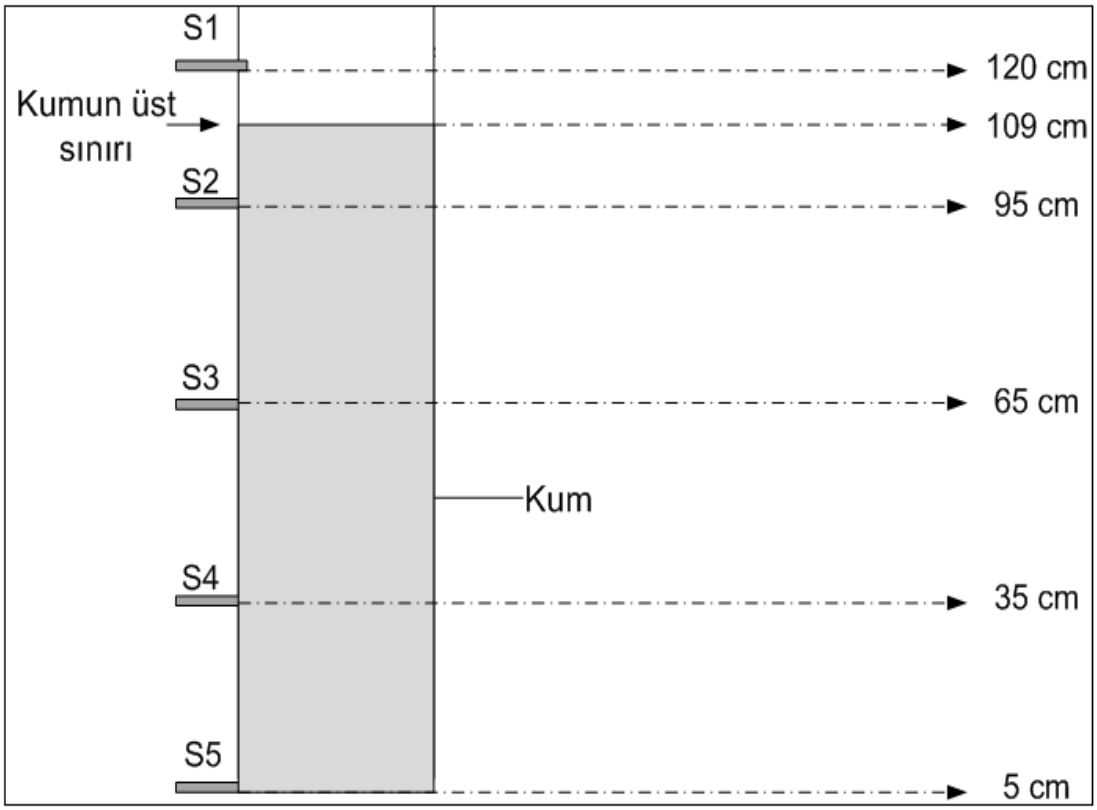
Şekil 4.17. Parçacık sayıcı çalışma prensibi.



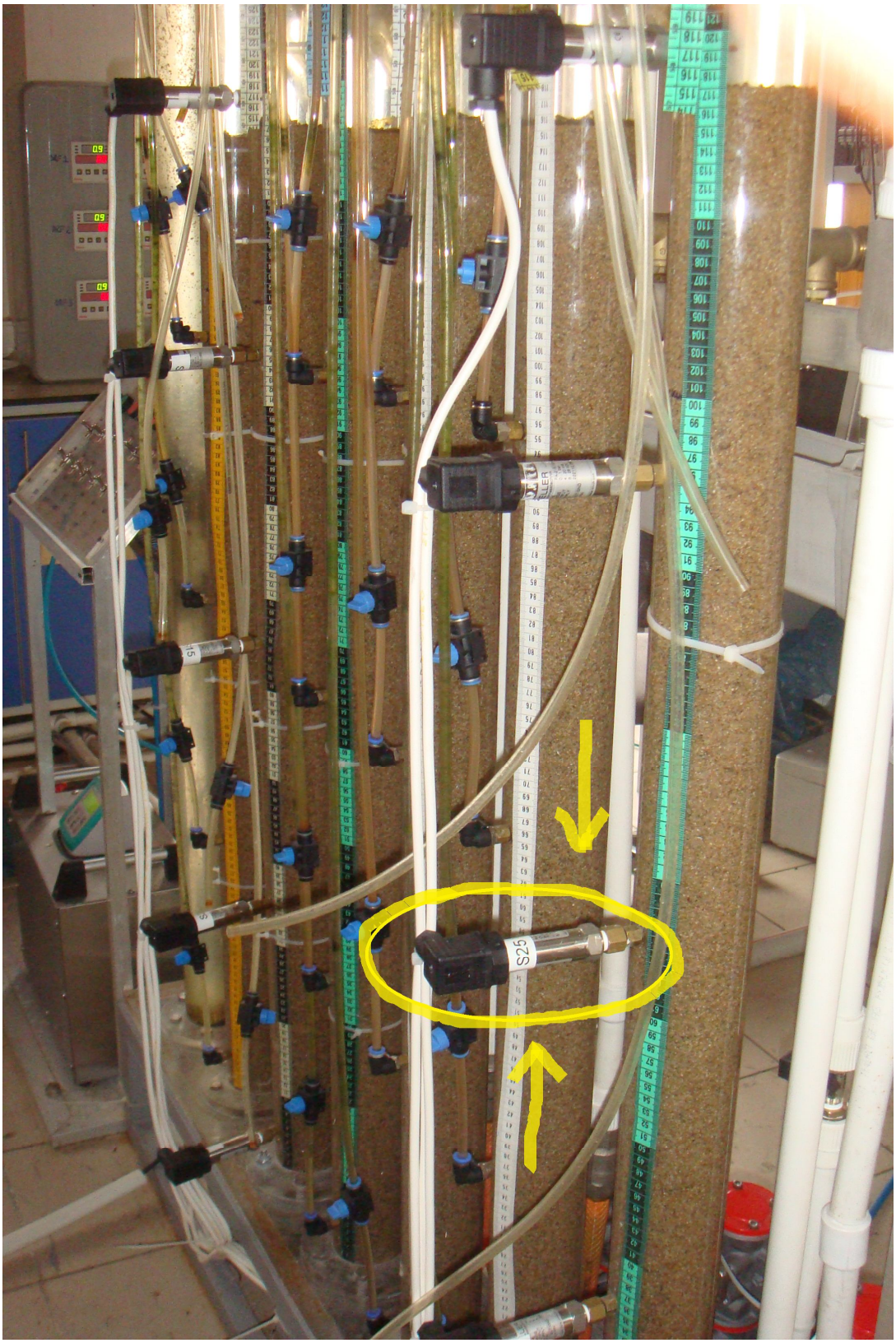
Şekil 4.18. Online bulanıklık ölçüm ekranı (data logger).

4.7.2. Yük Kayıplarının Ölçümü

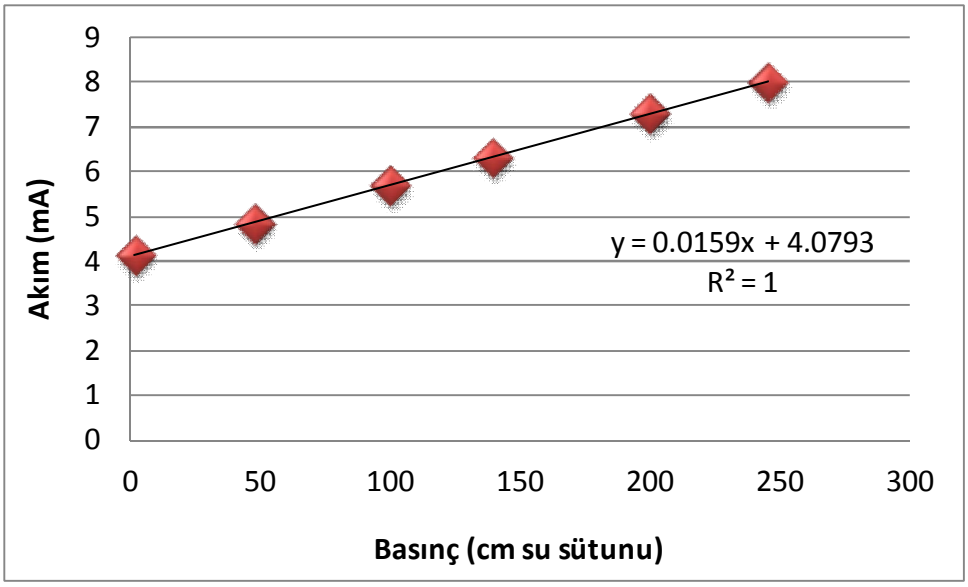
Azalan debili filtrelerin bir tanesinde ve sabit debi ile işletilen filtrenin üzerinde 5'er adet basınç sensörü bulunmaktadır. Bu sensörler 4-20 mA arasındaki sinyalleri deney düzeneğine ait bilgisayardaki yazılıma aktararak, filtrasyon süresince milibar (cm su sütunu) cinsinden basınç okunabilmesini sağlamaktadır. Sensörlerin filtre yatağı üzerindeki konumlarının şematik gösterimi Şekil 4.19'da, fotoğrafı ise Şekil 4.20'de sunulmuştur. Her deney başında sensör okumaları, üzerinde bulunduğu filtre kolonunun içerisindeki su seviyesine karşı doğrulanmış, okumada bir sapma meydana gelmişse sensörler yeniden kalibre edilmiştir. Ayrıca deney süresince de sensör okumaları ile üzerinde sensör yer almayan diğer eşdeğer filtre kolonlarındaki piyezometre okumaları da karşılıklı kontrol edilmiştir. SDF üzerinde 5 ve ADF sistemindeki 1. filtre üzerindeki 5 adet olmak üzere toplam 10 sensörün herhangi bir kalibrasyonuna ait, akıma (mA) karşı çizilmiş su sütunu (cm) grafikleri Şekil 4.21-3.30'da sunulmuştur. Grafiklerden görülebileceği gibi her bir sensörün kalibrasyonunda oldukça yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. ayrıca ax+b şeklinde elde edilen ve grafik üzerinde verilen denklemlerdeki a ve b katsayıları Microsoft SQL Server 2005 programında ilgili yere kaydedilerek kalibrasyon tamamlanmıştır.



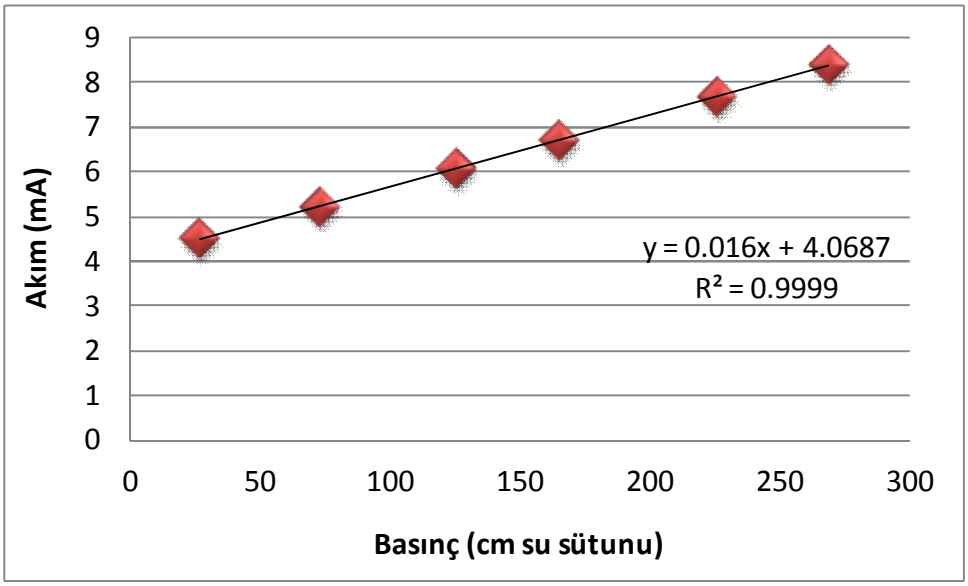
Şekil 4.19. Basınç sensörlerinin kum yatağı üzerindeki yerlerinin şematik gösterimi (şekildeki cm değerleri filtre kum yatağı tabanından olan mesafeyi göstermektedir).



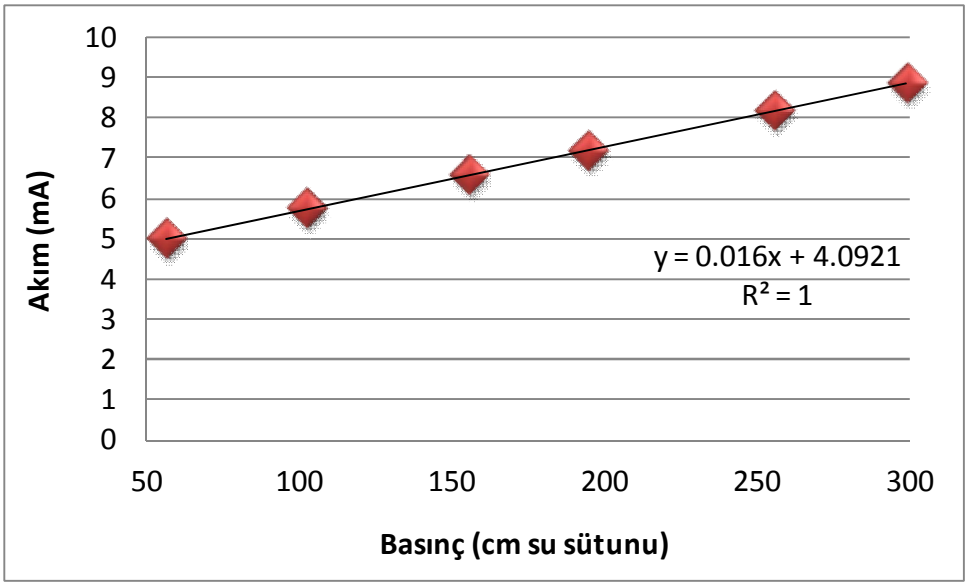
Şekil 4.20. Basınç sensörlerinin kum yatağı üzerindeki yerlerinin gösterimi.



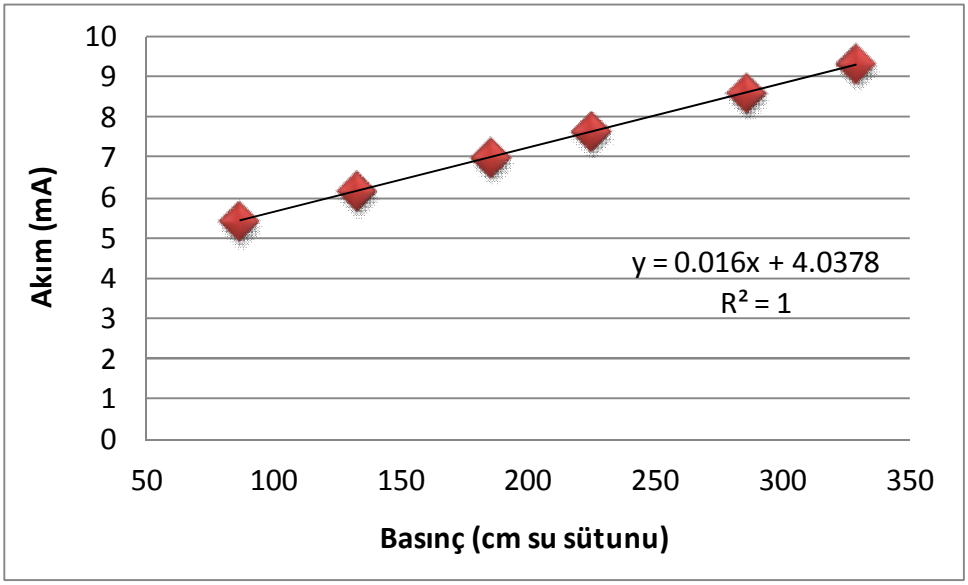
Şekil 4.21. SDF-Sensör 1 kalibrasyon grafiği.



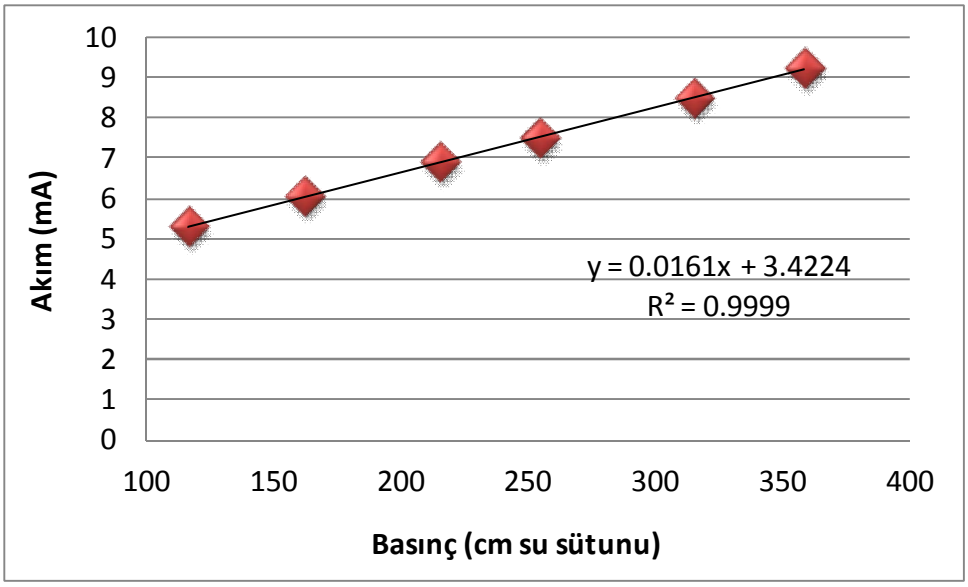
Şekil 4.22. SDF-Sensör 2 kalibrasyon grafiği.



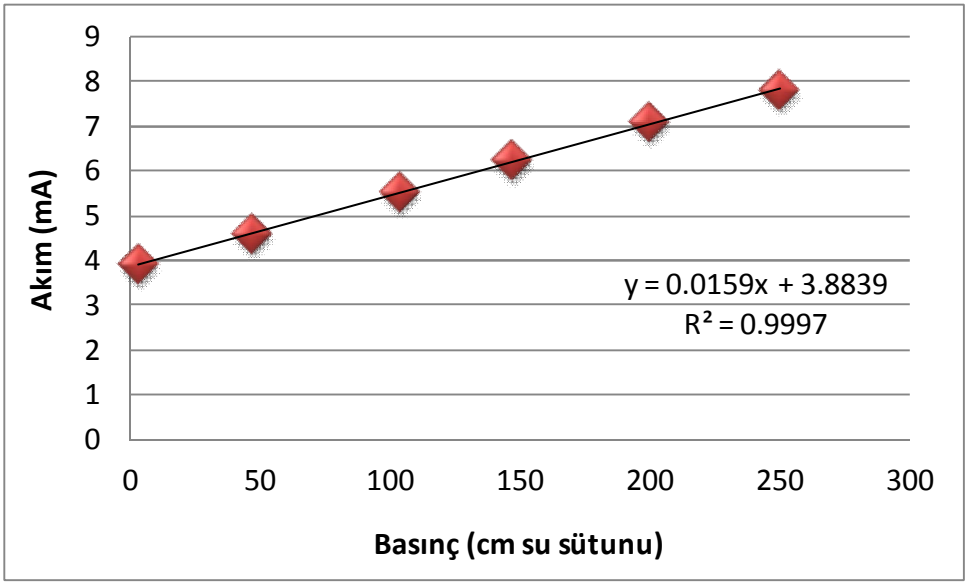
Şekil 4.23. SDF-Sensör 3 kalibrasyon grafiği.



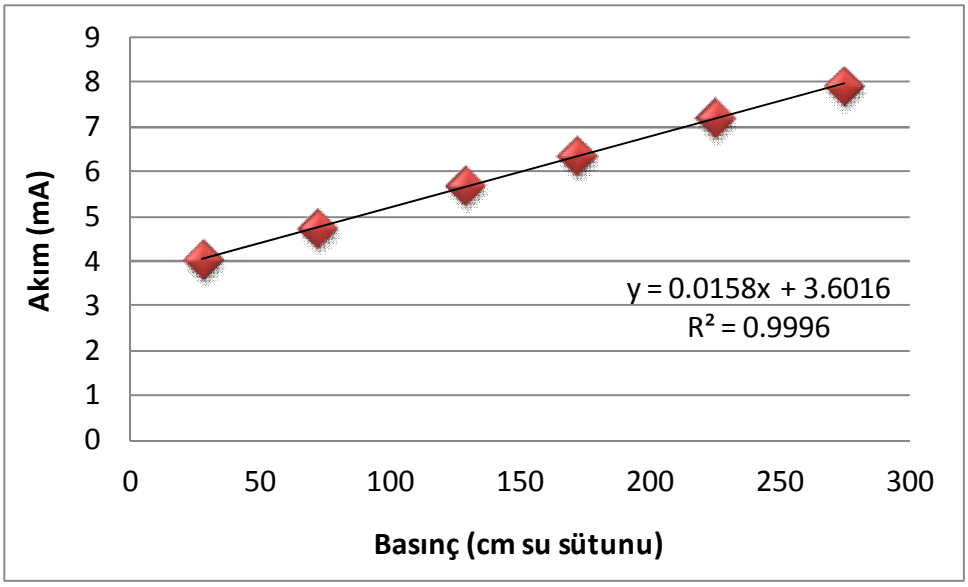
Şekil 4.24. SDF-Sensör 4 kalibrasyon grafiği.



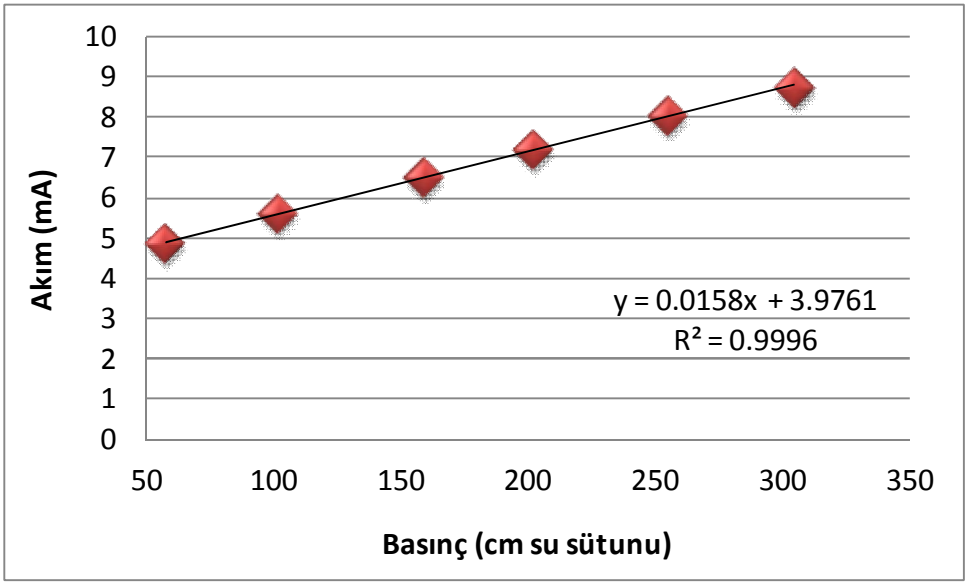
Şekil 4.25. SDF-Sensör 5 kalibrasyon grafiği.



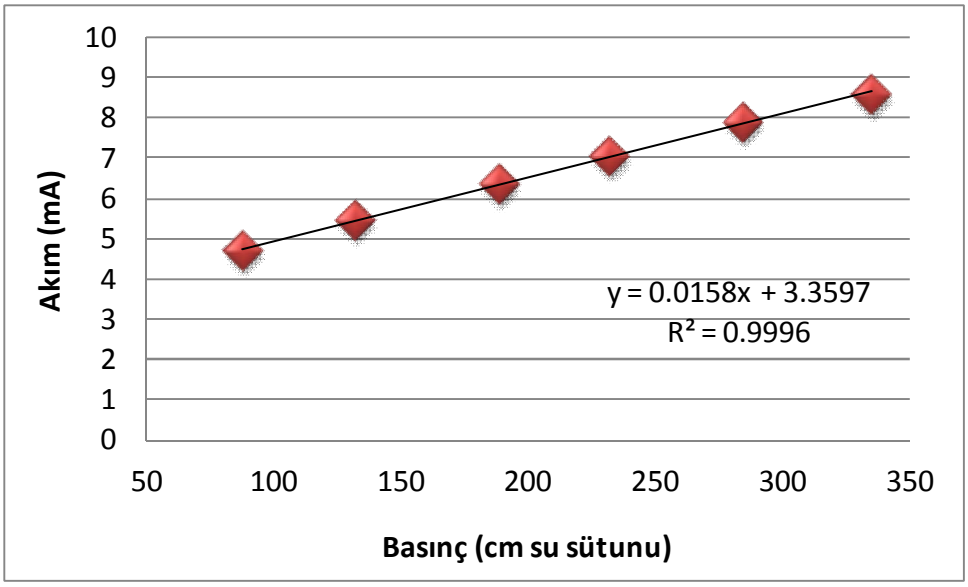
Şekil 4.26. ADF-Sensör 1 kalibrasyon grafiği.



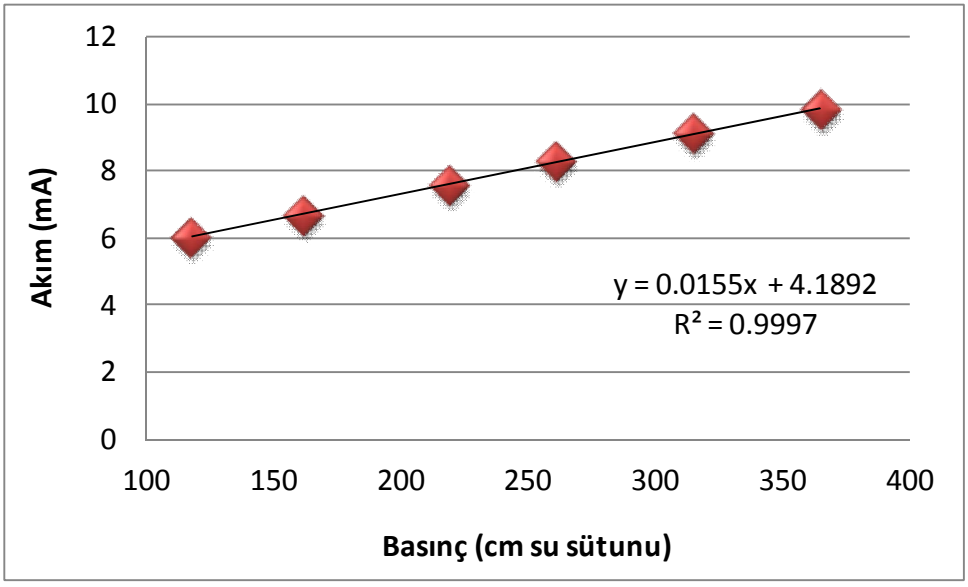
Şekil 4.27. ADF-Sensör 2 kalibrasyon grafiği.



Şekil 4.28. ADF-Sensör 3 kalibrasyon grafiği.



Şekil 4.29. ADF-Sensör 4 kalibrasyon grafiği.



Şekil 4.30. ADF-Sensör 5 kalibrasyon grafiği.

4.7.3. Filtrasyon debisinin ölçülmesi

Filtre debisini ölçmek için filtre çıkış hattına yerleştirilen türbin tip debimetreler (VISION 2000) kullanılmıştır. Pilot tesisteki hem SDF hem de ADF filtrelerinin çıkışlarında dikey pozisyonda yer alan debimetrelerden bir tanesi aşağıdaki fotoğrafta (Şekil 4.31 (a)) gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.31. (a) Tek bir filtre kolonundaki filtre debisini ölçen türbin tip debimetre, (b) Debilerin online olarak takip edildiği ve bilgisayara aktarıldığı veri kaydediciler.

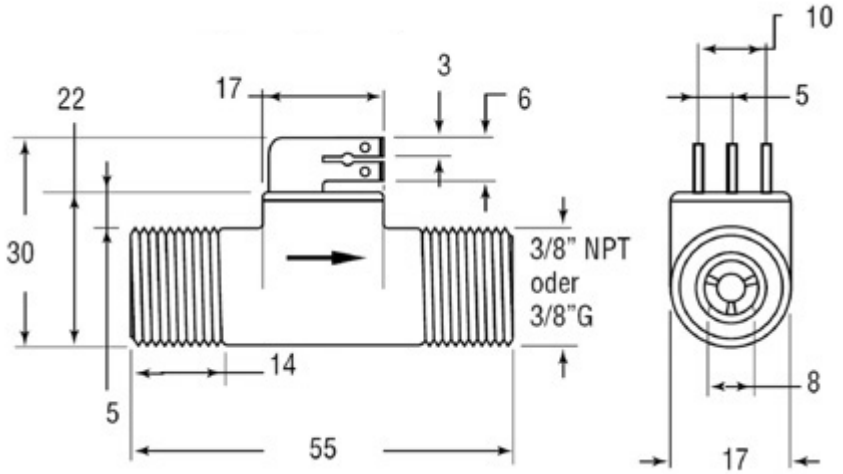
Bu debimetreler, düşük debili (akışlı) sıvıların denetlenmesini kapsayan laboratuvar ve endüstriyel ölçekli uygulamalar için idealdir. Mevcut zamanlama sistemlerinin aksine türbin teknolojisi yıpranmadan kaynaklanan sistem basıncındaki değişikliklerden etkilenmemektedir. Bu debimetrenin çalışma prensibi şu şekildedir: Sıvı akışı VISION 2000'in bıçaklı çarkının sıvının hızıyla tam orantılı bir açısal hızla dönmesine sebep olur. Bıçaklar manyetik bir alıcının altından geçtikçe bir frekans sinyali (pulse) üretilir. Her frekans pulse'i farklı bir hacimde akışkana denk gelir. Bu pulse (lar) çarkın açısal hızı ve akış hızıyla tam orantılıdır. Pulse dalgaları yerel ya da uzak elektronik bir enstrümantasyona iletilir. Çok fazla sayıdaki sinyal sayesinde hassas ölçüm sağlanabilir. Ayrıca türbin hacmi çok küçük olduğu için yanıt süresi de çok kısadır. Sistemdeki basınç (pulse)larından da etkilenilmez. Akış sensörünün (debimetre) teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 4.4'de özetlenmiş ve Şekil 4.32, 4.33 ve 4.34'de ayrıntıları sunulmuştur.

Tablo 4.4. Türbin tip akış sensörünün teknik özellikleri.

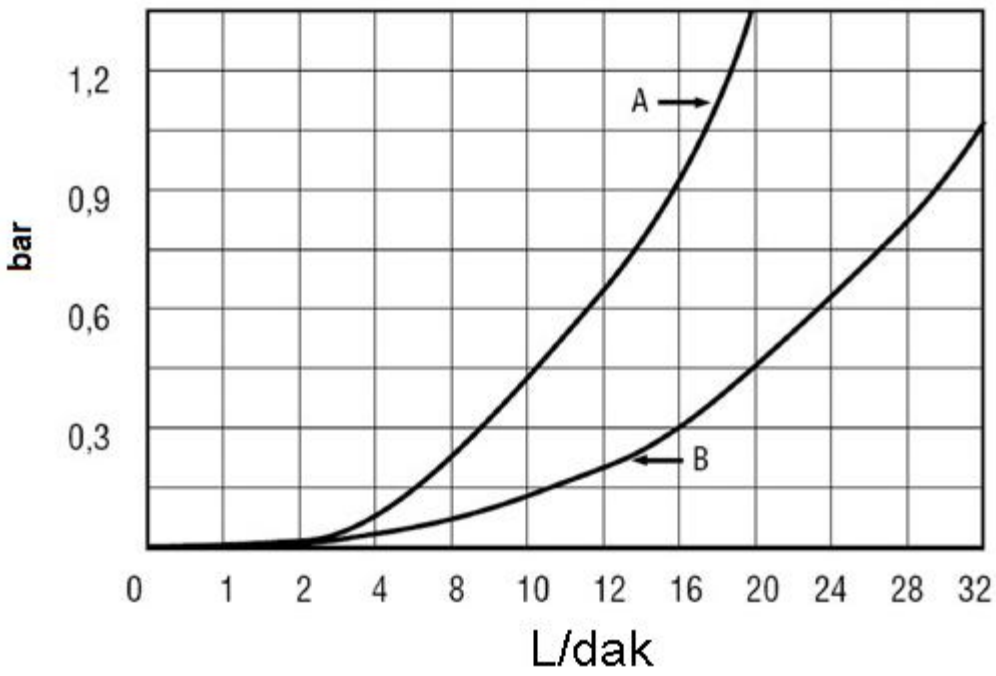
Marka/model numarası	Akış aralığı (L/dak)	Pulse/L	Frekans/Hz	DN	Air split/mm
VISION 2000/46510-164-2F66	0,5....5	6900	58 - 575	6	0,15



Şekil 4.32. Filtrasyon debisinin ölçülmesinde kullanılan türbin tip debimetre.



Şekil 4.33. Türbin tip debimetrenin ölçüleri (mm).



Şekil 4.34. Türbin tip debimetrenin hıza karşı basınç kaybı grafiği (deneylerde kullanılan debimetrenin modeli A tipidir).

Debilerin online olarak takip edildiği ve bilgisayara aktarıldığı veri kaydediciler Şekil 4.31 (b)'de sunulmuştur. Bu amaçla kullanılan ELİMKO E-1200 cihazı darbe, akım ve gerilim girişli olarak programlanabilen bir akış ölçüm cihazıdır. Darbe girişli olarak programlandığında mekanik kontakla üretilen darbeler cihaza giriş olarak verilebilmektedir. Akım girişli programlandığında giriş akımı seçenekleri 0-20 veya 4-20 mA'dır. Cihaz anlık akış ve toplam akış değerlerini göstergesinde göstermektedir. Cihaz ayarlanabilen üç set noktasıyla üç sayısal çıkışı denetleyecek yapıdadır. Set değerleri anlık akışa, toplama ve batch sayısına atanabilmektedir. Ölçüm bilgileri RS485 hattı üzerinden MODBUS RTU protokolü ile merkezi bir sisteme aktarılabilir. Cihaz IEC 668 standardına uygun 96 x 96 mm boyutlarındadır. Çalışma gerilimi 85-265 V AC veya 85-375 V DC'dir. Türbin tip debimetrenin hıza karşı basınç kaybı değişimi Şekil 4.34'de gösterilmektedir. Bu çalışmada debimetreden geçen suyun hızı maksimum 0.67 l/dak'dır. Grafikten de görülebileceği gibi türbin tip debimetrenin filtredeki toplam yük kaybına etkisi ihmal edilebilir.

5. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1. Filtre Sistemlerinin Hidrolik Açıdan İncelenmesi

Azalan debili filtrasyon (ADF), konvansiyonel sabit debili filtrelere (SDF) karşı, filtre debisi kontrol yöntemi açısından farklı bir alternatiftir. Son elli yılda yapılan deneysel ve teorik çalışmaların çoğu ADF sisteminin daha iyi çıkış su kalitesi ürettiğini ve daha uzun işletme süresine sahip olduğunu (filtrenin daha geç tıkandığını) bildirmiştir. Ayrıca ilk yatırım maliyetlerinin de düşük olduğu bilinmesine rağmen hâlâ su arıtma tesislerinde SDF kadar tercih edilmemektedir. Bunun sebebi ise, son elli yıldaki deneysel ve teorik çalışmalar sonunda ADF tasarımına yönelik bazı hesaplama yöntemleri ve kabuller ortaya konmasına rağmen bu yöntemlerin çoğunun deneysel olarak ispat edilememesi ve ADF'nin hidrolik davranışlarının yeterince ortaya çıkarılamaması neticesinde, tasarımının güçlüğü ve işletmede karşılaşılabilecek tahmini zor problemlerdir.

Bu çalışmada pilot ölçekli deneyler yardımıyla azalan debili filtrasyonun (ADF) hidrolik davranışları incelenmiştir. Dört adet filtre içeren bir ADF sistemi inşa edilmiş ve işletilmiştir. Filtrelerdeki ortak su seviyeleri, her bir filtrenin filtrasyon hızı ve filtre yatağının çeşitli derinliklerindeki yük kayıpları zamana bağlı olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. ADF ile ilgili önceki diğer çalışmaların çoğunda tek bir ortalama filtrasyon hızı ya da tek bir yumaklaştırıcı dozajı kullanılmıştır. Bu çalışmada ise farklı filtrasyon hızları ve yumaklaştırıcı dozajları kullanılarak aynı özellikteki ham su filtre edilerek deneyler tekrar edilmiştir. Böyle bir deneysel matriks kullanımıyla, çeşitli işletme şartlarının ADF sisteminin hidrolik davranışları üzerindeki etkileri daha detaylı değerlendirilmiştir.

Yaklaşık elli yıllık bir geçmişe sahip olan azalan debili filtrasyon prosesine ait parametreler yeterli ve detaylı izleme teknolojileri ile takip edilemediğinden ve azalan debili filtrelerin hidrolik davranışlarının yeterince anlaşılamamasından ötürü filtre tasarımına ait hesaplama yöntemleri ampirik olarak kalmıştır. Bu yüzden bir

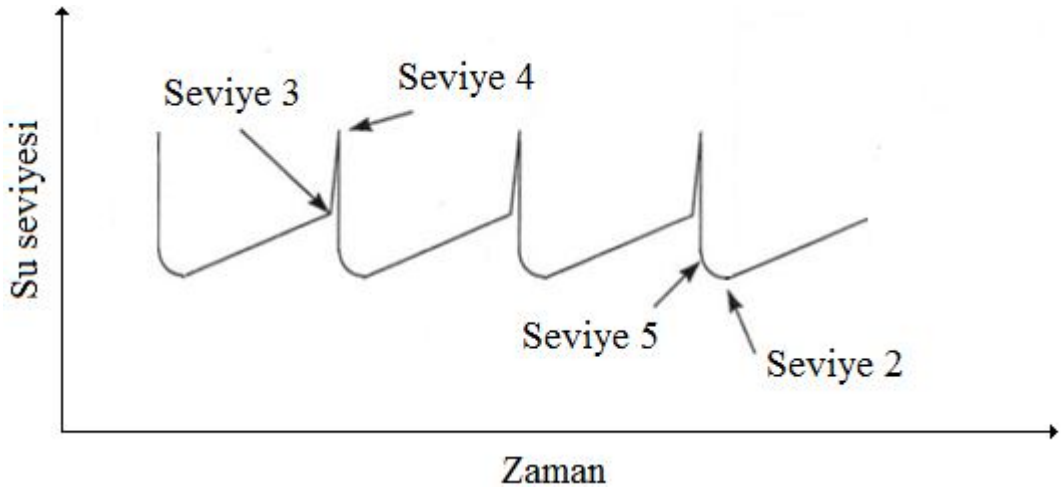
filtrasyon tesisi kurulacağı zaman -geçmiş çalışmalarda deneysel olarak avantajlarının da görülmesine rağmen- çoğunlukla azalan debili sistemden kaçınılmış, birçok mevcut tesiste kullanılagelen sabit debili filtrasyon prosesi tercih edilmiştir. Azalan debili filtreler üzerindeki son on yıldaki birkaç çalışma ise deneysel içerikli olmaktan çok bilgisayar programları yardımıyla geçmiş deneysel verilere dayandırılan simülasyon içerikli çalışmalar olmuştur. Çalışmamızdaki azalan debili filtre pilot tesisi otomasyonlu olarak kurulmuş ve filtrasyon hızı ile su seviyelerindeki değişimler, modern scada sistemiyle online olarak ve çok kısa zaman aralıklarındaki ölçümlerle takip edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmanın amacı azalan debili filtrelerin tasarlanmasına yönelik ampirik denklemlerde kullanılan kabullerin deneysel olarak analiz edilmesi ve azalan debili filtrelerin hidrolik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmak ve böylelikle daha yüksek kalitede çıkış suyu ürettiği ve işletmesinin daha ekonomik olduğu iddia edilen azalan debili filtrelerin Türkiye'deki içme suyu arıtma tesislerinde sabit debili filtreler yerine kullanılmasını tavsiye etmektir.

5.1.1. Azalan Debili Filtrelerin Hidrolik Davranışları

Azalan debili filtrasyon (değişken ve azalan debili filtrasyon olarak da bilinmektedir) konvansiyonel (sabit debili) filtrasyona alternatif olarak ortaya çıkmış bir filtre debisi kontrol yöntemi olup literatürde genel çalışma prensipleri verilmiştir [Cleasby, 1969; Arboleda, 1974; Cleasby, 1993; Akgiray and Saatçı, 1998; Akgiray and Saatçı, 2000; Dąbrowski, 2006; Dąbrowski, 2011]. Bir ADF sisteminde filtreler, filtrasyon sırasındaki su seviyesinin daha da altında yer alan bir giriş kanalı ya da borusuyla birbirlerine bağlıdırlar. Filtreler üzerinde giriş ve çıkış akışlarını kontrol eden herhangi bir cihaz yer almaz. Filtreye su girişi, filtre tankı içindeki minimum su seviyesinden de aşağıda olduğu için sistemdeki bütün filtreler hemen hemen aynı su seviyesiyle işletilirler. Bu nedenle, sistemdeki en kirli filtre en düşük hızla işletilirken, en temiz filtre ise en yüksek hıza sahiptir ve en fazla debide suyu geçirir. Filtrasyon devam ettikçe askıda katı maddeler zamanla filtre gözeneklerini tıkadığından filtrelerdeki ortak su seviyesi yükselir. Geri yıkama işlemine karar verildiğinde sistemdeki en kirli filtre devreden çıkarılır ve geri yıkamaya alınır. Geri

yıkanan filtre tekrar işletmeye alındığında, sistemdeki en temiz filtre olduğundan en yüksek hızla filtrasyona başlar. Ortak su seviyesi ise geri yıkanan filtrenin işletmeye alınmasıyla birlikte bir miktar azalır ve filtrasyonun devam etmesiyle birlikte bir sonraki kirli filtre geri yıkanıncaya kadar artmaya devam eder.

ADF'deki karakteristik su seviyesi değişimleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir. (bütün filtreler temizken ve ortalama tasarım hızında işletilirlerken meydana gelen Seviye-1, burada gösterilmemiştir (Bu seviye statik su seviyesi olarak da adlandırılmakta olup, filtreler işletmeye başlatıldıktan sonra bir daha görülmeyeceği için burada da verilmemiştir). Seviye-2, 3 ve 4 Cleasby ve Di Bernardo (1980) tarafından ve Seviye-5 de Akgiray ve Saatçı (1998a) tarafından tanımlanmıştır. Seviye-2 minimum su seviyesidir. Filtre tıkandıkça su seviyesi zamanla yükselerek Seviye-3'e ulaşır. Bu noktada kirlenmiş filtre devreden çıkarılıp geri yıkamaya alınır. ADF sistemindeki bir filtre geri yıkamaya alındığında işletmede kalan diğer filtrelerdeki ortak su seviyesi Seviye-4'e yükselir. Geri yıkaması biten filtre işletmeye alındığında filtrelerdeki ortak su seviyesi hızlı bir şekilde Seviye-5'e iner. Bu hızlı düşüşün sebebi, işletmede kalan filtrelerde biriken suyun geri yıkandıktan sonra işletmeye alınan temiz filtreye aktarılmasından dolayıdır. Seviye-5, bir filtrenin geri yıkanıp işletmeye alınmasından sonra bütün filtrelerdeki su seviyesinin eşitlendiği (dengeye geldiği) seviyedir. Bu seviyeden sonra ortak su seviyesi daha da yavaşlamış bir şekilde Seviye-2'ye inmeye devam eder. Filtrasyon devam ettikçe seviye tekrar Seviye-3'e yükselir ve bu noktada bir diğer kirlenmiş filtre geri yıkamaya alınır. Bu seviye değişimleri sistemdeki bütün filtrelerin belli bir sırayla geri yıkanmasıyla periyodik olarak tekrarlanır. Burada belirtilmesi gereken husus, Şekil 5.1'de gösterilen su seviyesi değişimi periyodu; ünitedeki filtreleri en az bir kere geri yıkanmış bir ADF sistemindeki bir periyottur ve başlangıç (ADF'yi ilk kez devreye alma) periyodu değildir.



Şekil 5.1. ADF'deki tipik su seviyesi değişimleri [Akgiray and Saatçı, 1998; Akgiray and Saatçı, 2000].

Literatürde ADF'nin hidrolik davranışlarını modellemek ve tahmin etmek amacıyla yürütülmüş bazı çalışmalar mevcuttur. Özellikle filtrasyon süresince su seviyesindeki değişimlerin tahmini üzerine yoğunlaşılmıştır ve Cleasby (1993) Cleasby and Di Bernardo (1980), Arboleda et al. (1985), Di Bernardo (1986) ve Gupta and Hayes (1996) çalışmalarında bazı kabul ya da deneysel bulgulara dayanan bir takım yaklaşık hesaplama metotları geliştirmişlerdir. Akgiray ve Saatçı (1998a) ve Chaudhry (1987) ise sadece su seviyelerini değil, aynı zamanda filtre hızlarını ve çıkış suyu askıda katı madde konsantrasyonlarını da zamanın bir fonksiyonu olarak tahmin edebilen matematik modelleri sunmuşlardır. Ancak bu modellerin kullanımı pilot ya da tam ölçekte filtrasyon tesislerinin işletilmesi sonucu elde edilecek verilerin kullanılmasını gerektirmektedir. Böylelikle, ADF'nin hidrolik davranışlarıyla ilgili uygun yaklaşımlar gerçekleştirilebilecektir. Bununla birlikte parçacıkların tutulma (attachment) ve ayrılma (detachment) katsayılarının da aynı şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu gereksinimler ve denklemlerin çözümünün zorluğu bu matematik modellerin tesis tasarımında rutin olarak kullanımı kısıtlandırmaktadır.

ADF tesis tasarımında en kolay, en pratik olan ve en geniş kullanım alanı bulan yöntem Cleasby (1993) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem şu üç kabule göre uygulanmaktadır:

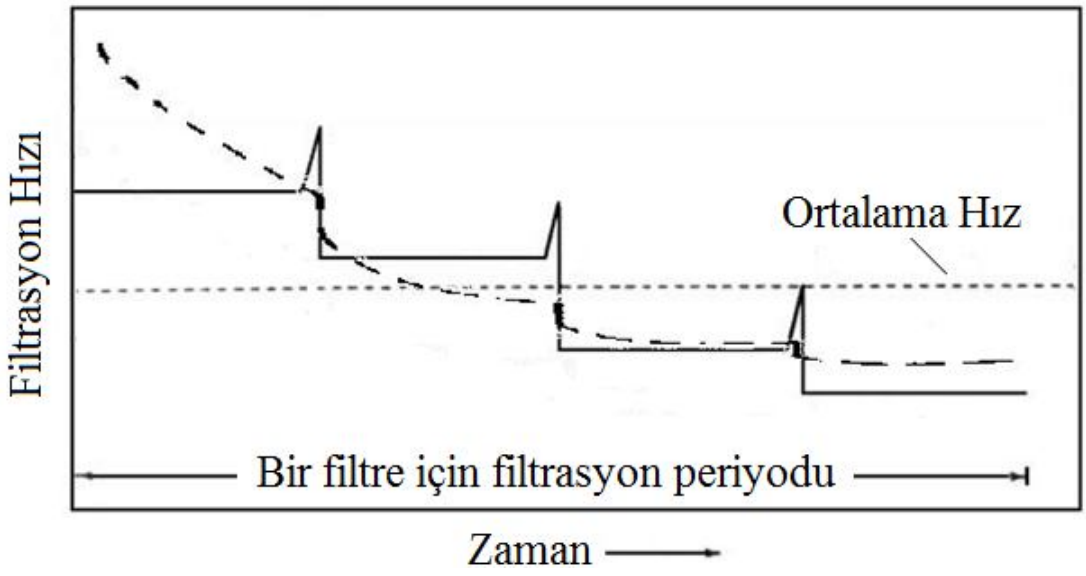
(1) Seviye-5 ve Seviye-3 aynıdır.

(2) Maksimum filtrasyon hızı (sistemdeki en temiz filtrenin hızı), ortalama filtrasyon hızının her zaman 1.5 katı ($V_{maks} = 1.5V_{ort}$) olarak seçilir ve minimum filtrasyon hızı da (sistemdeki en kirli filtrenin hızı), ortalama filtrasyon hızının her zaman 0.7 katı ($V_{min} = 0.7V_{ort}$) olarak kabul edilir.

(3) ADF sistemindeki her bir filtredeki su seviyesinin eğimi, aynı ortalama hızla işletilen SD filtresinin su seviyesi eğrisinin eğimine eşittir. Bu son kabul ayrıca Gupta and Hayes (1996) tarafından da uygulanmıştır. Hayes'in yöntemi Akgiray and Saatçı (1998b) tarafından teorik görüşlerle incelenmiş ve Hayes'in yönteminin her zaman geçerli olmadığı ortaya konmuştur. Cleasby'nin ilk iki kabulü de Akgiray and Saatçı (2000) tarafından detaylı olarak incelenmiş ve bu iki kabulün her zaman geçerli olması için mantıklı bir sebep bulunmadığını belirtilmiştir. Ancak bu araştırmacılar da bu kabullerin doğruluğunu test edecek herhangi bir deneysel veri ortaya koymamışlardır.

Şekil 5.1'deki tipik su seviyesi değişimi esas olarak Cleasby ve çalışma arkadaşlarına aittir [Cleasby and Di Bernardo, 1980; Di Bernardo and Cleasby, 1980; Cleasby, 1981; Hilmoe and Cleasby, 1986; Cleasby, 1993] ve bu şekil bilgisayar simulasyon çalışmaları ile Chaudhry (1987b) ve Akgiray ve Saatçı (1998a) tarafından da elde edilmiştir. Şekil 5.2'de ADF sistemindeki tek bir filtrenin hızının zamanla değişimi görülmektedir. Yeni yıkanan ve işletmeye alınan filtre maksimum hızla filtrasyona başlamakta ve sistemdeki diğer bir kirli filtre geri yıkanana kadar hızı düşmektedir. Bu şekil her iki geri yıkama arasında hızın sabit kaldığını ve her bir geri yıkama sonrasında (filtrasyon süresince filtre tıkandıkça) filtre hızının kademeli olarak azaldığını göstermektedir (sürekli kalın çizginin temsil ettiği eğri). Bu tanım esas itibariyle Cleasby ve arkadaşlarına aittir [Cleasby, 1993]. Şekildeki kesikli eğri ise Chaudhry (1987b) ve Akgiray ve Saatçı (1998a) tarafından yapılmış bilgisayar simülasyon sonuçlarına ait sonucu göstermektedir. Bu modeller geri yıkamalar

arasında sabit olmayan (non-lineer ve azalan) hız profillerini (özellikle de geri yıkanmış filtrenin işletmeye alındığı ilk zamanlarda) tahmin etmektedirler. Bu modellere göre, diğer filtrelerin birkaç kez geri yıkanmasından sonra hız profili zaman eksenine göre daha yatay bir pozisyon almaktadır.



Şekil 5.2. Dört filtreli bir ADF'de bir filtreye ait tipik hız değişimi (kesikli çizgi ile gösterilen hız değişimi matematiksel modellerden elde edilmiştir (Chaudhry, 1987b; Akgiray and Saatçı, 1998a)).

Şekil 5.1 ve 5.2'de ADF'nin hidrolik davranışları (sürekli çizgiler) gösterilirken literatürde ADF ile ilgili çalışmaların genel bir özeti de verilmiştir ancak hâlâ ADF ile ilgili cevaplanmamış ya da kısmen cevaplanabilmiş sorular mevcuttur. Elde edilen bulguların çoğunun da farklı deney koşulları altında test edilerek doğrulanması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı ADF ile ilgili şu sorulara cevap aramaktır:

(1) Su seviyesi profili her zaman yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi midir? Örneğin, Seviye-2'den Seviye-3'e olan yükseliş yaklaşık olarak düz bir çizgi şeklinde midir, lineer midir? Seviye-3'den Seviye-4'e daha dik bir şekilde olan yükseliş de yine benzer şekilde lineer midir? Seviye-4'den Seviye-5'e olan ani ve

keskin düşüş ile Seviye-5'den Seviye-2'ye –nisbeten- daha yavaş bir düşüşün profili, süresi ve şekli nasıldır?

(2) Seviye-5'in diğer seviyelere göre pozisyonu nasıldır?

(3) Cleasby'nin (1993) çalışmalarındaki Seviye-3=Seviye 5 kabulü her zaman doğru mudur?

(4) Çeşitli su seviyeleri ortalama filtrasyon hızından (veya tasarım hızı) nasıl etkilenir?

(5) Yumaklaştırıcı dozajı (filtre yatağı içinde askıda katıların birikimi), su seviyelerini nasıl etkiler?

(6) ADF sistemindeki tek bir filtrenin zamana göre karakteristik hız davranışı ne şekilde gerçekleşir? İki geri yıkama arasında filtrasyon hızı her zaman sabit midir? Sistemdeki bir filtrenin hızı, her bir diğer filtre sırasıyla yıkandıktan sonra kademeli olarak mı azalır? Yumaklaştırıcı dozajı ve ortalama filtrasyon hızı her bir filtrenin hız profiline nasıl etki eder?

(7) Maksimum ve minimum filtrasyon hızları arasındaki ilişki nasıldır? Ortalama hıza göre simetrik midirler yoksa her zaman geçerli olabilecek bir başka ilişki mevcut mudur?

(8) Cleasby'nin (1993) kabulüne göre maksimum hız ortalama hızın 1.5 katı olduğunda minimum hızın da her zaman ortalama hızın 0.7 katı olduğu (ya da tam tersi) doğru mudur?

Aşağıda pilot ölçekli deneyler ve sonuçları ortaya konmuş, yukarıdaki sorulara cevap aranmıştır. Sonrasında da ADF sistemi ve SD filtresi su kalitesi yönünden mukayese edilmiştir.

5.1.1.1. Farklı Alum Dozajlarında Filtrasyon Hızının Etkisi

ADF sisteminin hidrolik davranışlarının filtrasyon hızından nasıl etkilendiğini incelemek için 5, 7.5, 10 ve 12.5 mg/L olmak üzere dört farklı alum dozajında deneyler yürütülmüştür. Her bir dozajda farklı filtrasyon hızlarının su seviyesine ve maksimum ile minimum filtrasyon hızına etkileri ortaya konulmuştur.

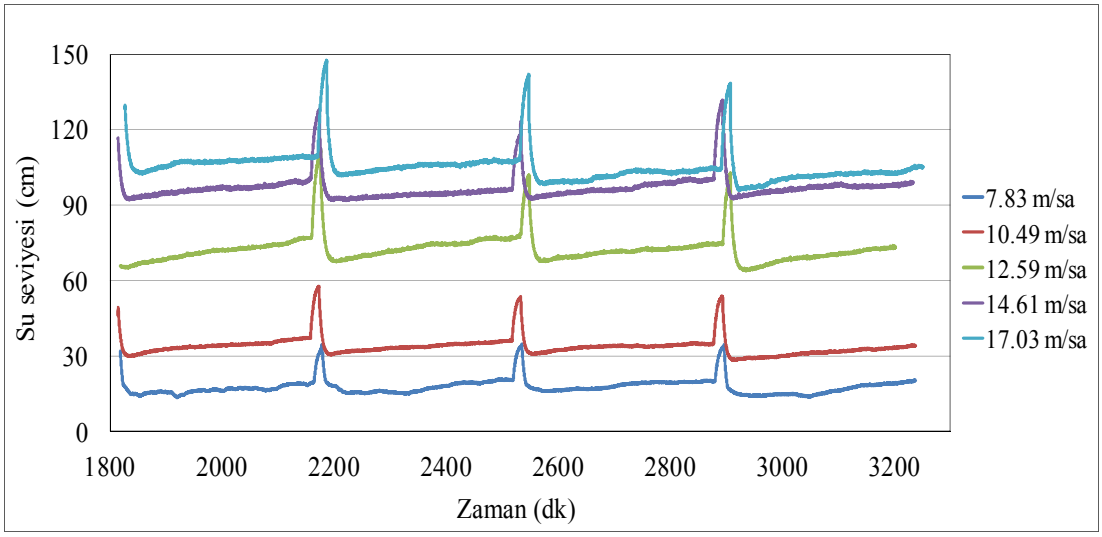
5.1.1.1.1. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneyler

Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneyler beş farklı hızda yürütülmüştür. Filtrelere giriş debisi filtre sisteminin girişinde bulunan rotametre yardımıyla kontrol edilmiştir. Filtrelerin çıkışlarında yer alan türbin tip debi ölçer cihazlarının deney süresince kaydettiği debi değerlerinden ortalama debi elde edilmiş, filtre kolonlarının alanları kullanılarak da ortalama filtre hızları hesaplanmıştır. Tablo 5.1'de 5 mg/L deneylerine ait işletme koşulları verilmiştir.

Tablo 5.1. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
1	9.92	5	7.83	20
2	10.03	5	10.49	24
3	9.97	5	12.59	22
4	10.01	5	14.61	21
5	10.61	5	17.03	18

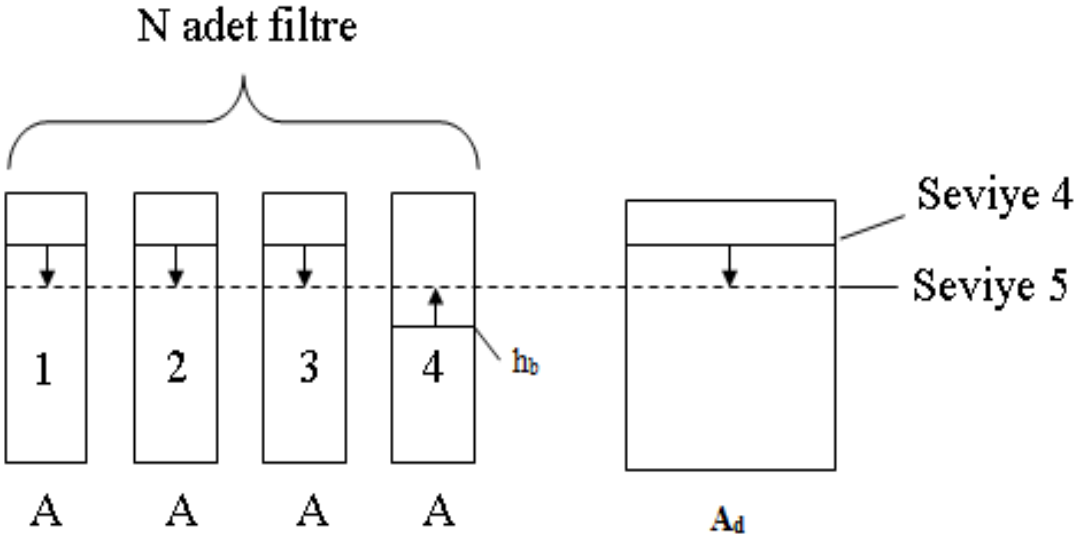
Şekil 5.3'te alum dozajının 5 mg/L olarak sabit tutulduğu, ortalama filtrasyon hızlarının farklı olduğu deneylere ait ADF ortak su seviyesi değişimleri verilmiştir. Bu şekil ve takip eden su seviyesi ile ilgili şekillerde, filtre çıkış borusunun üst yatay kısmı referans noktası olarak alınmış, su seviyeleri buna göre verilmiştir. Bu referans noktası tam ölçekli ADF tesislerindeki çıkış suyu savağı seviyesini temsil etmektedir. Bu çalışmada kum yatağının en üst seviyesi de çıkış suyu seviyesi ile aynı seviyededir. Su seviyesinin zamana göre değişimini gösteren grafiklerde (Şekil 5.3 gibi) ikinci filtrasyon döngüleri esas alınmıştır. Çünkü tipik ADF su seviyesi değişimlerinin ancak bütün filtrelerin en az bir kere geri yıkandıktan sonra elde edilebileceği bildirilmiştir [Di Bernardo, 1987]. Dolayısıyla ADF sistemindeki ilk döngü karakteristik ADF seviye değişimlerini yansıtmamaktadır. Bununla birlikte, ADF sisteminde ikinci döngüde gözlemlenen filtrasyon karakteristiği, sonraki döngülerde de tekrar etmektedir [Akgiray and Saatçı, 1998a]. Bu nedenle bu tez kapsamındaki deneylerde filtrasyon en fazla üç döngü süresince devam ettirilmiş, ilk döngünün tamamen farklı, ikinci ve üçüncü döngülerdeki su seviyesi davranışlarının ise oldukça benzer oldukları görülmüştür (EK-A). Şekil 5.3'te su seviyeleri zamanın bir fonksiyonu olarak grafiğe geçirilmiştir. Sabit alum dozajında filtrasyon hızının artmasıyla su seviyelerinin de –tahmin edilebileceği gibi-arttığı görülmektedir. Çünkü yüksek hızlarda filtre yatağı, drenaj tabanı ve çıkış borusunda daha fazla laminer ve türbülanslı yük kayıpları meydana gelmektedir.



Şekil 5.3. Farklı ortalama filtrasyon hızlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L).

ADF sisteminde Seviye 3'e ulaşan filtreler geri yıkanır. Bir filtre devreden çıkarıldığında diğer filtrelerdeki ortak su seviyesi Seviye 4'e yükselir ve geri yıkanan filtrenin tekrar işletmeye alınmasıyla birlikte hızlı bir şekilde Seviye 5'e iner. Bu noktada işletmeye alınan temiz filtre ile diğer filtrelerin su seviyeleri aynıdır. Seviye 5'e suyun dengeye geldiği yükseklik de denilebilir. Seviye 5'den sonra seviye düşüşü daha yavaş bir şekilde meydana gelir ve Seviye 2'ye kadar devam eder. Seviye 2'ye ulaşılınca filtre tanklarındaki su tekrar zamanla yükselmeye başlar. Bir ADF sisteminde filtrasyon, Seviye 2 (h_2) ile 3 (h_3) arasında gerçekleşmektedir. Bu iki seviye arasında su seviyesi, deney şartlarının da etkisiyle filtreler tıkandıkça artar. Sabit alum dozajında, ortalama filtrasyon hızının artmasıyla h_3/h_2 oranının genellikle azalmakta olduğu görülmektedir (Şekil 5.4). Bu iki seviye arasındaki fark ise Şekil 5.5'te sunulmuştur. Hız arttıkça seviye farkı da büyümektedir. Seviye 3'ün büyüklükleri Tablo 5.2'de gösterilmektedir. Ayrıca pik seviyesi olan Seviye 4 ve Seviye 5 de Tablo 5.2'de verilmiştir. Seviye 5 ise her bir deney için aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

Şekil 5.4'te N adet filtreden oluşan bir ADF sistemi gösterilmektedir. Burada, 4 no'lu filtre geri yıkanmıştır. Geri yıkanırken su seviyesi geri yıkama gideri mertebesindedir (h_b). Filtre işletmeye alındığında diğer filtrelerin debilerini paylaşacak ve su seviyesi h_b'den 5'e yükselecektir. 1, 2 ve 3 no'lu filtrelerin seviyesi ise 4'ten, 5'e inecektir. Böylece birbirine ortak bir giriş yapısıyla bağlı dört filtre aynı su seviyesi ile çalışmaya başlayacaklardır.



Şekil 5.4. ADF'de bir filtrenin geri yıkanması sonrasında filtrelerdeki ortak su seviyelerinin durumu.

Şekil 5.4'teki her bir filtrenin alanı A'dır. A_d ise, ADF ünitesinden sonra gelen bir prosesin (filtrelerin batık kanal ile bağlandığı bir son çöktürme tankı ya da bir başka rezervuar) alanını temsil etmektedir. ADF sisteminden sonra böyle bir rezervuar yer alıyorsa, her filtre tankındaki su seviyesi A_d alanlı bu rezervuardan etkilenecektir. Bu durumda, şu aşağıdaki hallerle karşılaşılabilir:

1. Genel:

$$A(h_5 - h_b) = (N-1)A(h_4 - h_5) + A_d(h_4 - h_5)$$

$$= [(N-1)A + A_d](h_4 - h_5)$$

$$Ah_5 + [(N-1)A + A_d]h_5 = Ah_b\big((N-1)A + A_d\big)h_4$$

$$h_5 = \frac{Ah_b\big((N-1)A + A_d\big)h_4}{NA + A_d} \tag{5.1}$$

1.1. Özel durum:Eğer rezervuar alanı filtre alanı A'ya eşitse:

$$A = A_d \Rightarrow h_5$$

$$= \frac{h_b + Nh_4}{N+1} \tag{5.2}$$

2. Genel:Bütün filtreler işletmedeyken,

$$A_a(\text{filtre başına birikme alanı}) = A + \frac{A_d}{N} \tag{5.3}$$

2.1.Özel durum:Eğer rezervuar alanı filtre alanı A'ya eşit ve filtre sayısı 4 ise:

$$A_d = A, N = 4 \Rightarrow \frac{Aa}{A} = \frac{5}{4} \tag{5.4}$$

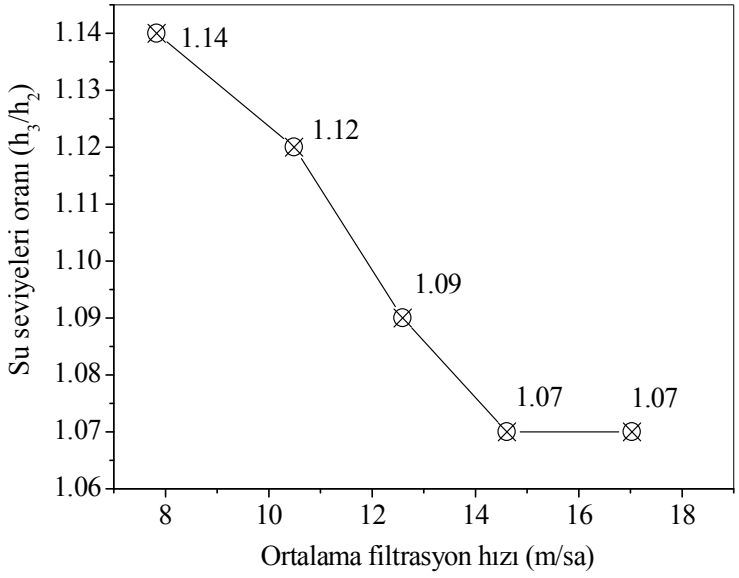
3. Genel:Filtrelerden biri geri yıkanırken,

3.1.Özel durum:Eğer rezervuar alanı filtre alanı A'ya eşit ve filtre sayısı 4 ise:

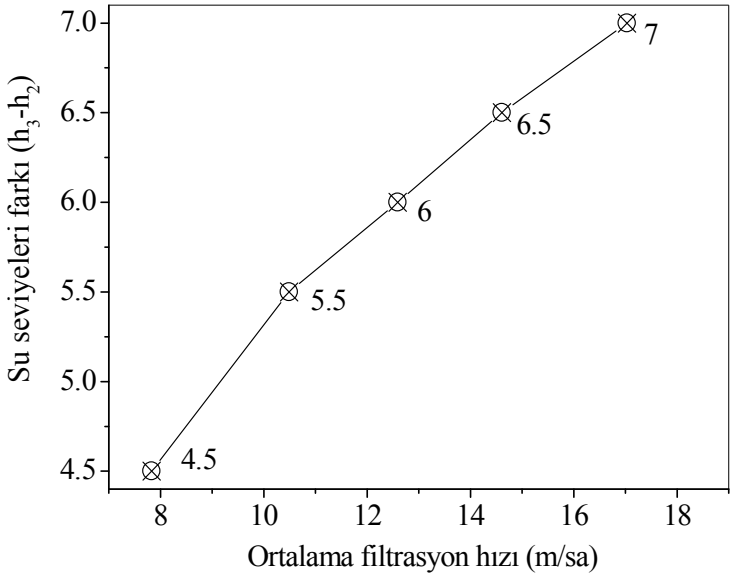
$$A_a(\text{filtre başına birikme alanı}) = A + \frac{A_d}{N-1} \tag{5.5}$$

$$A_d = A, N = 4 => \frac{Aa}{A} = \frac{4}{3} \tag{5.6}$$

Bu tez kapsamındaki deney düzeneğinde, ADF 4 filtreden meydana gelmektedir ve filtreleri ortak akımla birleştiren yatay dağıtım kolonunu (distribution pipe) besleyen bir de düşey kolon kullanılmıştır. Düşey kolon, filtre kolonlarıyla eşdeğer olduğundan $A=A_d$ yazılabilir. Bu nedenle Seviye 5 hesaplanırken denklem (2) kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L).



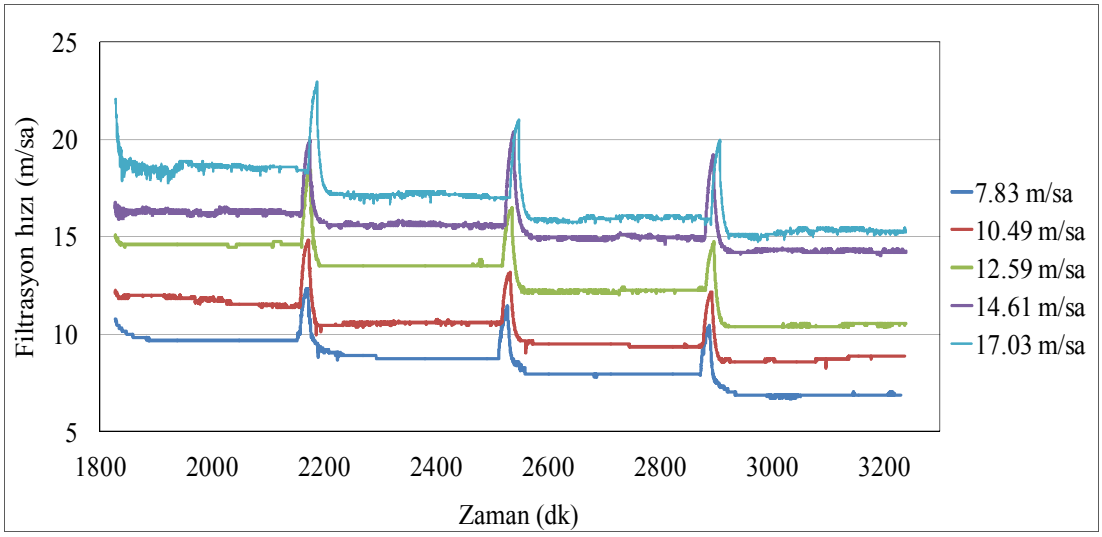
Şekil 5.6. Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L).

Alum dozajı 5 mg/L iken, ortalama filtrasyon hızının değişmesine bağlı olarak 1 no'lu AD filtresinde, 2. filtrasyon döngüsündeki hız değişimi Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Diğer üç AD filtresindeki hız profilleri EK-D'de ve ortalama hızın debiye etkisi bütün filtrasyon döngülerini içerecek şekilde EK-B'de sunulmuştur. Şekil 5.7'den görülebileceği gibi, ortalama filtrasyon hızının artmasıyla hız profilinde belirgin bir değişme gözlemlenmemektedir (ortalama hız artırıldığında, her bir filtrenin hızı elbette artacaktır). Ancak bütün ortalama hızlarda maksimum bir hızdan (geri yıkanan filtre işletmeye alındığında meydana gelen hız) minimum bir hıza (ADF ünitesindeki en kirli filtrenin geri yıkamanın hemen öncesinde ulaştığı hız) kademeli (stepwise) bir azalış görülmektedir. Bu davranış, önceki ADF ile ilgili çalışmalarla [Cleasby and Di Bernardo, 1980; Di Bernardo and Cleasby, 1980] uyum içerisindedir.

Tablo 5.2. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince meydana gelen ortalama su seviyeleri ve filtrasyon hızlarının oranları (2. Filtrasyon döngüleri esas alınmıştır).

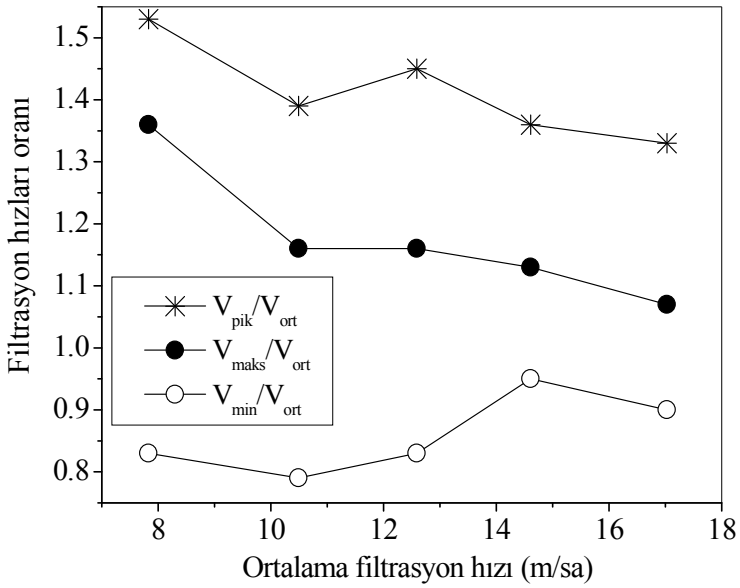
Deney no.	V_{pik}/V_{ort}	V_{maks}/V_{ort}	V_{min}/V_{ort}	V_{maks}/V_{min}	**h_3 (cm)**	**h_4 (cm)**	**h_5 (cm)**
1	1.53	1.36	0.83	1.64	36	51	52.8
2	1.39	1.16	0.79	1.47	37	55	56
3	1.45	1.16	0.83	1.40	75	101	92.8
4	1.36	1.13	0.95	1.19	100	130	116
5	1.33	1.07	0.90	1.19	103	142	125.6

Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde ortalama filtrasyon hızı ile minimum ve maksimum filtrasyon hızları arasındaki ilişki Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Burada V_{maks} ve V_{min} sırasıyla sistemdeki bir filtrenin en temiz ve en kirli olduğu anlardaki hızlarını temsil etmektedir. V_{pik} ise, bir filtrenin en temiz halindeyken, başka bir filtre geri yıkandığı sırada gözlemlenen hızıdır. Şekil 5.8'e bakıldığında, ortalama filtrasyon hızı arttıkça V_{pik}/V_{ort} ve V_{maks}/V_{ort} oranlarının ikisinin de genellikle azaldığı; V_{min}/V_{ort} oranının ise genellikle arttığı görülmektedir.



Şekil 5.7. Farklı ortalama filtrasyon hızlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L, ADF 1).

İngiltere'deki Medmenham ve Burham Arıtma Tesisleri'nin işletilmesi sonucu ortaya çıkan verilerin analiz edildiği bir çalışmaya göre, türbülanslı yük kayıpları arttıkça q_{maks}/q_{ort} oranının azaldığı tespit edilmiştir. Yine aynı çalışmada q_{min}/q_{ort} oranının ADF sistemindeki filtre sayısından hemen hemen bağımsız olduğu ancak türbülanslı yük kayıplarının artışına bağlı olarak büyüdüğü belirtilmiştir [Arboleda et al., 1985]. Bahsedilen çalışmada olduğu gibi, Şekil 5.8'den görülebileceği üzere türbülanslı yük kayıplarının daha fazla olduğu daha yüksek ortalama hızlarına çıkıldıkça V_{pik}/V_{ort} ve V_{maks}/V_{ort} oranlarının ikisinin de genellikle azaldığı; V_{min}/V_{ort} oranının ise genellikle arttığı görülmektedir.



Şekil 5.8. Ortalama filtrasyon hızının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 5 mg/L).

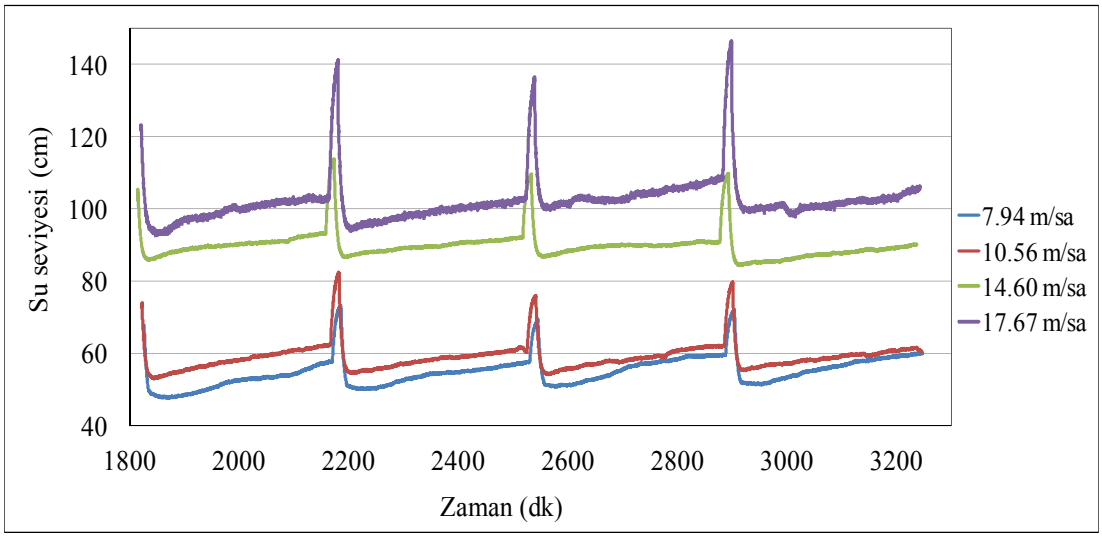
5.1.1.1.2. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneyler

6-9 deneylerinde alum dozajı 7.5 mg/L' ye yükseltilmiş, ortalama filtrasyon hızının ADF sistemindeki su seviyeleri ile filtre hızlarına etkisi incelenmiştir. 7.5 mg/L deneylerinin şartları Tablo 5.3'de sunulmuştur. bu deney setinde dört farklı ortalama hızda filtreler işletilmiştir.

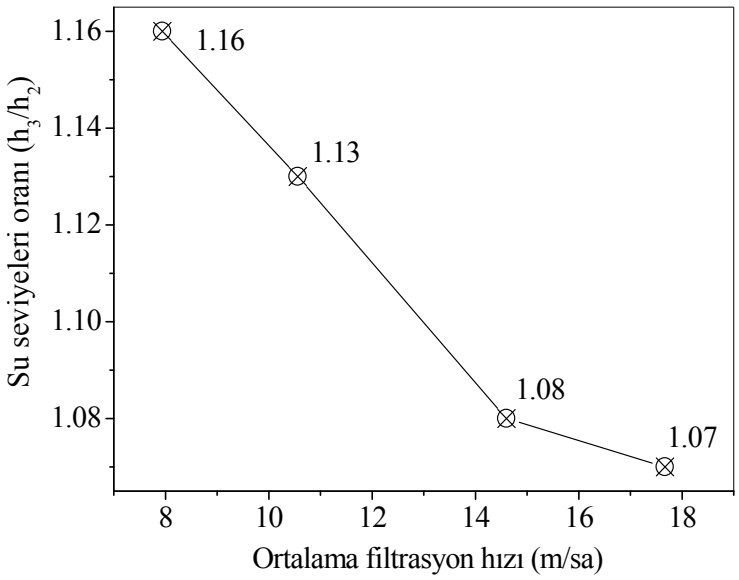
Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde ortalama filtrasyon hızının su seviyesine etkisi Şekil 5.9'da zamana karşı grafiğe geçirilmiştir. Beklendiği gibi ortalama hızın artmasıyla filtrasyon kolonlarındaki ortak su seviyesi artmaktadır. Su seviyesi eğrilerinin karakteristiği birbirine benzemekle birlikte, hız arttıkça geri yıkama piklerinin (h_4) büyüklüğü de artmaktadır. Hızın arttırılmasıyla Seviye 3 ile Seviye 2 arasındaki oranın küçüldüğü görülmektedir (Şekil 5.10). Bu iki seviye arasındaki farkın, belirgin olmasa da azaldığı söylenebilir (Şekil 5.11).Filtre kolonlarındaki pik su seviyeleri (h_4) ve geri yıkama sonrası filtrelerdeki su seviyelerinin dengeye geldiği yükseklikler (h_5) Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerin şartları.

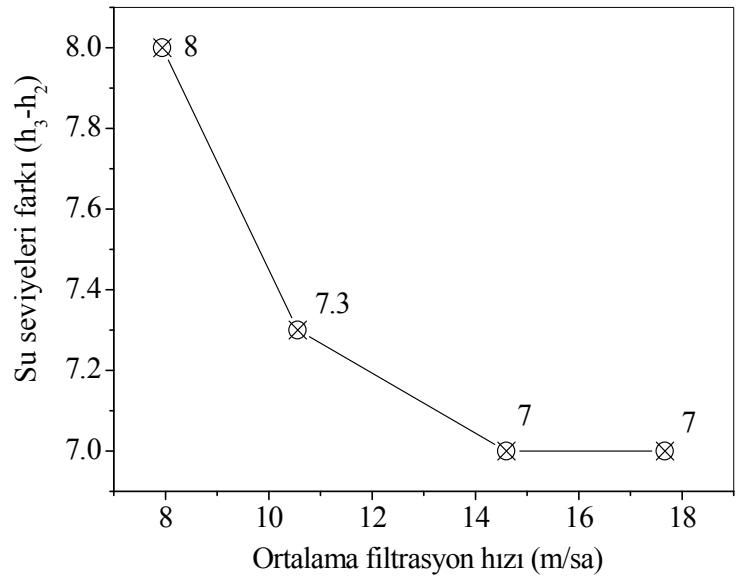
Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
6	9.99	7.5	7.94	17
7	10.02	7.5	10.56	17
8	9.93	7.5	14.60	21
9	9.97	7.5	17.67	17



Şekil 5.9. Farklı ortalama filtrasyon hızlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L).



Şekil 5.10. Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L).

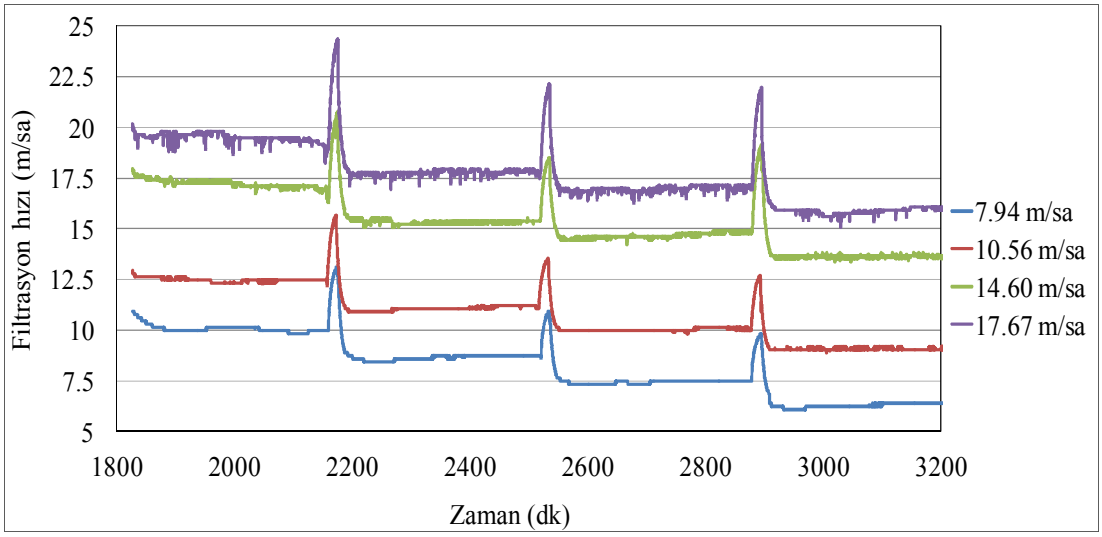


Şekil 5.11. Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L).

Tablo 5.4. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince meydana gelen ortalama su seviyeleri ve filtrasyon hızlarının oranları (2. Filtrasyon döngüleri esas alınmıştır).

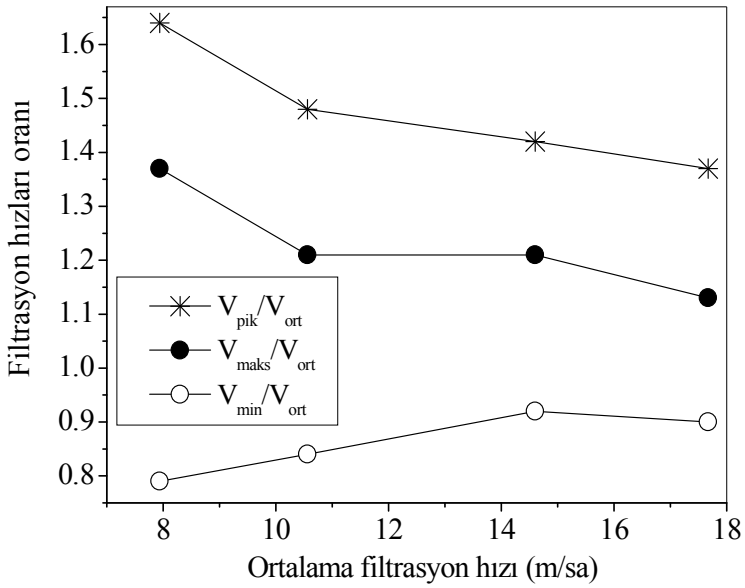
Deney no.	V_{pik}/V_{ort}	V_{maks}/V_{ort}	V_{min}/V_{ort}	V_{maks}/V_{min}	h_3 (cm)	h_4 (cm)	h_5 (cm)
6	1.64	1.37	0.79	1.75	58	71	68.8
7	1.48	1.21	0.84	1.44	61.5	78	74.4
8	1.42	1.21	0.92	1.31	92	110	100
9	1.37	1.13	0.90	1.26	104	141	124.8

7.5 mg/L alum dozajı deneylerine ait filtrasyon hızındaki değişimler Şekil 5.12'de gösterilmektedir. 5 mg/L deneylerine benzer şekilde hızdaki azalma kademeli ve zaman eksenine paralel olarak gerçekleşmiştir. Hız davranışları bu haliyle Cleasby'nin (1993) ADF için yapmış olduğu karakteristik hız davranışına uymaktadır. Ayrıca yine Şekil 5.12'den görülebileceği gibi, dört farklı ortalama filtrasyon hızında da iki geri yıkama piki arasındaki hızın hareketi hemen hemen sabittir. Di Bernardo'ya (1987) göre bir bank DRF sisteminde, eğer bütün filtreler eşit karakterde (aynı filtre ortamı, aynı filtre malzemesi miktarı, aynı filtre yatağı derinliği, aynı filtre tankı boyutları vs.) olursa ve ortak giriş kanalının/borusunun her bir filtreye bağlantı yapıları da (ayrıca drenajları) eşit özelliklerde ise, bütün filtreler aynı anda işletmeye alındığında tesisin toplam giriş debisi filtrelere eşit oranda dağılacak ve her bir filtre sabit debili filtre olarak çalışacaktır. 5 ve 7.5 mg/L deneylerinin hız profillerinde (Şekil 5.7 ve 5.12) bu durum görülmektedir.



Şekil 5.12. Farklı ortalama filtrasyon hızlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L, ADF 1).

Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerdeki maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişki ise Şekil 5.13'te verilmiştir. Ortalama filtrasyon hızı arttıkça, V_{pik}/V_{ort} ve V_{maks}/V_{ort} oranı azalan bir eğilim göstermekte, V_{min}/V_{ort} oranı ise genellikle artmaktadır. Bu sonuç 5 mg/L deneyleri ve Arboleda et al (1985)'in sonuçlarıyla uyum içerisindedir.



Şekil 5.13. Ortalama filtrasyon hızının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 7.5 mg/L).

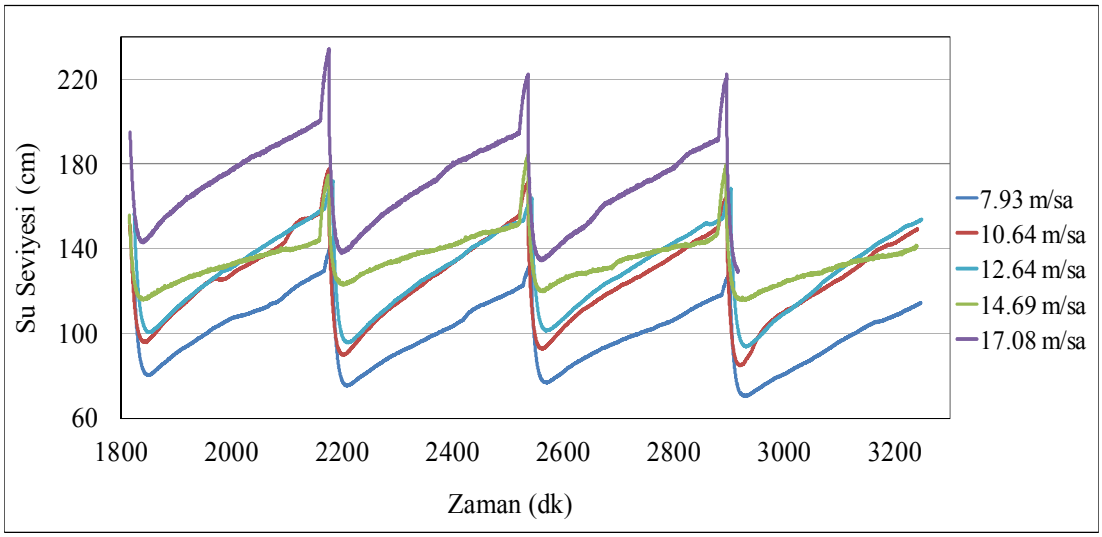
5.1.1.1.3. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneyler

10-14 no'lu beş deneyde alum dozajı 10 mg/L olarak sabit tutulmuş, ortalama filtrasyon hızları değiştirilmiş, yaklaşık 8 ile 17 m/sa arasında filtrasyon hızları kullanılmıştır.

Sabit alum dozajı altında, ortalama filtrasyon hızının, su seviyesi değişimine etkisi Şekil 5.14'de verilmiştir. Genellikle (Deney 13 (14.69 m/sa) haricindeki deneylerin) benzer eğimlerde su seviyeleri meydana getirdikleri görülmektedir. Ortalama hız arttıkça filtre kolonu içerisindeki su seviyesi ve geri yıkama pik seviyeleri de artmaktadır (Tablo 5.6).

Tablo 5.5. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerin şartları

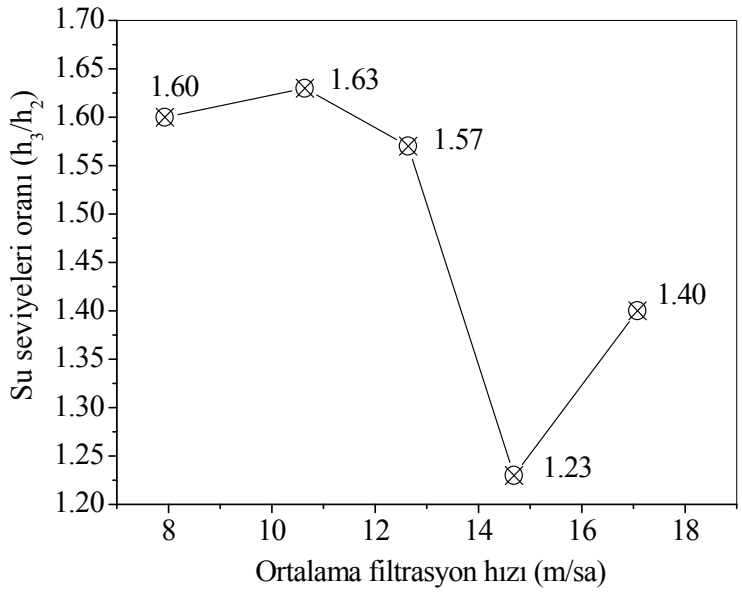
Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
10	10.03	10	7.93	23
11	9.85	10	10.64	21
12	10.0	10	12.64	21
13	9.95	10	14.69	23
14	9.46	10	17.08	19



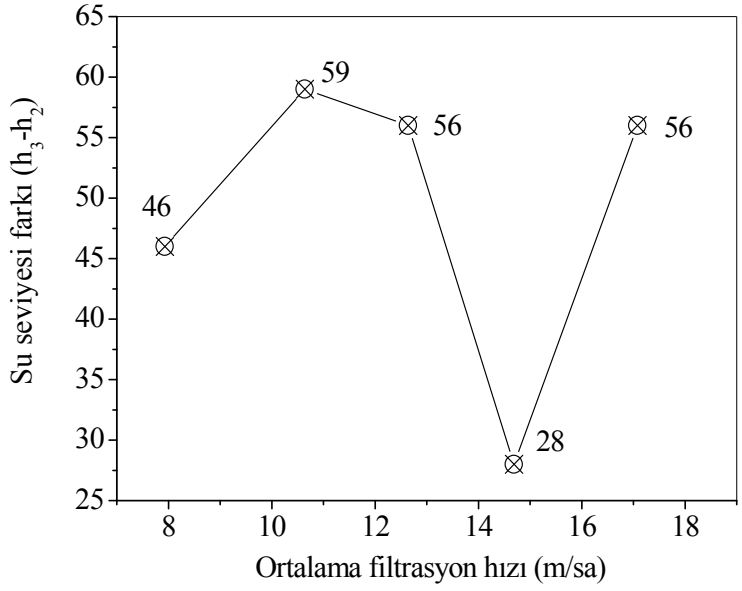
Şekil 5.14. Farklı ortalama filtrasyon hızlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L)

Aynı hidrolik yük ve aynı filtre sayısı şartları altında, ortalama filtrasyon hızı arttırıldıkça, maksimum ve minimum hızlar artmakta ve iki geri yıkama arasındaki su seviyesi değişimleri azalmaktadır [Di Bernardo, 1987]. Bu seviye azalışı 5 ve 7.5 mg/L deneylerinde açıkça görülmekte iken 10 mg/L deneylerinde belirgin bir eğilim

ortaya çıkmamıştır (Şekil 5.16). h_3/h_2 oranında da benzer bir durum söz konusudur (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L).



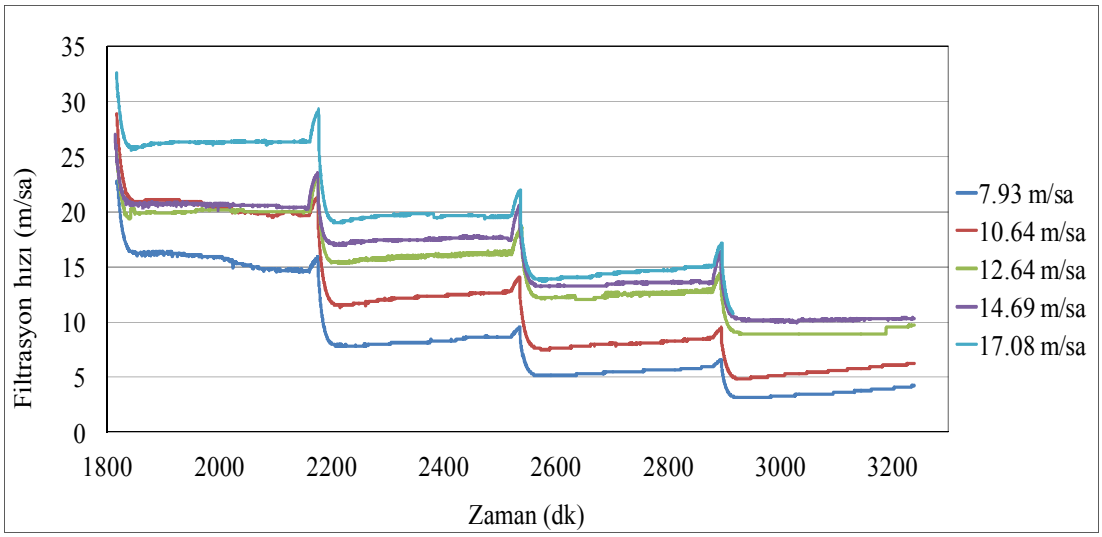
Şekil 5.16. Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L)

Tablo 5.6. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince meydana gelen ortalama su seviyeleri ve filtrasyon hızlarının oranları (2. Filtrasyon döngüleri esas alınmıştır).

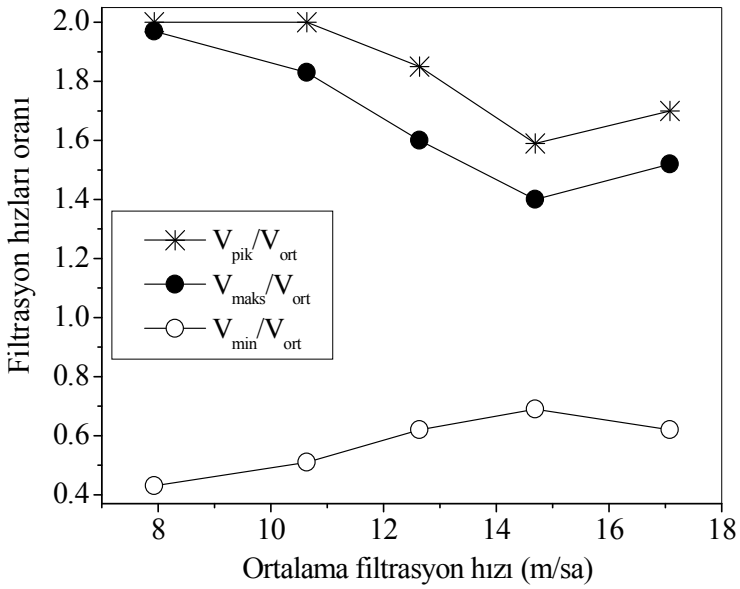
Deney no.	V_{pik}/V_{ort}	V_{maks}/V_{ort}	V_{min}/V_{ort}	V_{maks}/V_{min}	h_3 (cm)	h_4 (cm)	h_5 (cm)
10	2.00	1.97	0.43	4.62	123	134	119.2
11	2.00	1.83	0.51	3.57	153	171	148.8
12	1.85	1.60	0.62	2.57	155	169	147.2
13	1.59	1.40	0.69	2.03	148	180	156
14	1.70	1.52	0.62	2.44	195	226	192.8

10 mg/L deneylerinin 2. Filtrasyon döngüsündeki su seviyesi değişimleri Şekil 5.17'de verilmiştir. Döngü başında yaklaşık 25-35 m/sa olan filtrasyon hızları, filtreler kirlendikçe yaklaşık 5-10 m/sa'ya kadar düşmüşlerdir. Cleasby and Di Bernardo (1980) ve Cleasby (1993) mevcut SDF sistemlerinin işletilmesinden elde edilen verilerin kullanılıp, bazı kabuller de yapılmasıyla ADF sistemlerinin hidrolik davranışlarının tahmin edilebileceği ve ADF filtrelerinin dizayn edilebileceğini savunmuşlardır. Bu kabullerden biri de filtrasyon hızlarıyla ilgili olup, maksimum hızın (V_{maks}), tasarım hızının (V_{ort}) 1.5 katı ve minimum hızın da (V_{min}) tasarım hızının 0.7 katı olarak ayarlanması gerektiği görüşüdür. Akgiray and Saatçı (2000)'e göre V_{maks} ve V_{min} hızlarının tasarım (V_{ort}) simetrik katları olarak kabul edilmesini doğrulayan bir veri mevcut değildir. Bu tez çalışması kapsamında beş farklı ortalama filtrasyon hızı ve dört farklı alum dozajı kullanılarak oluşturulan detaylı bir deney matriksiyle bu kabulün her zaman geçerli olup olmadığı incelenmiştir. Gerçekten de

Tablo 5.2, 5.4 ve 5.6'ya bakıldığında yukarıdaki $V_{maks} = 1.5\ V_{ort}$ ve $V_{min} = 0.7\ V_{ort}$ eşitliklerinin her zaman geçerli olmadığı bulunmuştur.



Şekil 5.17. Farklı ortalama filtrasyon hızlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L, ADF 1).



Şekil 5.18. Ortalama filtrasyon hızının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 10 mg/L).

5.1.1.1.4. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneyler

Bu çalışma kapsamındaki en yüksek alum dozajı 12.5 mg/L'dir ve 15-18 no'lu deneylerde kullanılmıştır. Deney şartları Tablo 5.7'de sunulmuştur.

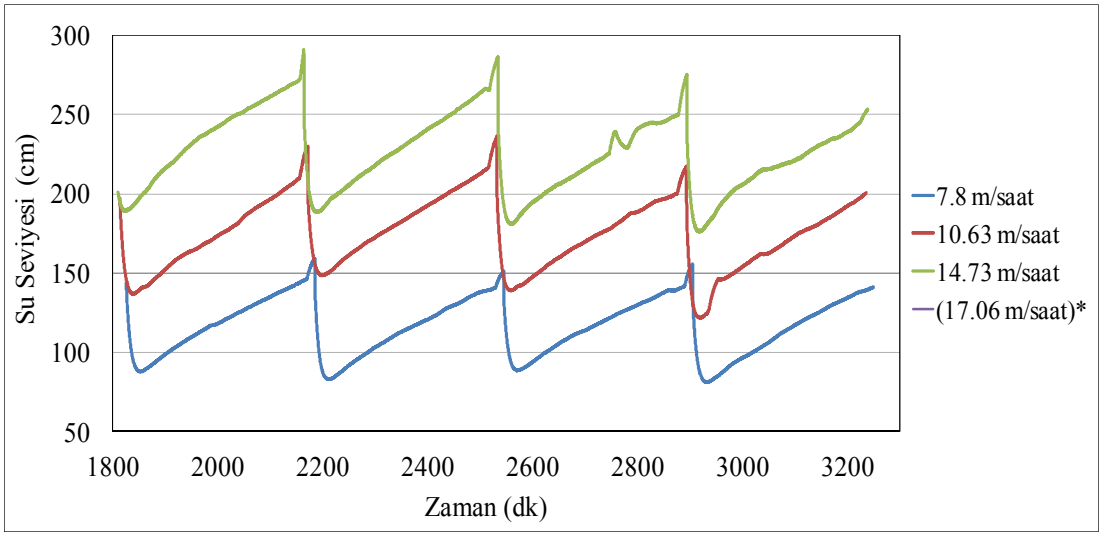
12.5 mg/L alum dozajı deneylerindeki su seviyesi değişimleri Şekil 5.19'da görülmektedir. 17.06 m/sa deneyinde, 12 saatlik filtrasyon sonunda filtre kolonu içerisinde kullanılabilir maksimum yük kaybı aşıldığı için filtrasyon devam ettirilemediğinden Şekil 5.19'da 12.5 mg/L deneyinin 2. filtrasyon döngüsü yer almamaktadır. Şekildeki diğer bir yüksek ortalama filtrasyon hızının (14.73 m/sa) su seviyesi değişimine bakılacak olursa, su seviyesinin 300 cm'ye yaklaştığı görülmektedir.

Tablo 5.7. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerin şartları.

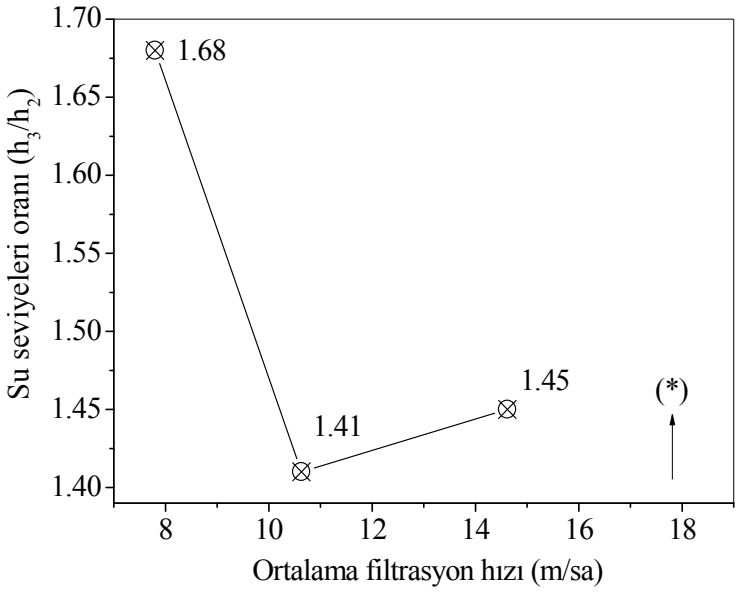
Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
15	9.90	12.5	7.80	18
16	9.87	12.5	10.63	22
17	9.96	12.5	14.62	21
18	9.30	12.5	17.06	20

Materyal ve Metot bölümündeki Şekil 4.5'ten anlaşılabileceği gibi filtre kolonları su seviyesinin emniyetli şekilde en fazla 281 cm'ye kadar yükselmesine izin vermektedir. 14.73 m/sa deneyinde geri yıkama pikinde su seviyesi filtre kolonunun en üst kısmına ulaşmıştır. Hem literatürde ve uygulamalarda konvansiyonel olarak kullanılan hız ve dozajlar hem de bu çalışmadaki su seviyesi davranışları dikkate alınarak 12.5 mg/L alum dozajının ve yaklaşık 17 m/sa ortalama filtrasyon hızının

üzerine çıkılan deneyler yapılmamıştır. Şekil 5.19'dan görülebileceği gibi sabit alum dozajında farklı ortalama hızlarda Seviye 3 ve Seviye 2 arasındaki ilişkiler Şekil 5.20 ve 5.21'de, Seviye 4 ve Seviye 5 değerleri de Tablo 5.8'de sunulmuştur.

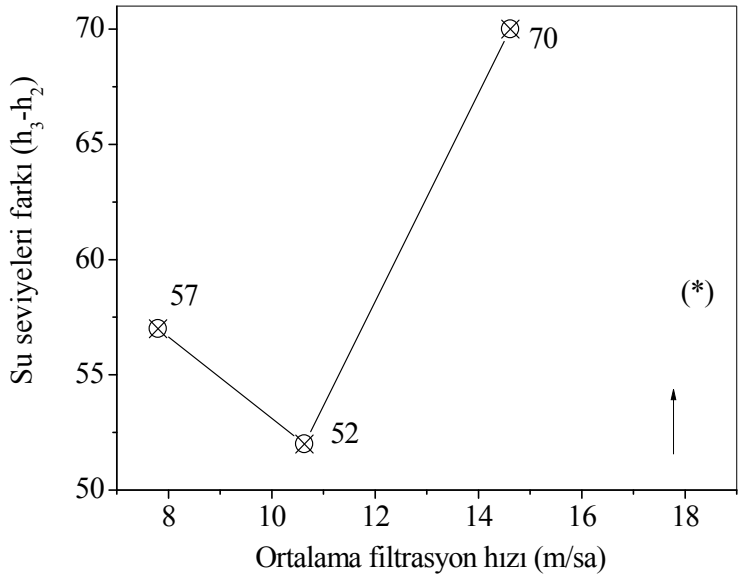


Şekil 5.19. Farklı ortalama filtrasyon hızlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L, *: 17.06 m/sa deneyinde filtreler yalnızca 720 dakika işletilmiştir, dolayısıyla bu grafikte yer almamaktadır).



Şekil 5.20. Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L, *: 17.06 m/sa deneyinde filtreler yalnızca 720 dakika işletilmiştir, dolayısıyla bu grafikte yer almamaktadır).

12.5 mg/L alum dozajı deneylerine ait Filtre 1 hız değişimleri Şekil 5.22'de verilmiştir. Buraya kadar anlatılan deneylerde (5, 7.7 ve 10 mg/L alum deneyleri) grafiklerde (Şekil 5.7, 5.12 ve 5.17) görülen her basamaktaki hız sabit olarak devam etmişti. Şekil 5.22'deki deneylerde ise ilk basamakta (Filtre 1 geri yıkanıp devreye alındığında) hızların zaman eksenine paralel değil de azalan-eğimli oldukları görülmekte, sonraki basamaklarda yine sabite yakın bir davranış sergilemektedirler. Chaudhry (1987b) ve Akgiray and Saatçı (1998a) kullandıkları matematiksel modellerle ADF'de geri yıkamalar arasındaki hız davranışını tahmin etmişlerdir (Şekil 5.2'deki kesikli çizgi ile gösterilen hız profili). Bu modellere göre, ilk geri yıkama sonrası filtre hızı daha eğimli olarak azalırken, takip eden filtreler geri yıkandıkça, her geri yıkama sonrasında filtre hızı (h_2 ve h_3 seviyeleri arasındaki) neredeyse sabit bir hal almaktadır. 12.5 mg/L deneylerinde (bu çalışmadaki en yüksek alum dozajında) görülen bu hız davranışı bahsedilen matematiksel modellerle uyum içerisindedir. Hız oranları Şekil 5.23'de gösterilmektedir. 12.5 mg/L deneylerindeki hız oranları da önceki bazı çalışmalarla [Arboleda et al. 1985; Di Bernardo, 1987b] örtüşmektedir.

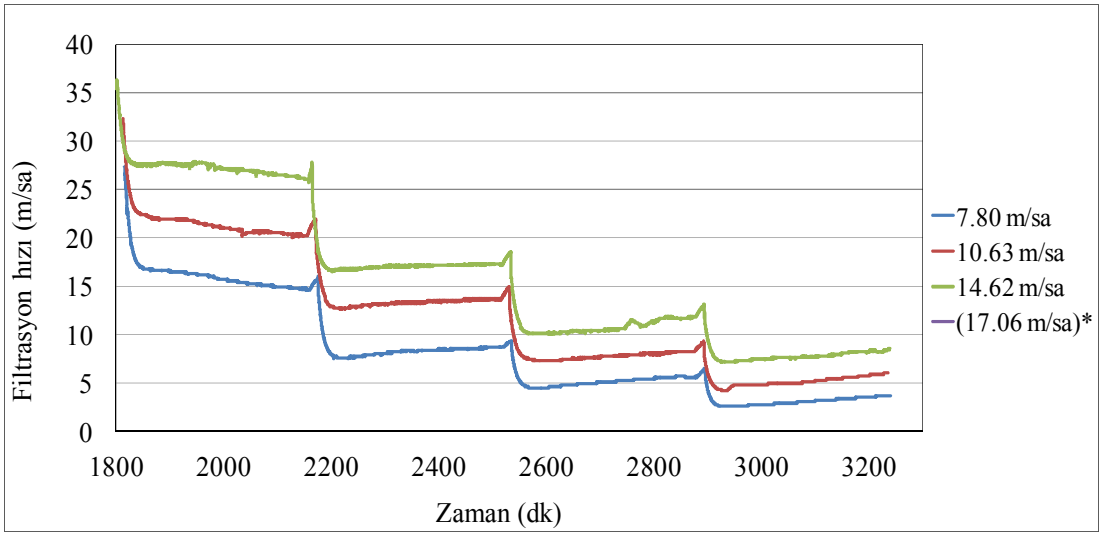


Şekil 5.21. Ortalama filtrasyon hızının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L, *: 17.06 m/sa deneyinde filtreler yalnızca 720 dakika işletilmiştir, dolayısıyla bu grafikte yer almamaktadır).

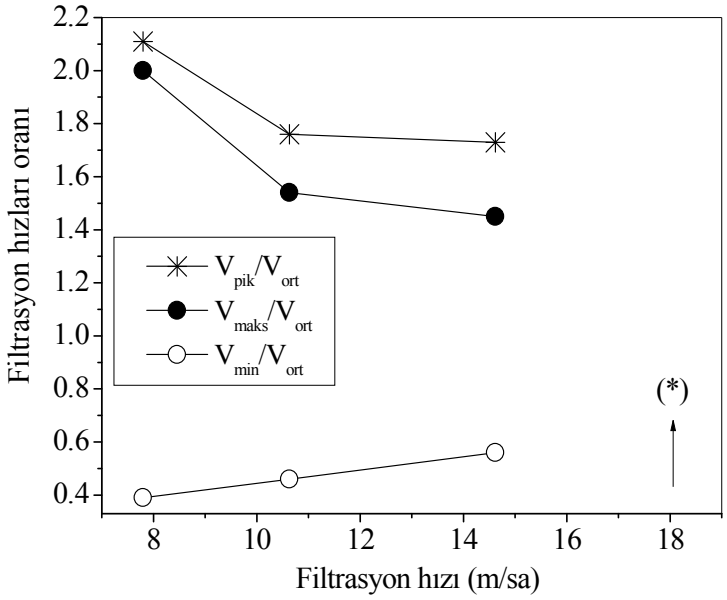
Tablo 5.8. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince meydana gelen ortalama su seviyeleri ve filtrasyon hızlarının oranları (2. Filtrasyon döngüleri esas alınmıştır).

Deney no.	V_{pik}/V_{ort}	V_{maks}/V_{ort}	V_{min}/V_{ort}	V_{maks}/V_{min}	h_3 (cm)	h_4 (cm)	h_5 (cm)
15	2.11	2.00	0.39	4.67	141	156	136.8
16	1.76	1.54	0.46	3.32	180	210	180
17	1.73	1.45	0.56	2.56	227	247	209.6
18*	-	-	-	-	-	-	-

*Deney 18'de (12.5 mg/L alum dozajı ve 17.1 m/sa ortalama filtrasyon hızı) hem SDF hem de ADF, maksimum kullanılabilir yük kaybına eriştiklerinden, su seviyelerinin filtre kolonunun maksimum yüksekliğini aşmamaları için 12 saat işletilebilmişlerdir.



Şekil 5.22. Farklı ortalama filtrasyon hızlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L, ADF 1).

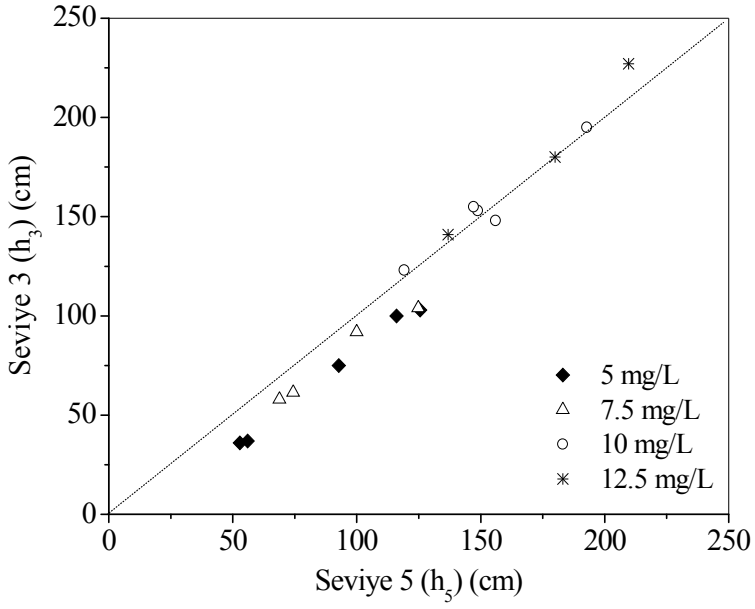


Şekil 5.23. Ortalama filtrasyon hızının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, alum dozajı: 12.5 mg/L, *: 17.06 m/sa deneyinde filtreler izin verilebilir maksimum yük kayıplarına eriştiklerinden yalnızca 720 dakika işletilebilmiştir, dolayısıyla bu grafikte yer almamaktadır).

Akgiray and Saatçı (1998a) çalışmalarında, bir ADF sisteminde bir filtre geri yıkandıktan sonra işletmeye alındığında bu filtrenin su seviyesinin diğer filtrelerin su seviyeleriyle aynı olduğu seviyeyi Seviye 5 olarak adlandırmışlardır. Bu seviye literatürde ilk kez Seviye 5 olarak, adı geçen çalışmada bildirilmiştir. Buna göre geri yıkanan filtre işletmeye alınır alınmaz (bu arada diğer filtrelerdeki ortak su seviyesi Seviye 4'e ulaşmıştır) çok hızlı bir şekilde Seviye 5'e iner. Bu keskin düşüşün sebebi, işletmedeki filtrelerde biriken suyun, devreye alınan temiz filtreye hücum etmesidir. Seviye 5'e inen su, bundan sonra daha yavaş bir şekilde işletme döngüsünün başlangıcı olan Seviye 2'ye iner. Bir sonraki geri yıkamaya kadar (Seviye 3'e kadar) filtre tıkandıkça yük kaybının artışına bağlı olarak yavaş yavaş yükselir. Döngü bu şekilde devam eder. Cleasby (1993), geri yıkanan bir filtrenin su seviyesinin (ayrıca ADF sistemindeki diğer filtrelerdeki su seviyelerinin) tekrar Seviye 3'e geleceğini varsaymış ve bu varsayımın ADF sistemlerinin tasarlanmasında kullanılabilecek matematik modellerde bir kolaylık sağlayabileceğini ileri sürmüştür. Akgiray ve Saatçı (1998a) ise filtrelerdeki su seviyesinin Seviye 3'te değil, başka bir seviyede meydana geleceğini iddia etmişler ve ADF literatürüne yukarıda bahsedilen Seviye 5'i kazandırmışlardır. Yine Akgiray and Saatçı (2000), Cleasby (1993)'nin bu varsayımını destekleyen bir sonuç olmadığını vurgulamışlardır. İşte bu tez kapsamında Seviye 3 ve Seviye 5'in aynı seviye olup olmadığı, bir başka deyişle geri yıkanmış temiz filtre, işletmeye alındığında ortak su seviyelerinin Seviye 3'te dengeye gelip gelmediği detaylı bir deneysel matriks yardımıyla laboratuvar kontrollü bir pilot tesiste incelenmiştir.

Şekil 5.24'te ilk 17 deneyin (Deney 18, filtrelerin 12 saatte tıkanmasından ve 2. döngüye geçilememesinden dolayı burada verilmemiştir) ayrı ayrı Seviye 3 ve 5 değerleri arasındaki ilişki verilmiştir. Buradaki her seviye 2. Döngüde (bu döngüde filtre davranışları stabildir ve sonraki döngüde de benzer karakteristikdedir) geçen birden fazla Seviye 3 ve Seviye 5 değerlerinin aritmetik ortalamalarıdır. Daha önce de belirtildiği gibi, Cleasby (1993) hiçbir açıklama ya da ispat yapmaksızın ortaya koyduğu kabulünü ADF tasarım prosedüründe kullanmaktadır. 10 ve 12.5 mg/L dozajlarının kullanıldığı 8 deneyde (10-17. deneyler) 3 ve 5 seviyeleri birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Diğer iki düşük dozaj deneylerinde (5 ve 7.5 mg/L alum kullanılan ilk 9 deney), Seviye 3, Seviye 5'in % 15-20 daha altında meydana

gelmiştir. 5 and 7.5 mg/L alum deneylerinin çoğunda Seviye 3 (bazılarında Seviye 4 bile) geri yıkama çıkışı seviyesinde (filtre çıkış seviyesinden 71 cm daha yüksektedir) ve hatta daha düşük seviyede kalmıştır. Bu deneylerde düşük yumaklaştırıcı kullanılması nedeniyle filtrede, kolon içinde yüksek su seviyelerine sebep olabilecek şekilde bir tıkanıklık meydana gelmemiş, bu sebeple de filtre kolonu yüksekliğinin (filtre çıkış seviyesinden 281 cm daha yüksektedir) çoğu kullanılmamıştır. Normalde, tam ölçekli tesislerde geri yıkama çıkışı seviyesi h_3 ve h_4 seviyelerinin altında kalmaktadır. Diğer bir deyişle, bu çalışmadaki düşük dozaj deneylerinde karşılaşılan bu durum, pratikte normalen rastlanan bir durum değildir. Kullanılabilir filtre kolonu yüksekliğinin (kum yatağı üzerindeki 281 cm'lik mesafe) önemli bir kısmının kullanılabildiği deneylerde Seviye 3 ve Seviye 5 arasında belirgin bir fark görülmemektedir (Şekil 5.24, 10 ve 12.5 mg/L deneyleri).



Şekil 5.24. Farklı deney şartlarında ADF'de Seviye 3 ve Seviye 5 ilişkisi.

Sonuç olarak, buraya kadar incelenen 18 deneyin sonuçları topluca göz önüne alındığında ADF'deki su seviyeleri alum dozajından önemli ölçüde etkilenmektedir (Tablo 5.2, 5.4, 5.6 ve 5.8). Örneğin 5 mg/L deneylerinde Seviye 3 (sistemdeki en kirli filtrenin geri yıkanmaya alındığı seviye), ortalama filtrasyon hızının 7.83'ten 17.03 m/sa'ya yükseltilmesine bağlı olarak 36 ilâ 103 cm arasında değişmektedir. Bu

değişim 12.5 mg/L deneylerinde ise daha fazladır: 141 ilâ 281 cm (filtre kolonunun en üst seviyesi). 12.5 mg/L deneylerinden olan Deney 18'de suyun filtre kolonundan taşmasını engellemek için filtrasyon belirlenen geri yıkama sürelerinden çok daha önce durdurulmuştur.

Yerleşim yerlerinde artan su ihtiyacını karşılayabilmek için, ortalama filtrasyon hızında artış meydana gelebilir ya da arıtma işlemini optimize edebilmek için yumaklaştırıcı dozlarında (ayrıca çeşidinde ve/veya yumaklaştırıcı yardımcısı dozajında ve tipinde) değişiklikler yapılabilir. Burada elde edilen sonuçlar filtrelerdeki su seviyelerinin böyle değişikliklerden kuvvetle etkilendiğini göstermektedir. Daha genel söylemek gerekirse, bir ADF sistemindeki su seviyesi değişimlerine bakılarak giriş suyundaki askıda katı madde konsantrasyonundaki değişimler tahmin edilebilir.

5.1.1.2. Farklı Filtrasyon Hızlarında Alum Dozajının Etkisi

Filtrasyon tesislerinde arıtmayı iyileştirmek (optimize edebilmek) için, giriş suyunun (arıtılacak yüzeysel suyun) özelliklerine (su kalitesi ve debi gibi) bağlı olarak, yumaklaştırıcı dozajında değişiklik yapılabilir. Örneğin yumaklaştırıcı dozajının artırılması çoğu zaman çıkış suyu kalitesini iyileştirebildiği gibi, filtredeki yük kayıplarını artırabilmekte ve filtrasyon süresini kısaltabilmektedir. Bu durum, doğrudan filtre tankı içerisindeki su seviyesi ile ilgilidir. Bir ADF sistemi tasarlanırken yumaklaştırıcı dozajı ve filtre hızı gibi parametrelerden etkilenebilecek tıkanıklık yük kaybının doğru belirlenmesi, AD filtrelerinden birinin geri yıkanırken işletmede kalan diğer filtrelerdeki pik su seviyesini karşılayabilecek yeterli yükseklikte filtre duvarının inşa edilebilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır [Akgiray and Saatçı, 1998b]. Bu amaçla bu bölümde yumaklaştırıcı dozajının ADF sisteminin hidrolik davranışlarına etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Bölüm 5.1.1.1'de farklı deney setlerinde alum dozajı sabit tutularak, ortalama filtrasyon hızının ADF sisteminin hidrolik özelliklerine etkisi incelenmişti. Bu bölümde ise ortalama filtrasyon hızı sabit tutulmak suretiyle farklı alum dozajlarının ADF sistemindeki su seviyesi ve hız davranışlarına nasıl etki ettiği araştırılmıştır. Araştırmalar, önceki bölümde bahsedilen 18 adet deney üzerinde gerçekleştirilmiş, her bir ortalama hız deney setinin deney şartları tablo ile verilirken deney numaraları da bir sütunda belirtilmiştir.

5.1.1.2.1. Filtrasyon hızının ortalama 7.9 m/sa olduğu deneyler

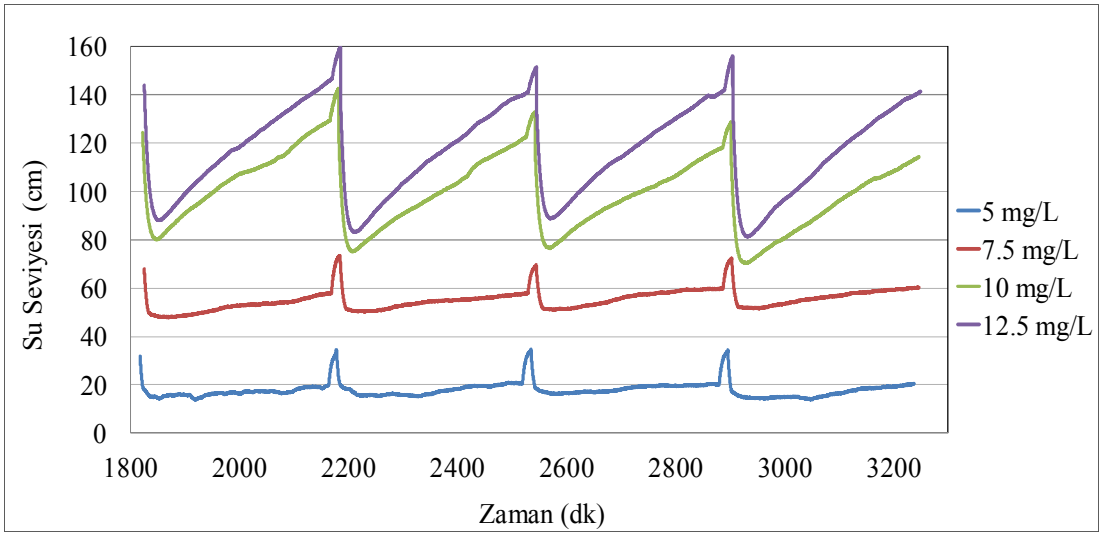
Ortalama filtrasyon hızının 7.9 m/sa olduğu deneylerde filtreler dört farklı alum dozajında işletilmiştir. Filtrelere giriş debileri filtre sisteminin girişinde bulunan rotametre yardımıyla kontrol edilmiştir. Filtrelerin çıkışlarında yer alan türbin tip debi ölçer cihazlarının deney süresince kaydettiği debi değerlerinden ortalama debi

elde edilmiş, filtre kolonlarının alanları kullanılarak da ortalama filtre hızları hesaplanmıştır. Yumaklaştırıcı ilâvesi ise, sabit yük tankından filtre kolonlarına gelen ham su hattı üzerinde oluşturulan dozlama noktasından sıvı çözelti olarak uygulanmıştır (Bkz. Bölüm 4.6). Tablo 5.9'da 7.9 m/sa deneylerine ait işletme koşulları verilmiştir.

Tablo 5.9. Ortalama filtrasyon hızının 7.9 m/sa olduğu deneylerin şartları.

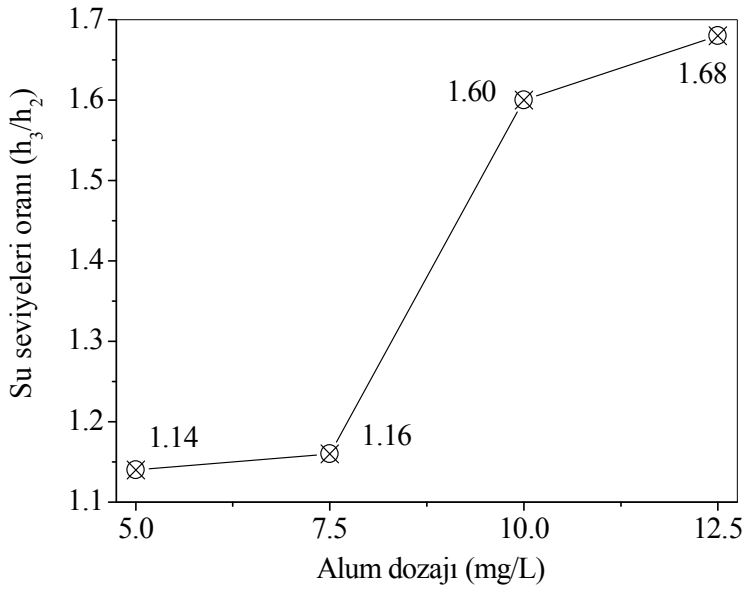
Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
1	9.92	5	7.83	20
6	9.99	7.5	7.94	17
10	10.03	10	7.93	23
15	9.90	12.5	7.80	18

Şekil 5.25'de 7.9 m/sa deneylerine ait su seviyesi değişimleri gösterilmektedir. Her bir eğri, farklı bir dozaj deneyinin ikinci döngüsünü temsil etmektedir. Şekilden görülebileceği ve tahmin de edilebileceği gibi, alum dozajı arttıkça (filtre yatağı içerisindeki tıkanma yük kaybı artmakta) su seviyesi de artmaktadır. Seviye 3 ve Seviye 2 arasındaki ilişkiler oran ve fark bakımından sırasıyla Şekil 5.26 ve 5.27'de verilmiştir. İlk iki alum dozajı deneylerindeki eğim, dozajın 10 ve 12.5 mg/L'ye yükseltilmesiyle belirgin bir şekilde artmıştır.

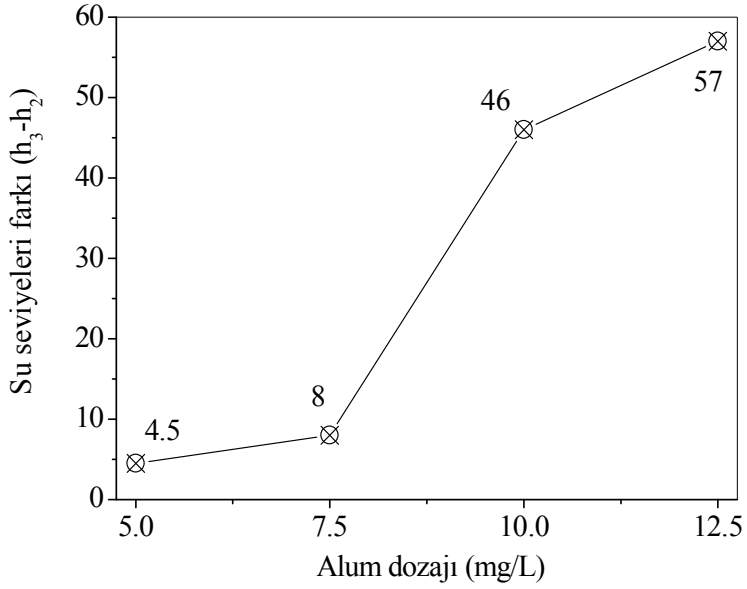


Şekil 5.25. Farklı alum dozajlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa).

Şekil 5.25'te göze çarpan bir başka nokta ise alum dozajı artışı su seviyesi eğimlerini (su seviyesinin h_2'den h_3'e yükseliş hızı) önemli ölçüde etkilerken geri yıkama pik yüksekliklerini (h_3 ile h_4 arasındaki fark) aynı şekilde etkilemediği görülmektedir: 5-12.5 mg/L dozajlarında bu fark sırasıyla 15, 13, 11 ve 15 cm olmuştur. Bu deney setinin sonuçları, yumaklaştırıcı dozajının h_3 seviyesini belirlemede önemli bir etken olduğunu göstermiştir.



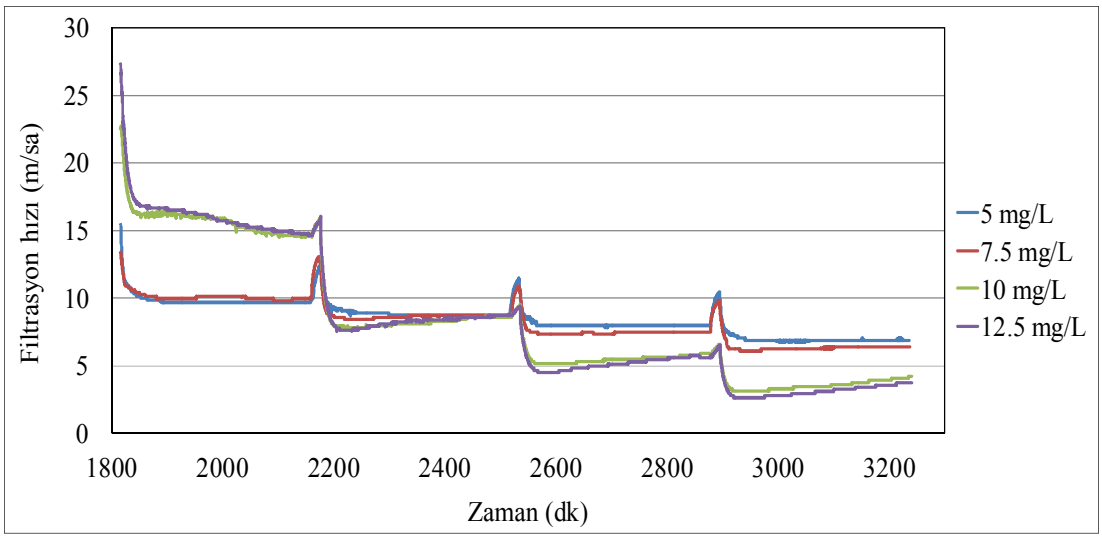
Şekil 5.26. Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa).



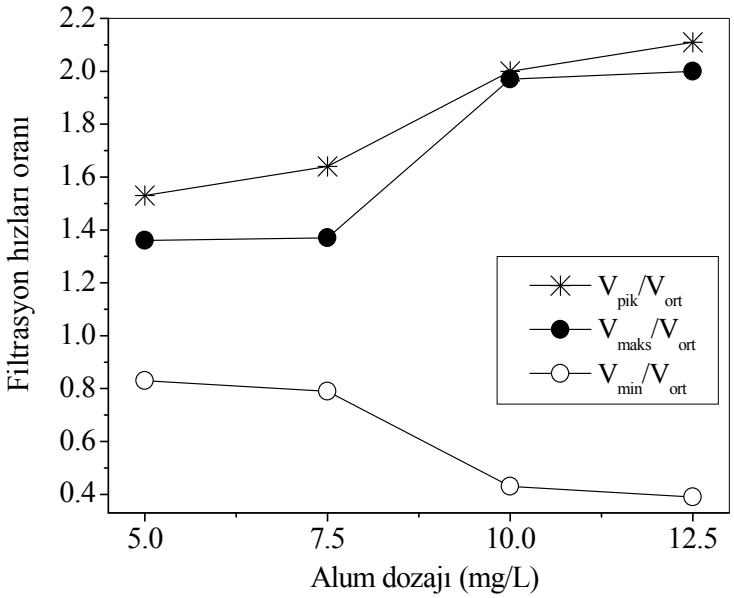
Şekil 5.27. Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa).

Ortalama filtrasyon hızının 7.9 m/sa olduğu deneylerde alum dozajının değişmesine bağlı olarak 1 no'lu AD filtresinde, 2. filtrasyon döngüsündeki hız

değişimi Şekil 5.28'de gösterilmektedir. Diğer üç AD filtresindeki hız profilleri EK-D'de ve dozajın debiye etkisi bütün filtrasyon döngülerini içerecek şekilde EK-C'de sunulmuştur. Şekil 5.28'den görülebileceği gibi, alum dozajının 10 ve 12.5 mg/L olduğu deneylerde V_{maks} ile V_{min} farkı büyümektedir. Örneğin, 5 ve 7.5 mg/L deneylerinde V_{maks}/V_{min} oranı sırasıyla 1.64 ve 1.75 iken, 10 ve 12.5 mg/L deneylerinde bu değerler sırasıyla 4.62 ve 4.67'ye yükselmiştir. Pik, maksimum, minimum ve ortalama hızlar arasındaki diğer bağıntılar Şekil 5.29'da verilmiştir. Alum dozajının artırılmasıyla V_{pik}/V_{ort} ve V_{maks}/V_{ort} oranları artma eğilimindeyken, V_{min}/V_{ort} oranı ise azalma eğilimindedir. Bu sonuçlara göre hız profilleri, ortalama hızın artırılmasında sergiledikleri davranışın tam tersini yumaklaştırıcı dozajının artırılmasında ortaya koymaktadır. Şekil 5.28'de göze çarpan bir diğer hız davranışı da yüksek dozajlarda (10 ve 12.5 mg/L) pikler arasındaki hız seyrinin zaman eksenine paralel (sabit hız) değil de, bir miktar artıyor olmasıdır. Alum dozajının sabit tutulup ortalama filtrasyon hızının artırıldığı deneylerde böyle bir hız değişimine rastlanmazken, alum dozajının etkisinin incelendiği deneylerde ilk kez böyle bir hız profili meydana gelmiştir.



Şekil 5.28. Farklı alum dozajlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa, ADF 1).



Şekil 5.29. Alum dozajının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa)

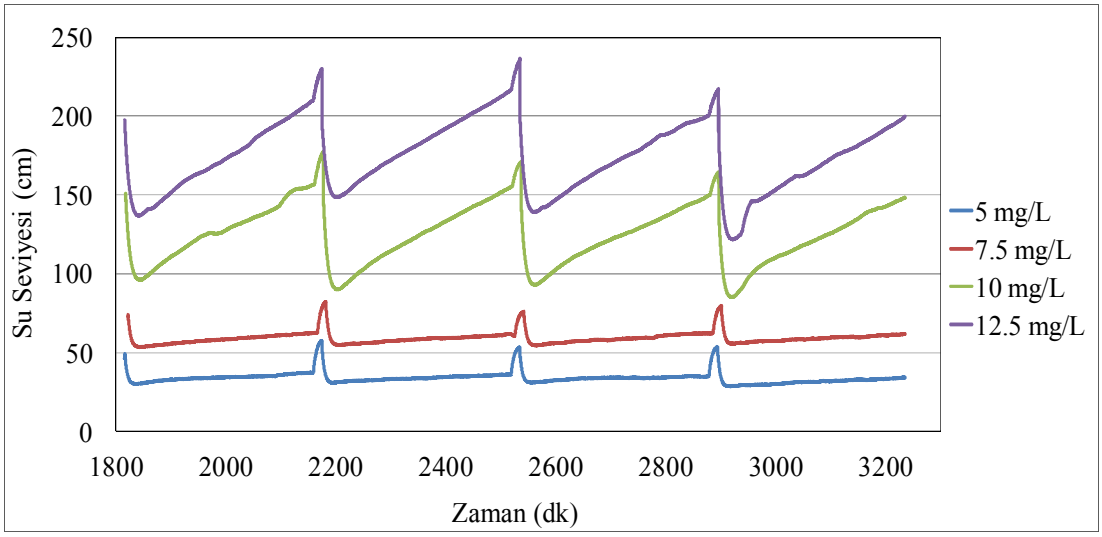
5.1.1.2.2. Filtrasyon hızının ortalama 10.6 m/sa olduğu deneyler

Ortalama filtrasyon hızının 7.9 m/sa olduğu deneylerde gözlenen, alum dozajına bağlı ADF hidrolik davranışları Deney 2, 7, 11 ve 16'da ortalama filtrasyon hızı 10.6 m/sa'ya (dört deneyin hız ortalaması) yükseltilerek ve aynı şekilde dört farklı alum dozajı kullanılarak bir kez daha incelenmiş, Deney şartları Tablo 5.10'da verilmiştir.

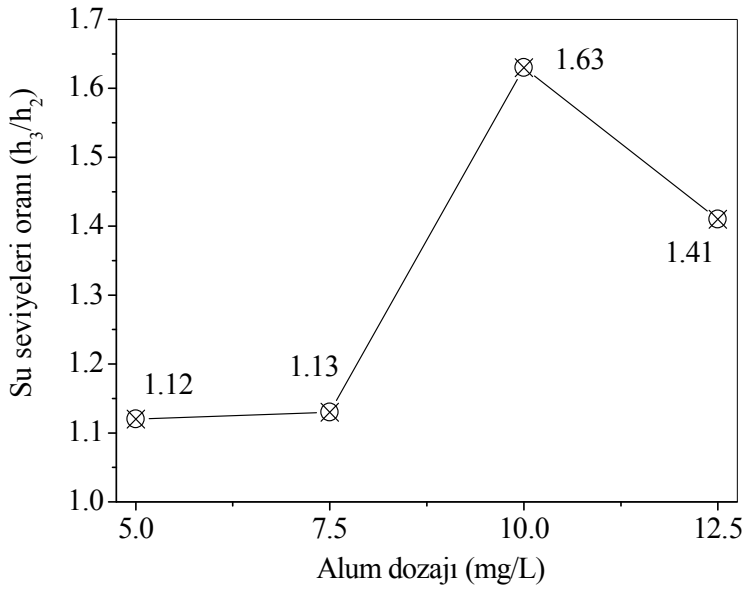
Tablo 5.10. Ortalama filtrasyon hızının 10.6 m/sa olduğu deneylerin şartları.

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
2	10.03	5	10.49	24
7	10.02	7.5	10.56	17
11	9.85	10	10.64	21
16	9.87	12.5	10.63	22

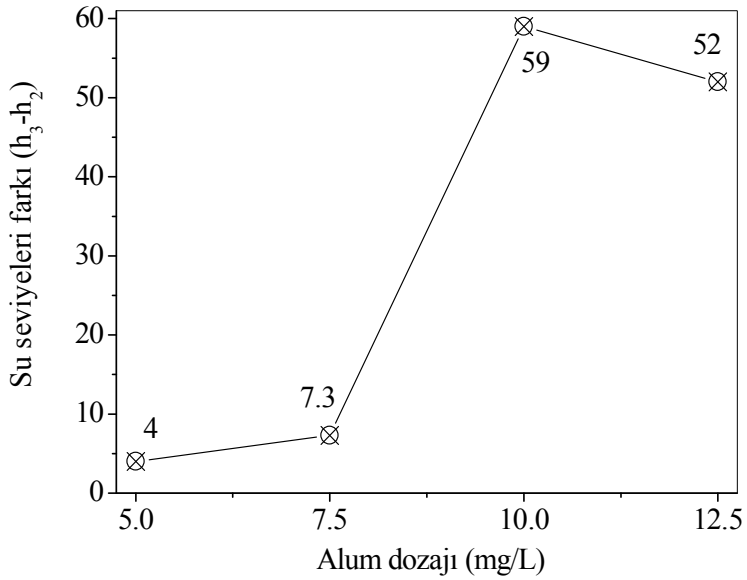
Şekil 5.30'a bakıldığında, 10.6 m/sa sabit ortalama filtrasyon hızında alum dozajındaki değişimlerin, su seviyesini 7.9 m/sa deneylerine benzer şekilde etkilediği görülmektedir. 5 mg/L deneylerinde filtrasyon süresinde (iki geri yıkama piki arasında) su seviyesi ortalama 33 ilâ 37 cm arasında değişirken, alum dozajının 7.5 mg/L'ye artırılmasıyla bu değerler 54 ilâ 61 cm civârında olmuştur. Daha yüksek dozajlarda; 10 mg/L'de filtrasyon 94 cm su seviyesiyle başlamış, 6 saat sonunda (birbirini takip eden iki ADF geri yıkaması arasında geçen süre) 153 cm'ye ulaşmıştır. 12.5 mg/L deneyinde ise bu rakamlar 128-180 cm şeklinde meydana gelmiştir. 2. ve 3. seviyeler arasındaki ilişki, oran olarak Şekil 5.31'de, fark olarak da Şekil 5.32'de verilmiştir. h_3/h_2 ve h_3-h_2 değerlerinin genel itibariyle arttığı söylenebilir.



Şekil 5.30. Farklı alum dozajlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa).

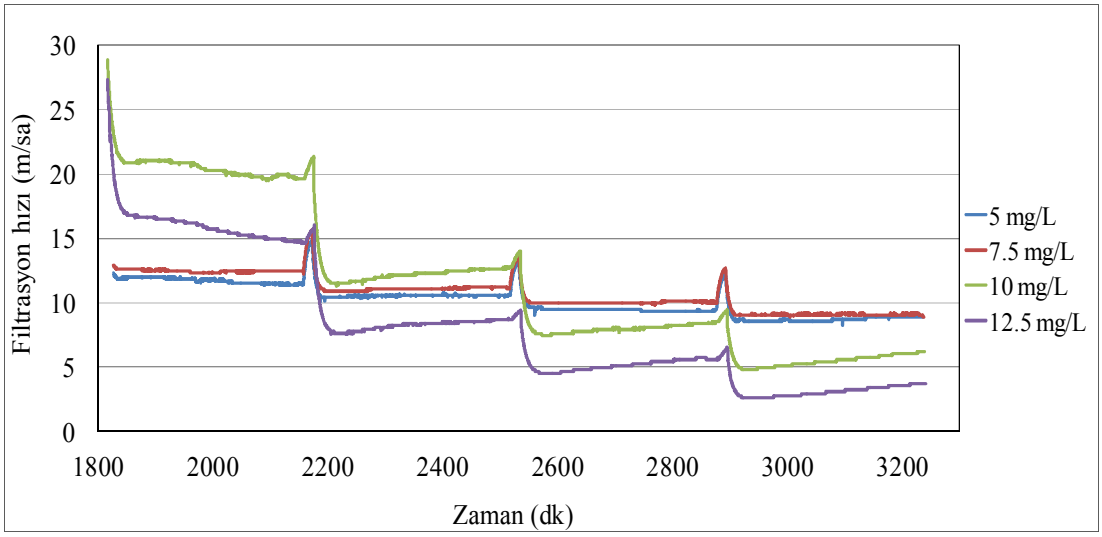


Şekil 5.31. Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa).

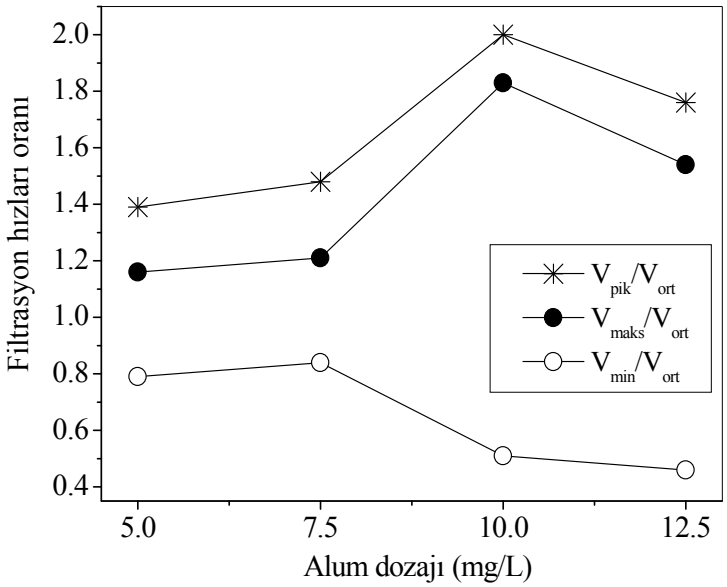


Şekil 5.32. Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa).

10.6 m/sa ortalama filtrasyon hızı deneylerine ait Filtre 1 hız değişimleri Şekil 5.33'de zamana karşı grafiğe geçirilmiş, maksimum, minimum, ortalama ve pik hızlar arasındaki bağıntılar da Şekil 5.34'de sunulmuştur. Şekil 5.33'den görülebileceği gibi 5 ve 7.5 mg/L deneylerinde V_{maks} ve V_{min} değerleri birbirine yakın olup, daha yüksek dozajlarda bu fark büyümektedir. ADF sisteminde geri yıkandıktan sonra işletmeye alınan filtrenin hızı, diğerlerinden daha yüksektir. Bu hız filtre işletmedeyken kısa bir süre içinde azalır ve hemen hemen sabit bir değer alır ve takip eden filtrenin geri yıkanışına kadar bu değerde kalır. İşte bu sabit hızın başladığı an ADF'nin "kararlı hali-denge durumu" (steady state) olarak adlandırılmıştır [Arboleda et al., 1985]. Ayrıca Arboleda (1985) matematiksel modelleme çalışmasında, geri yıkamayı takip eden ilk döngüden sonra akışın kararlı hale geldiğini ya da hafifçe arttığını raporlamıştır. Bu durum 10 ve 12.5 mg/L deneylerinde belirgin olarak görülmektedir ve deneysel olarak da bu çalışma kapsamında doğrulanmıştır (Şekil 5.33).



Şekil 5.33. Farklı alum dozajlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa, ADF 1)



Şekil 5.34. Alum dozajının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 10.6 m/sa)

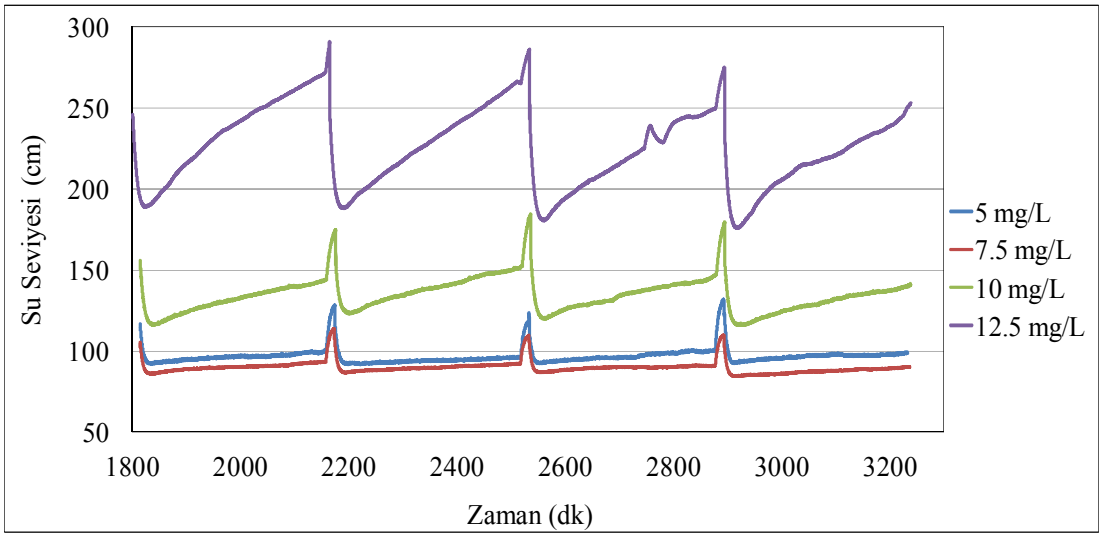
5.1.1.2.3. Filtrasyon hızının ortalama 14.6 m/sa olduğu deneyler

Alum dozajının ADF hidroliğine etkisi 4, 8,13 ve 17 deneylerinde sabit 14.6 m/sa ortalama filtrasyon hızında araştırılmıştır. Deney şartları Tablo 5.11'de verilmiştir. Tablodan görülebileceği gibi dört deneyin de hızları mümkün mertebe eşit tutulmaya çalışılmıştır. Bu deneylerdeki su seviyesi değişimleri Şekil 5.35'de gösterilmektedir. 5 ve 7.5 mg/L deneylerinde su seviyesi h_2 ve h_3 arasında neredeyse değişmemiş, 100 cm civârında kalmıştır. Alum dozajı 10 ve 12.5 mg/L'ye yükseltildiğinde ise filtrasyon süresince su seviyesinin yükselme eğimi de artmıştır. Bu durum Şekil 5.36 ve 5.37'den de görülebilir.

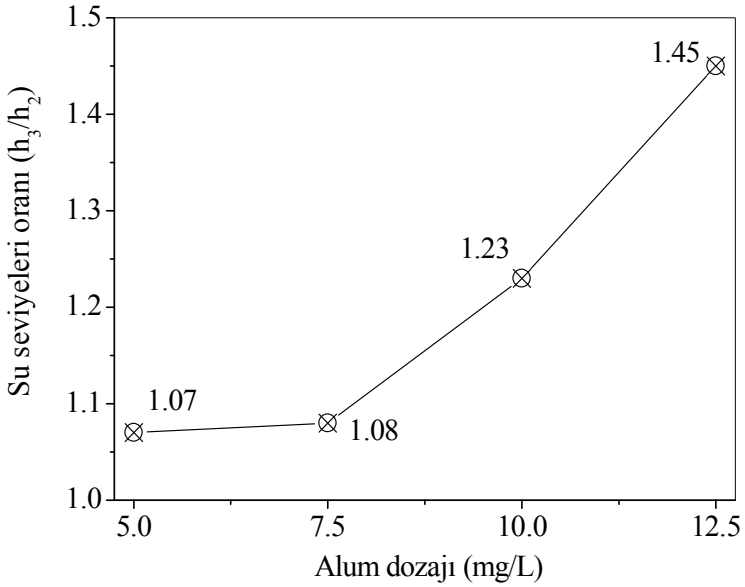
Tablo 5.11. Ortalama filtrasyon hızının 14.6 m/sa olduğu deneylerin şartları.

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
4	10.01	5	14.61	21
8	9.93	7.5	14.60	21
13	9.95	10	14.69	23
17	9.96	12.5	14.62	21

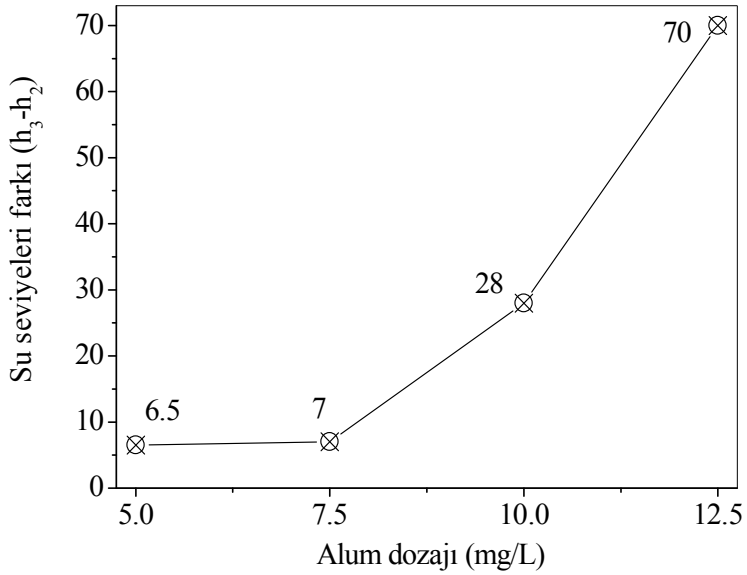
ADF tasarımında çeşitli su seviyelerinin tahmin edilmesi ADF'nin doğru olarak işletilebilmesi bakımından çok önemlidir. Örneğin h_2 seviyesi filtre su giriş seviyesinden aşağıda kalmamalıdır. h_4 seviyesi geri yıkamada meydana gelir ve filtre duvarını aşmamalıdır. ADF'deki tıkanıklık yük kaybı seçilirken (clogging head loss) bütün AD filtrelerinin geri yıkanması sonunda en kirli filtrenin su seviyesinin filtre duvarını aşmaması temin edilmelidir [Akgiray and Saatçı, 1998b]. Önceki sabit hız deneylerine (7.9 ve 10.6 m/sa) benzer şekilde 14.6 m/sa deneylerindeki sonuçlar da yumaklaştırıcı dozajının, filtre duvarı yüksekliğinin belirlenmesine etki eden faktörlerden biri olan h_3 seviyesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir.



Şekil 5.35. Farklı alum dozajlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



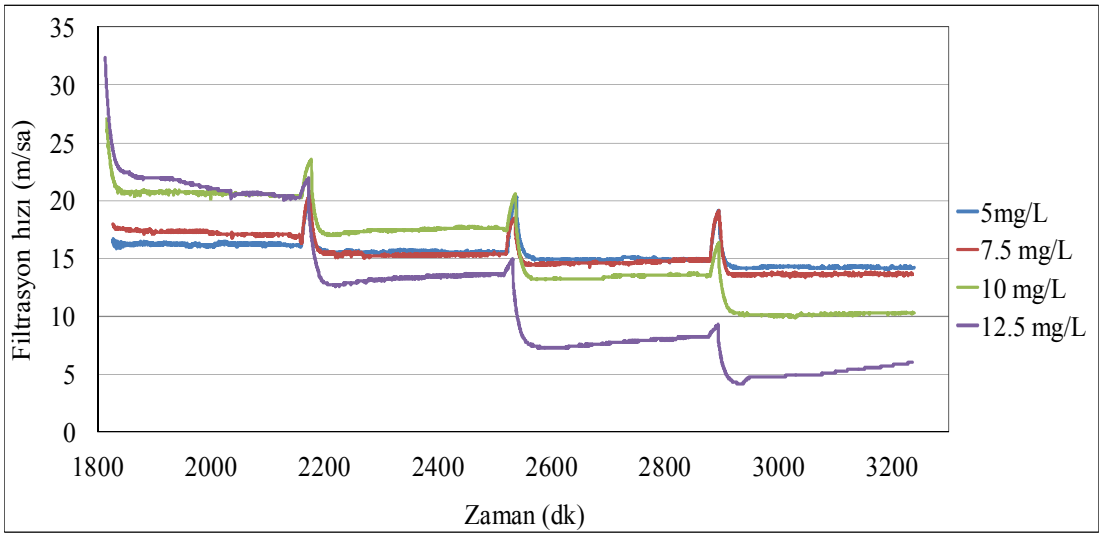
Şekil 5.36. Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



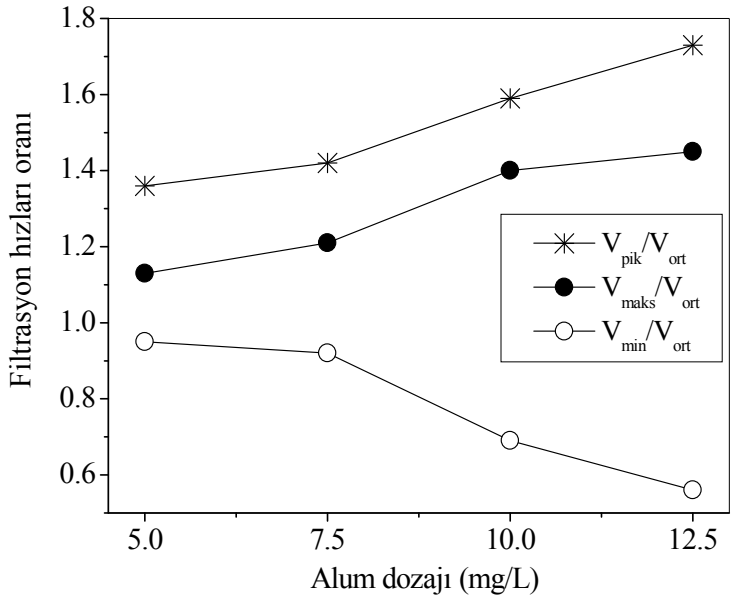
Şekil 5.37. Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).

Şekil 5.38'deki eğriler 14.6m/sa ortalama filtrasyon hızında bir AD filtresinin hız profiline yumaklaştırıcı dozajının etkisi verilmiştir. Yüksek alum dozajlarının filtrasyon hızında büyük varyasyonlara sebep olduğu görülmektedir. Bu çalışmada sabit filtrasyon döngüsü kullanıldığına (her bir AD filtresi 24 saatte bir geri yıkandığına göre) sabit ortalama filtrasyon hızında yüksek yumaklaştırıcı dozajları filtre yatağındaki tıkanıklığı daha çok artırmaktadır.

Şekil 5.39'da ADF'de karşılaşılan farklı hızların birbirleriyle ilişkileri gösterilmektedir. ADF tasarımında ve matematik modellemelerinde kullanılan kabullerden birisi, maksimum hızın, ortalama hızın 1.5 katı, minimum hızın da ortalama hızın 0.7 katı olduğudur [Cleasby, 1993]. Ancak bu kabulü destekleyen yeterli miktarda deneysel veri bulunmamaktadır [Akgiray and Saatçı, 1998b; Akgiray and Saatçı, 2000]. Şekil 5.39'a göre alum dozajının 5 mg/L'den 12.5 mg/L'ye artırılmasıyla dört farklı dozajda sırasıyla V_{maks}/V_{ort}: 1.13, 1.21, 1.40 ve 1.45 olarak elde edilirken, V_{min}/V_{ort} oranları da sırasıyla 0.95, 0.92, 0.65 ve 0.56 şeklinde meydana gelmiştir. Bu sonuçlardan görülmektedir ki, Cleasby (1993)'nin hız oranları kabulü her zaman doğru olmayabilmektedir.



Şekil 5.38. Farklı alum dozajlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, ADF 1).



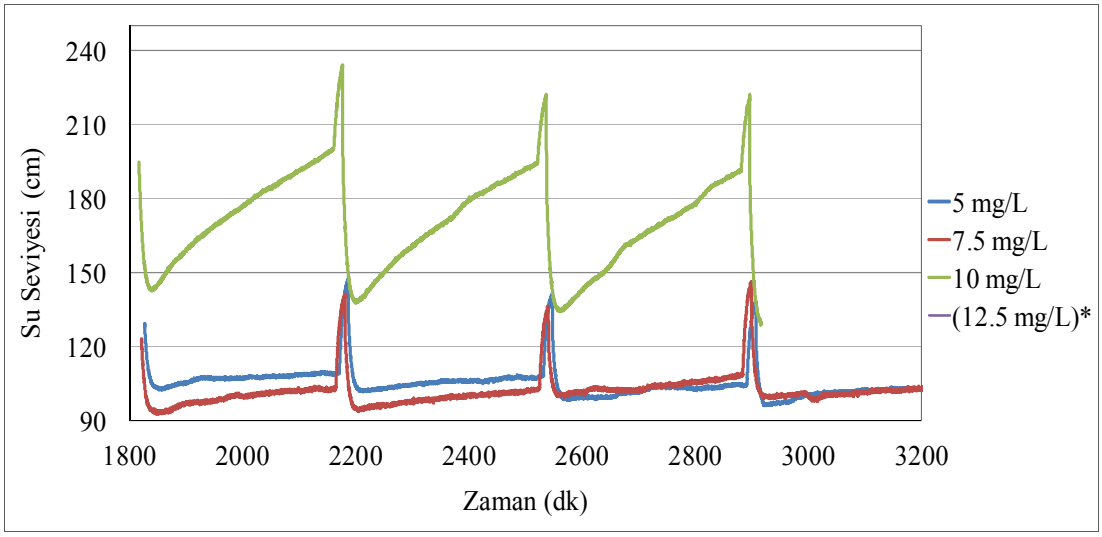
Şekil 5.39. Alum dozajının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).

5.1.1.2.4. Filtrasyon hızının ortalama 17.2 m/sa olduğu deneyler

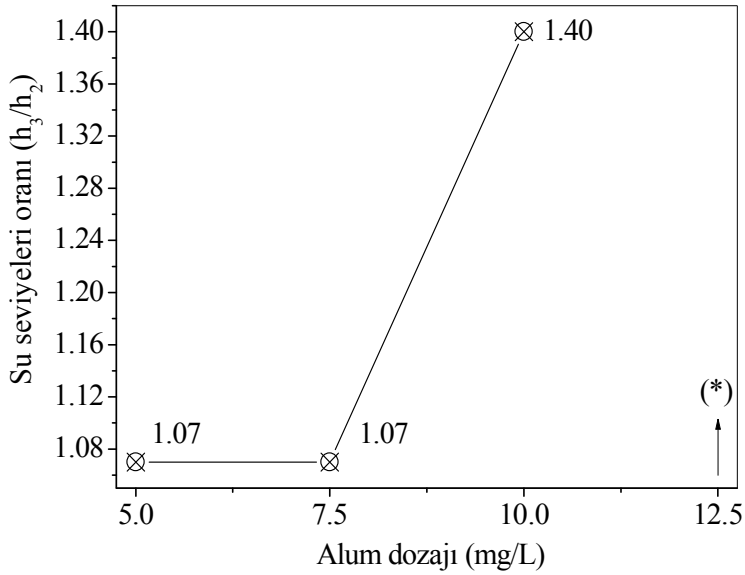
Bu tez çalışması kapsamındaki en yüksek ortalama filtrasyon deneylerine ait deney şartları Tablo 5.12'de verilmiş, 2. filtrasyon periyodunda su seviyelerinin zamana göre değişimi Şekil 5.40'da gösterilmiştir. 5 ve 7.5 mg/L deneylerinde su seviyesi 95-105 cm arasında değişirken alum dozajının 10 mg/L'ye yükseltilmesiyle su seviyeleri 135-195 cm yüksekliğine ulaşmışlardır. Su seviyesinin 17.2 m/sa hızında farklı alum dozajlarındaki davranışı önceki hız deneyleriyle oldukça benzerdir. 12.5 mg/L deneyinde, 12 saatlik filtrasyon sonunda filtre kolonu içerisinde kullanılabilir maksimum yük kaybı aşıldığı için filtrasyon devam ettirilemediğinden Şekil 5.40'da 12.5 mg/L deneyinin 2. filtrasyon döngüsü yer almamaktadır. Filtrasyon başındaki ve sonundaki seviyelerin (h_2 ve h_3) farklı alum dozajlarında birbirleriyle ilişkisi Şekil 5.41 ve 5.42'de gösterilmektedir. Yüksek alum dozajında su seviyesindeki artış belirgin bir şekilde görülmektedir.

Tablo 5.12. Ortalama filtrasyon hızının 17.2 m/sa olduğu deneylerin şartları.

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
5	10.61	5	17.03	18
9	9.97	7.5	17.67	17
14	9.46	10	17.08	19
18	9.30	12.5	17.06	20

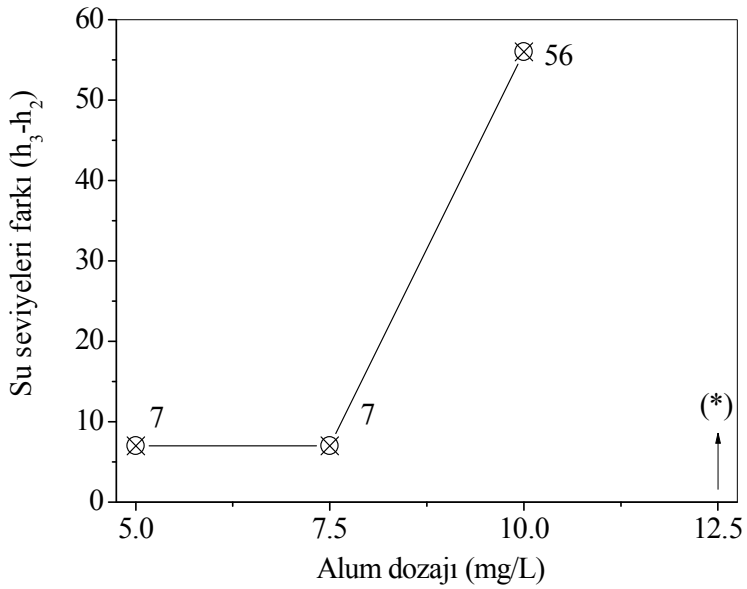


Şekil 5.40. Farklı alum dozajlarında AD filtrelerinin ortak su seviyesinin zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 17.2 m/sa, *: 12.5 mg/L deneyinde filtreler yalnızca 720 dakika işletilmiştir, dolayısıyla bu grafikte yer almamaktadır).



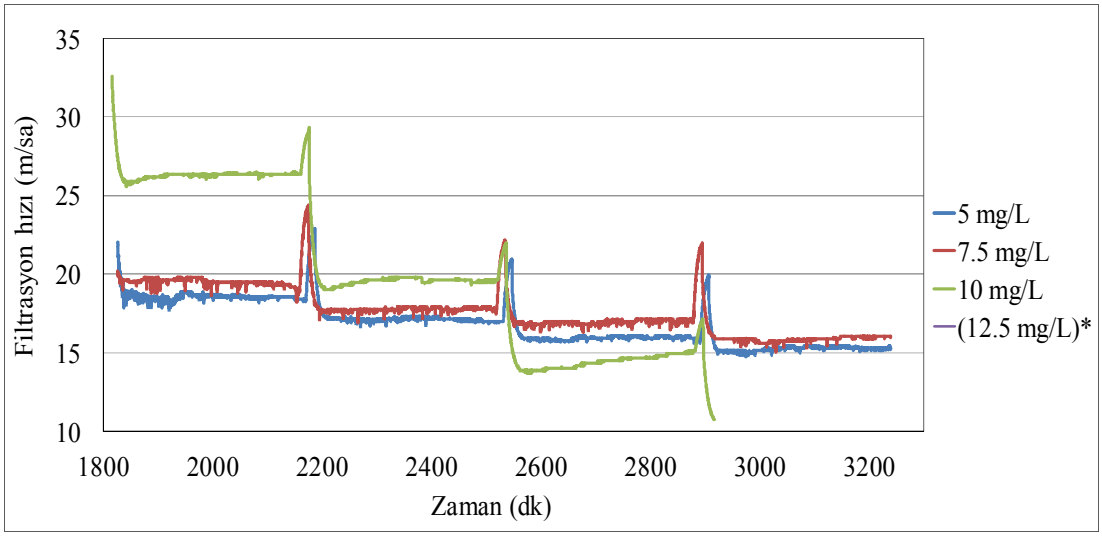
Şekil 5.41. Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye oranı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 17.2 m/sa, *: 12.5 mg/L deneyinde filtreler izin verilebilir maksimum yük kayıplarına eriştiklerinden yalnızca 720 dakika işletilebilmiştir, dolayısıyla bu grafikte yer almamaktadır).

Alum dozajının sabit hızda (17.2 m/sa) filtrasyon hızına etkisi 1 no'lu AD filtresinin 2. filtrasyon periyodu için Şekil 5.43'de verilmiştir. Yüksek alum dozajının (burada 10 mg/L) filtrasyon hızında büyük varyasyonlara sebep olduğu görülmektedir. Şekil 5.44'de ADF'de karşılaşılan farklı hızların birbirleri arasındaki bağıntıları Deney 5, 9, 14 ve 18 için sunulmuştur. Bu çalışma kapsamındaki 4 farklı ortalama filtrasyon hızı deney setinde de ADF sisteminin hidrolik davranışları üzerine yumaklaştırıcı dozajının etkisi benzer şekilde meydana gelmiştir. Bu bölümdeki sonuçlara göre alum dozajının filtrasyon süresince su seviyesi artış hızına önemli etkisi olduğu ve h_3 seviyesini doğru orantılı olarak etkilediği, geri yıkama pik seviyelerini (h_4) ise etkilemediği söylenebilir.

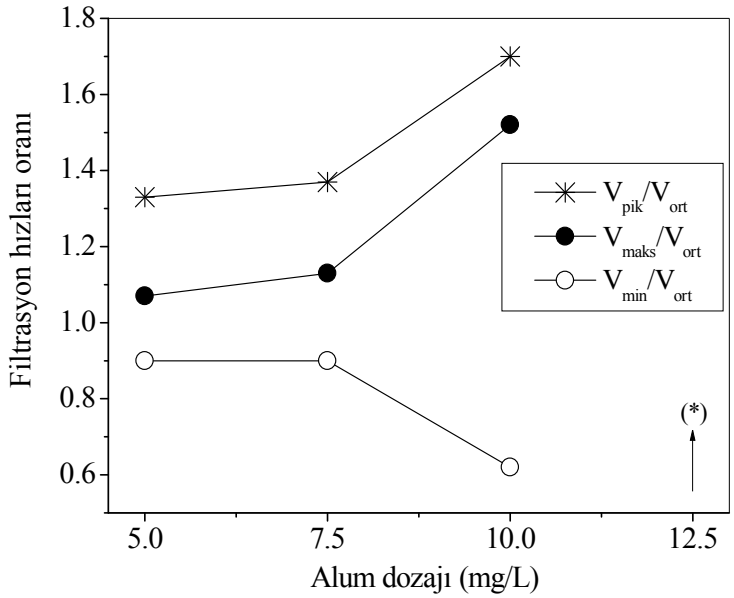


Şekil 5.42. Alum dozajının maksimum ve minimum su seviyeleri ilişkisine (seviye farkı) etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 17.2 m/sa, *: 12.5 mg/L deneyinde filtreler izin verilebilir maksimum yük kayıplarına eriştiklerinden yalnızca 720 dakika işletilebilmiştir, dolayısıyla bu grafikte yer almamaktadır).

Literatürdeki bazı deneysel ve modelleme çalışmaları sonucunda türbülanslı yük kayıpları arttıkça q_{maks}/q_{ort} oranının azaldığı q_{min}/q_{ort} oranının arttığı tespit edilmiştir [Arboleda et al., 1985; Di Bernardo, 1987]. Bölüm 5.1.1.1'de ortalama filtrasyon hızının ADF'nin hidrolik davranışlarına etkisi incelenirken, ortalama filtrasyon hızının artırılması sonucu bu tespitin geçerli olduğu görülmüştür. Ancak filtre yatağındaki yük kayıplarını artıran alum dozajının artırılmasıyla birlikte bu tespitin tam tersi bir sonuç elde edilmiştir. Alum dozajı arttıkça V_{maks}/V_{ort} oranı artmakta V_{min}/V_{ort} oranı azalmaktadır. Bu durum yüksek yumaklaştırıcı dozajlarında V_{maks} ile V_{min} arasındaki farkın büyümesine sebep olmaktadır. Ayrıca bu çalışmada, V_{maks} ile V_{min} hızlarının Cleasby (1993)'nin belirttiği gibi sırasıyla ortalama hızın her zaman 1.5 ve 0.7 katı olmadığı ve ortalama filtrasyon hızına göre simetrik olarak meydana gelmedikleri sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5.43. Farklı alum dozajlarında filtrasyon hızının zamana göre değişimi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrasyon hızı: 17.2 m/sa, ADF 1, *: 12.5 mg/L deneyinde filtreler izin verilebilir maksimum yük kayıplarına eriştiklerinden yalnızca 720 dakika işletilebilmiştir, dolayısıyla bu grafikte yer almamaktadır).



Şekil 5.44. Alum dozajının maksimum, minimum ve pik hızları arasındaki ilişkiye etkisi (2. Filtrasyon döngüsü, ortalama filtrtasyon hızı: 17.2 mg/L, *: 12.5 mg/L deneyinde filtreler izin verilebilir maksimum yük kayıplarına eriştiklerinden yalnızca 720 dakika işletilebilmiştir, bu grafikte yer almamaktadır).

5.1.1.3. Ham Su Sıcaklığının Azalan Debili Filtrelerin Hidrolik Davranışlarına Etkisi

Derin yatak filtrasyonundaki taşınım mekanizmalarının çoğu sıcaklığın etkisi altındadır. Bununla beraber, yerçekimine bağlı akış karakteristiğini etkileyen kinematik viskozite ve akışkanın yoğunluğu da akışkan sıcaklıklığından etkilenmektedir. Kirli ve temiz filtrelerdeki akış çoğunlukla Darcy Kanunu'na uyduğundan filtrasyon süresince filtre yatağındaki yük kaybı da kinematik viskoziteyle orantılı olarak değişir ve dolayısıyla yük kaybının ve ayrıca filtre tankındaki su seviyesinin de sıcaklığa bağlı birer parametre olduğu söylenebilir [Cleasby and Baumann, 1962].

Bu çalışma kapsamında bir deneyin (SDF ve ADF'nin paralel işletildiği bir deney setinin) yaklaşık 72 saat sürmesi, laboratuar şartlarına bağlı olarak çoğunlukla

haftada bir deney yapılabilmesi ve pilot tesiste karşılaşılan aksaklıkların da giderilmesinin zaman alması sebebiyle deneylerin tamamı uzun bir süreye yayılmıştır. Bu süre zarfında mevsim değişiklikleri sebebiyle deneylerde ham su olarak kullanılan şebeke suyu sıcaklığı da değişmiş, deneyler ilkbahar ve sonbahar mevsimleri arasında 20 ± 3.5 °C'de yürütülmüştür. Deneyler arasından farklı dozajlardan keyfî olarak (sıcaklığı birbirine en yakın ya da eşit dört deney olmasına dikkat edilmiştir) seçilen dört deney (4., 8., 12. ve 17. deneyler) kış mevsiminde farklı sıcaklıklarda tekrarlanmıştır (19-22. deneyler). Tekrar deneyleri daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildikleri için bunlar soğuk su deneyleri olarak adlandırılmıştır. Keyfî seçilen deneyler ve tekrar deneylerinin şartları Tablo 5.13 ve 5.14'de sunulmuştur. Tablolardan görülebileceği gibi ham su sıcaklığı dışında bütün deneysel koşullar eşit tutulmaya çalışılmıştır.

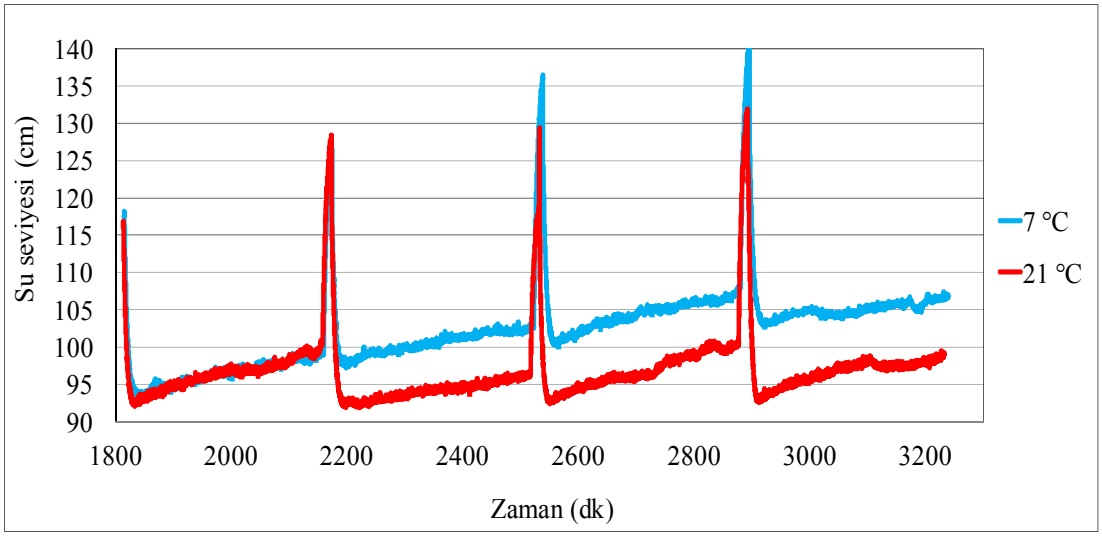
Tablo 5.13. Sıcak ham su deneylerinin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Debi (l/saat)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
4	10.1	5	56.23	14.61	21
8	9.93	7.5	56.20	14.60	21
12	10.0	10	48.65	12.64	21
17	9.96	12.5	56.27	14.62	21

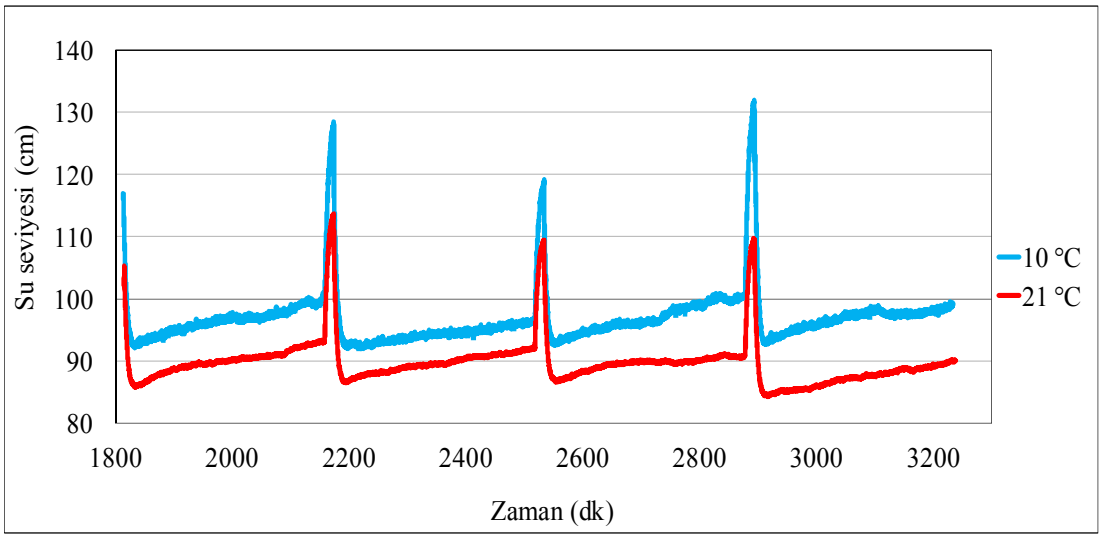
Tablo 5.14. Soğuk ham su deneylerinin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Debi (l/saat)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
19	9.96	5	56.30	14.63	7
20	9.98	7.5	56.29	14.63	10
21	9.98	10	48.19	12.52	10
22	9.98	12.5	56.69	14.73	8

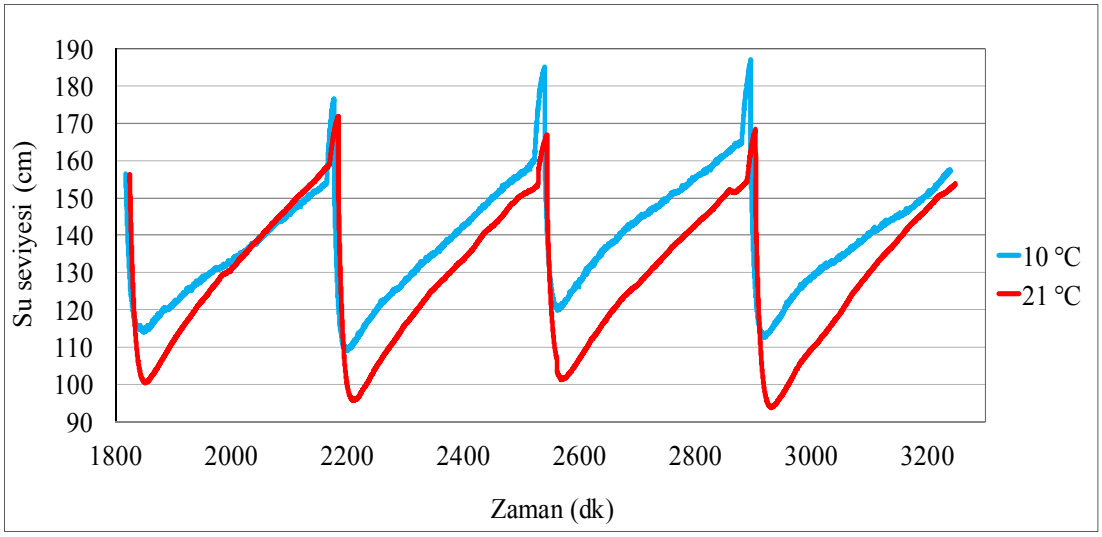
Ham su sıcaklığından en çok etkilenen parametre olan yük kaybı ve tesir ettiği filtre kolonu içerisindeki işletme su seviyesi ile ilgili mukayese grafikleri, farklı deney koşullarına göre Şekil 5.45-5.48'de sunulmuştur. Ham su sıcaklığı düşük olduğunda, beklenildiği gibi su seviyelerinde (hem h_2, hem de h_3 seviyelerinde) artışa neden olmuş ve artış eğimleri hemen hemen aynı kalmıştır. Ancak grafiklerin geneline bakıldığında filtrelerin ADF'ye özgü karakteristiklerinde herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir. Şekil 5.49'a bakılacak olursa, ham su sıcaklığının geri yıkama sırasında işletmede kalan filtrelerin su seviyesinde meydana gelen pik büyüklüğünü (h_4-h_3) etkilediği söylenebilir.



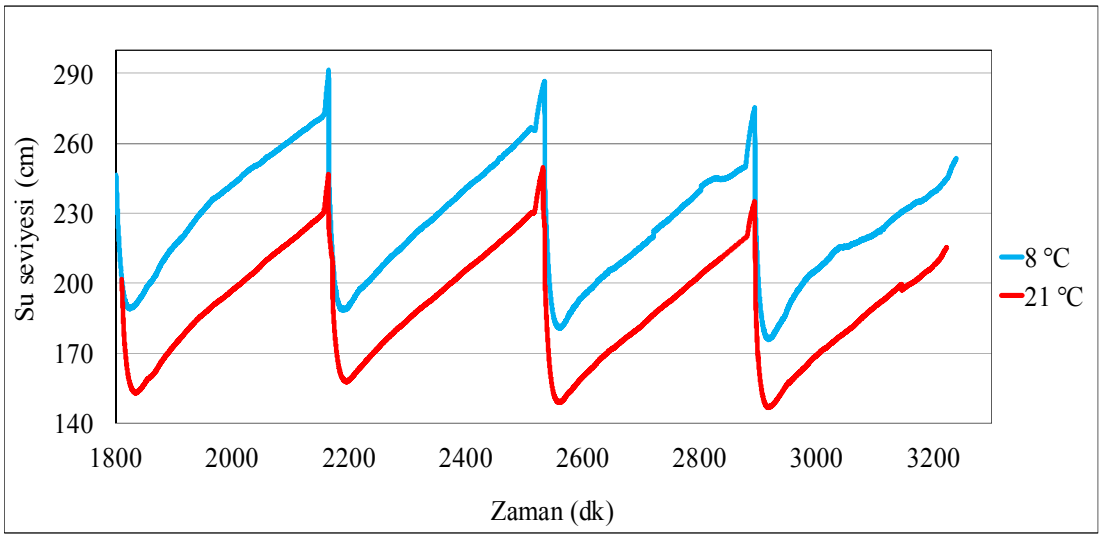
Şekil 5.45. Ham su sıcaklığının ADF ortak su seviyesi değişimine etkisi (alum dozajı 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, Deney 4 ve 19).



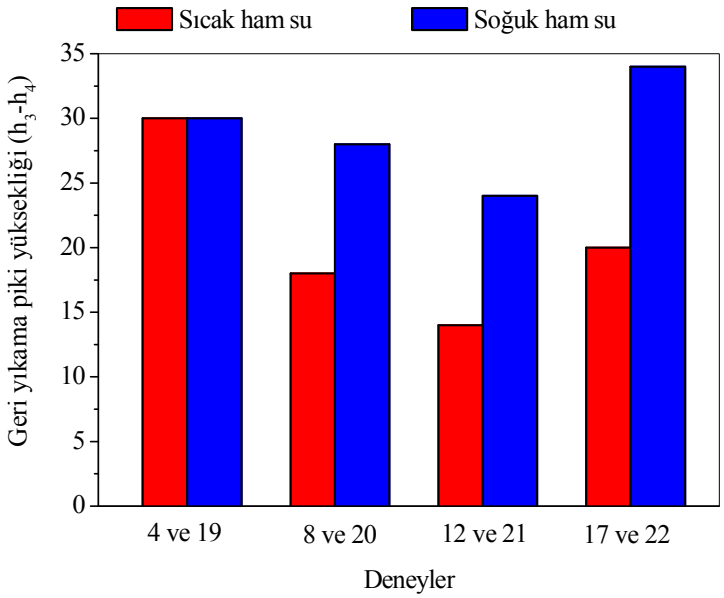
Şekil 5.46. Ham su sıcaklığının ADF ortak su seviyesi değişimine etkisi (alum dozajı 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, Deney 8 ve 20).



Şekil 5.47. Ham su sıcaklığının ADF ortak su seviyesi değişimine etkisi (alum dozajı 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, Deney 12 ve 20).



Şekil 5.48. Ham su sıcaklığının ADF ortak su seviyesi değişimine etkisi (alum dozajı 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, Deney 17 ve 21).



Şekil 5.49. Ham su sıcaklığının farklı deney koşullarında ADF geri yıkama piklerine etkisi.

5.1.2. Azalan Debili Filtreler ile Sabit Debili Filtrenin Karşılaştırılması

Sabit debi/hız terimi, filtredeki sıvı akış hızının değişkenlik göstermediği, proses süresince sabit kaldığı durumu tanımlamak için kullanılır ve ilk kez 1890'lı yıllarda tasarlandığı bildirilmektedir [Sanks, 1982]. Filtrasyon hızı, filtre çıkışına yerleştirilen bir kontrol vanası ile kontrol edilir ve ideal bir sabit debili filtrede filtrasyon hızı, filtrasyon süresince hiç değişmez [Cornwell et al., 1991].

Sabit debili filtre terimi, tasarlandığı zamandan azalan debili filtrelerin tasarlandığı ve dikkat çekmeye başladığı 1950 yıllarına kadar (neredeyse hızlı kum filtrasyonu prosesi ile özdeşleşmiştir ve filtreler sabit debi kontrollü olarak işletilmişlerdir. Bu tesislerden bazıları, ham su debisini, çalışan filtre tanklarına eşit olarak bölmüştür. Bunun için genellikle giriş tarafına bir savak kutusu konur ve bu sistemin belli başlı faydaları şöyle sıralanabilir:

1. Eğer tesise giren ham su debisi sabit ise, debi kontrol cihazı kullanmadan sabit hızlı filtrasyonun sağlanmış olur,
2. Filtre tanklarından biri geri yıkanacak olursa, bu filtrenin su yükünü diğer filtreler eşit olarak karşılar, böylece her filtredeki su seviyesi yavaş yavaş yükselir ve böylece su kalitesinin bozulması engellenmiş olur,
3. Yıkanan filtre tekrar işletmeye alındığında meydana gelecek hız azalmaları da yavaşça ve düzgün bir şekilde meydana gelir,
4. Operatör, herhangi bir filtre havuzundaki kirlenme derecesini, su seviyelerine bakarak kolayca söyleyebilir. Seviye belli bir yüksekliğe geldiğinde o filtre devreden çıkarılarak geri yıkanabilir,
5. Her filtre havuzundan geçen debi aynı olduğu için her filtre çıkışına ayrı bir debimetre (hız ölçer) koymaya lüzum yoktur,
6. (vi) Çıkış suyu savağı, üst seviyesi kum yatağı üstünden biraz yukarıda olacak şekilde düzenlenmektedir. Böylece, hem kazara kum yatağının kuru kalıp

içerisine hava girmesi önlenir, hem de filtre içinde negatif basınç doğmasına imkan kalmaz.

Ancak giriş suyunun filtre tanklarına eşit olarak dağıtıldığı sistemlerin bir dezavantajı, filtre tankının/havuzunun daha derin olması zorunluluğudur. Derinlik, filtrede meydana gelecek yeterli bir yük kaybını karşılayacak kadar olmalıdır. Bu sebeple konvansiyonel filtrelere kıyasla filtre derinliği 1.5-2 m daha fazla olmalıdır. Böylece ortaya çıkacak ekstra inşaat masrafı, kontrol cihazlarının sistemden kaldırılması ile düşecek olan ilk yatırım maliyetleri ve ortadan kalkacak bakım masrafları ve diğer avantajların kazancı ile karşılaştırılmalı ve ona göre hangi filtre sisteminin seçileceğine karar verilmelidir.

Sabit debi kontrollü filtrasyon sistemlerine bir alternatif, değişken ve azalan debili filtrasyon metodudur. Bu sistemin çalışması, eşit giriş suyu dağıtımı sisteminin çalışmasına çok benzemektedir ve aynı avantajları sağladığı gibi, fazladan bazı avantajları da vardır. Buna karşılık herhangi bir dezavantajı da bulunmamaktadır.

Debi kontrol cihazları bozuk olan ya da sık sık arıza yapan eski tesisler kolaylıkla değişken azalan debili giriş sistemine çevrilebilirler. Bazı filtre tesisleri bu esasa göre kurulmakta bazıları da iyi çalışmayan debi kontrol cihazları yüzünden bu sisteme göre çalışmaya mecbur olunmaktadır. Ancak bütün bu iyi özelliklerine rağmen bu sistemin hidroliğinin zorluğu, mühendisler ve filtre operatörlerinin bu sistemi uygulamaktan genellikle kaçınmalarına sebep olmuştur [Gölhan ve Aksoğan, 1970]

Değişken azalan debili sistemin giriş akımının eşit bölündüğü sistemden başlıca farkı ham suyun filtreye giriş yeri ve de yük kaybı için filtre havuzunda daha az derinliğe ihtiyaç duymasıdır. Ham su ortak kanalı, işletme esnasında filtredeki su seviyesinin daha altından bir yerden giriş yaptığı için sistemdeki bütün filtrelerin su seviyesi hemen hemen birbirinin aynıdır. Bunu sağlamak için her filtrenin giriş suyu

boruları ve vanaları oldukça büyük seçilmelidir. Böylece giriş borusundaki yük kaybı çok azalacak ve filtrelere akışı kısıtlamayacaktır. Dağıtıcı boru ve filtre valfları, herhangi bir filtreye bir anda gelmesi muhtemel debiyi rahatça alabilecek kadar büyük olmalıdır [Akgiray ve Saatçı, 1996].

Aynı dağıtıcı giriş borusundan beslenen filtre havuzları gittikçe çeşitli derecelerde kirlenecektir. En çok kirlenmiş olandan geçen suyun hızı böylece en hızlı şekilde azalmaya başlayacaktır. İşte bu filtrenin kaybettiği kapasite diğer ve daha temiz olan filtreler tarafından telafi edilecektir. Bunun için de bütün filtrelerdeki seviye biraz yükselerek, kendisini kirli filtrelerde kaybolan kapasiteyi telafi edecek seviyeye getirecektir. En temiz filtre en yüksek debiyi geçirecektir. Su seviyesinin yükselmesi en kirli filtredeki azalan debiyi de kısmen artıracak ve azalmanın yavaşça gerçekleşmesini sağlayacaktır. Bu çeşit işletmede her filtre temiz iken fazla su geçirecek, kirlendikçe geçireceği su miktarı da yavaş yavaş azalacaktır ki filtrenin bu doğal koşullar altında çalışması sonucu çıkış suyu kalitesinin bozulmasının da önüne geçilmiş olacaktır.

Yukarıda bahsedildiği gibi sabit debili filtrelere göre daha az yük kaybına sebep olduğu ve daha iyi kalitede su ürettiği iddia edilen azalan debili filtrelerle ilgili literatürde hem deneysel hem de modelleme çalışmaları mevcuttur. Ancak bu çalışmalar sonrası hala cevabı kesin olarak verilememiş sorular bulunmaktadır. Bunlardan SDF ile ADF arasındaki mukayeseye dayanan temel iki soru mevcuttur: (i) ADF, SDF'den daha iyi kalitede su üretmektedir, (ii) ADF'de daha az yük kaybı meydana geldiğinden filtre işletme süreleri daha uzun ve geri yıkama sıklığı daha azdır. Bu tez kapsamında birinci soruya ilişkin deneysel araştırma sonuçları Bölüm 5.2.1.1'de sunulmuştur. İkinci soruya ilişkin deneysel sonuçlar ise bu bölümde aşağıda gösterilmektedir (ADF'nin su seviyesi ve filtrasyon hızına yönelik hidrolik davranışları da farklı ortalama filtrasyon hızları ve farklı alum dozajları açısından Bölüm 5.1.1.1 ve 5.1.12'de verilmiştir).

Geçmiş literatür çalışmalarında, ADF sisteminin tasarımına yönelik bazı varsayımlar ortaya konmuş ve bu varsayımların "çoğunlukla" geçerli olduğu ortaya atılmıştır. Bu kabuller yapılırken ADF ile SDF sistemlerinin mukayesesini içeren az sayıda deneysel çalışmalar esas alınmıştır. Bu çalışmanın ana hedeflerinden biri de, gerek filtrede meydana gelen yük kayıpları gerekse de ortalama filtrasyon hızlarıyla ilgili olarak ortaya atılan bu kabulleri daha da detaylandırılmış deneysel bir temele oturtmak ve her zaman geçerli olup olamayacağını ispatlamaktır. ADF ile SDF karşılaştırmasında en yaygın kabul bu iki yöntemde meydana gelen yük kaybı (su seviyesi) eğrilerinin eğimlerinin eşit olmasıdır [Di Bernardo and Cleasby, 1980; Cleasby, 1993]. Bu kabul yardımıyla SDF işletme verilerinden yararlanılarak ADF tasarımı yapılabileceği ve filtre duvarı yüksekliklerinin buna göre belirlenebileceği iddiası ortaya atılmaktadır. Amerika'da bu kabule dayanarak tasarlanan bazı ADF tesislerinin varlığı bilinse de optimum şekilde bir tesis dizaynı için bu kabulün her zaman geçerli olup olamayacağının bilinmesi önem taşımaktadır.

Di Bernardo (1987)'ye göre geri yıkamanın hemen öncesinde ADF ve SDF'nin –aynı hacimde ve aynı özellikte ham su filtre etmek şartıyla- tıkanma durumlarının benzer olduğu kabul edilmiştir. Böylece bu kabul yardımıyla da ADF tasarımında, SDF'nin daha önceki işletme verilerinden yararlanılabileceği bildirilmiştir. Halbuki iki sistemin kirli filtrelerinin morfolojisi ve tıkanma durumu oldukça farklı olabilir. Çünkü ADF, yüksek hızla işletmeye alındıktan sonra hızı azalmaktadır. Bu durumda ADF ve SDF içindeki birikimin aynı sürelerde aynı oranda gerçekleştiği kabulü doğru olmayabilir [Akgiray and Saatçı, 2000]. Bu amaçla bu tez kapsamında hem ADF hem de SDF için filtre yatağının farklı derinliklerinde yük kaybı ölçümü yapılmış, aynı deneysel şartlarda filtre yatağında meydana gelen yük kayıplarının eşit olup olmadığı incelenmiş ve sonuçlar bölüm sonunda her deney için ayrı ayrı verilmiştir.

Bu çalışmada pilot ölçekli deneyler yardımıyla ADF ile SDF prosesleri hidrolik açıdan mukayese edilmiş, değerlendirmeler yapılırken filtre yatağı üzerindeki su seviyesi ve filtre yatağı içindeki yük kayıpları dikkate alınmıştır. Dört adet filtre içeren bir ADF sistemi ile giriş akımının bölünmesi (influent flow splitting) esasına

dayanarak işletilen bir adet SDF inşa edilmiş ve işletilmiştir. Deneylerde aynı ham su, aynı ortalama filtrasyon hızı kullanılmıştır. Bütün filtre kolonları eş değer özellikte olup, aynı ağırlıkta ve seviyede aynı kum ile doldurulmuştur. Filtrelerdeki ortak su seviyeleri, her bir filtrenin filtrasyon hızı ve filtre yatağının çeşitli derinliklerindeki yük kayıpları zamana bağlı olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. ADF ile ilgili önceki diğer çalışmaların çoğunda tek bir ortalama filtrasyon hızı ya da tek bir yumaklaştırıcı dozajı kullanılmıştır. Bu çalışmada ise beş farklı ortalama filtrasyon hızı ve 4 farklı yumaklaştırıcı dozajının kullanıldığı 22 set deney sonunda büyük miktarda veri toplanmıştır. Ham su sıcaklığının etkisi de ayrıca incelenmiştir. Böyle bir deneysel matriks kullanımıyla, çeşitli işletme şartlarının ADF ve SDF sistemlerinin hidrolik davranışları üzerindeki etkileri daha detaylı değerlendirilebilmiştir.

5.1.2.1. Farklı Alum Dozajlarında Filtrasyon Hızının Etkisi

5.1.2.1.1. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneyler

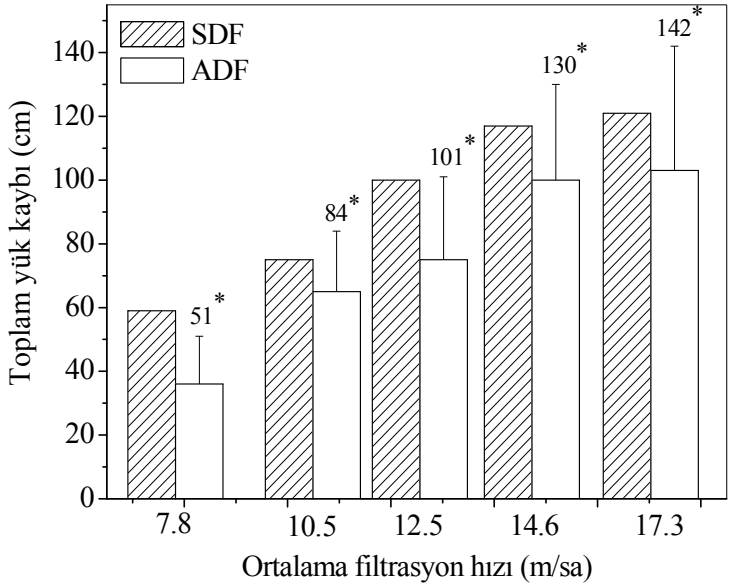
Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneyler beş farklı hızda yürütülmüştür. Filtrelere giriş debileri her iki filtre sisteminin girişinde bulunan eşdeğer rotametreler yardımıyla kontrol edilmiştir. Her bir filtre kolonuna eşit debide ham su girişinin sağlanabilmesi için azalan debili filtrelere giren ham su miktarı, sabit debili filtreye giren ham suyun dört katı olarak ayarlanmıştır. Filtrelerin çıkışlarında yer alan türbin tip debi ölçer cihazlarının deney süresince kaydettiği debi değerlerinden ortalama debi elde edilmiş, filtre kolonlarının alanları kullanılarak da ortalama filtre hızları hesaplanmıştır. Azalan debili filtre ve sabit debili filtre hızlarının birbirine oldukça eşdeğer tutulduğu Tablo'daki değerlere bakılarak söylenebilir. Tablo 5.15'de 5 mg/L deneylerine ait işletme koşulları verilmiştir.

Tablo 5.15. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
1	9.92	5	SDF: 30.12 ADF: 30.00	SDF: 7.79 ADF: 7.83	20
2	10.03	5	SDF: 40.09 ADF: 40.36	SDF: 10.41 ADF: 10.49	24
3	9.97	5	SDF: 48.19 ADF: 48.46	SDF: 12.52 ADF: 12.59	22
4	10.01	5	SDF: 56.11 ADF: 56.23	SDF: 14.58 ADF: 14.61	21
5	10.61	5	SDF: 67.65 ADF: 65.53	SDF: 17.58 ADF: 17.03	18

5 mg/L alum dozajı deneylerinin su seviyesinin zamana göre değişimi hem ADF hem de ADF için EK-A, Şekil A.1-A.5'de verilmiştir. Her iki filtre sisteminde de geri yıkama işlemi yapıldıktan sonra devreye alınan filtre, filtrasyona 71 cm seviyesinden başlamaktadır. Çünkü geri yıkama gideri filtre kumunun 71 cm üzerinde olup, geri yıkama pompası ve giderleri kapatıldığında filtre kolonu içerisindeki su bu seviyede kalmaktadır. Filtre devreye alındığında, su seviyesi giriş debisine ya da SDF veya ADF olmasına bağlı olarak hızlı bir şekilde düşmekte ya da artmakta, bir noktada dengeye gelip filtrenin tıkanmasına bağlı olarak lineer bir şekilde bir sonraki geri yıkamaya kadar artmaktadır. Şekil 5.50'de 5 mg/L deneylerine ait maksimum su seviyeleri verilmiştir. Grafikte gösterilen veriler her iki sistem için de ikinci filtrasyon döngüleri esas alınmıştır. Çünkü tipik ADF su seviyesi değişimlerinin ancak bütün filtrelerin en az bir kere geri yıkandıktan sonra elde edilebileceği bildirilmiştir [Di Bernardo, 1987]. Dolayısıyla ADF sistemindeki ilk döngü karakteristik ADF seviye değişimlerini yansıtmamaktadır. Bununla birlikte, ADF sisteminde ikinci döngüde gözlemlenen filtrasyon karakteristiği, sonraki döngülerde de tekrar etmektedir [Akgiray and Saatçı, 1998a]. Bu nedenle bu

tez kapsamındaki deneylerde filtrasyon en fazla üç döngü süresince devam ettirilmiş, ilk döngünün tamamen farklı, ikinci ve üçüncü döngülerdeki su seviyesi davranışlarının ise oldukça benzer oldukları görülmüştür (EK-A). Şekil 5.50'den görülebileceği gibi, aynı filtre işletme süresinde, 5 mg/L deneylerinde beş farklı hızda da geri yıkama pikleri hariç, ADF'de daha düşük su seviyeleri meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.50. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtre sistemlerinde ortalama filtrasyon hızına bağlı gelişen toplam yük kayıpları (2. Filtrasyon döngüleri esas alınmıştır, *: ADF'deki geri yıkama pik seviyelerini göstermektedir).

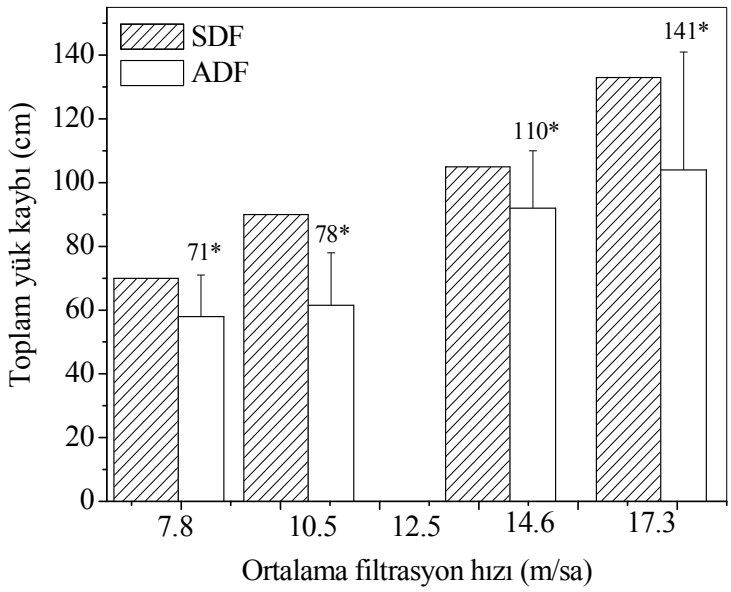
5.1.2.1.2. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneyler

6-9.deneylerde alum dozajı 7.5 mg/L'ye yükseltilmiştir. Dört farklı ortalama filtrasyon hızında SDF ve AD filtrelerinin su seviyesi profilleri incelenmiştir. Deney şartları Tablo 5.16'da verilirken, su seviyelerinin zamana karşı değişimleri EK-A'da Şekil A.6-A.9'da gösterilmiştir. Tipik ADF karakteristiğinin meydana geldiği ikinci döngüdeki su seviyesi mukayeseleri ise Şekil 5.51'de grafiğe geçirilmiştir. Şekilden

görülebileceği gibi, 5 mg/L deneylerine benzer şekilde geri yıkama pikleri haricinde ADF her zaman daha düşük maksimum su seviyesi ile işletilmiştir.

Tablo 5.16. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
6	9.99	7.5	SDF: 30.00 ADF: 30.57	SDF: 7.79 ADF: 7.94	17
7	10.02	7.5	SDF: 40.18 ADF: 40.64	SDF: 10.44 ADF: 10.56	17
8	9.93	7.5	SDF: 56.16 ADF: 56.20	SDF: 14.59 ADF: 14.60	21
9	9.97	7.5	SDF: 67.51 ADF: 68.00	SDF: 17.54 ADF: 17.67	17



Şekil 5.51. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtre sistemlerinde ortalama filtrasyon hızına bağlı gelişen toplam yük kayıpları (2. Filtrasyon döngüleri esas alınmıştır, *: ADF'deki geri yıkama pik seviyelerini göstermektedir).

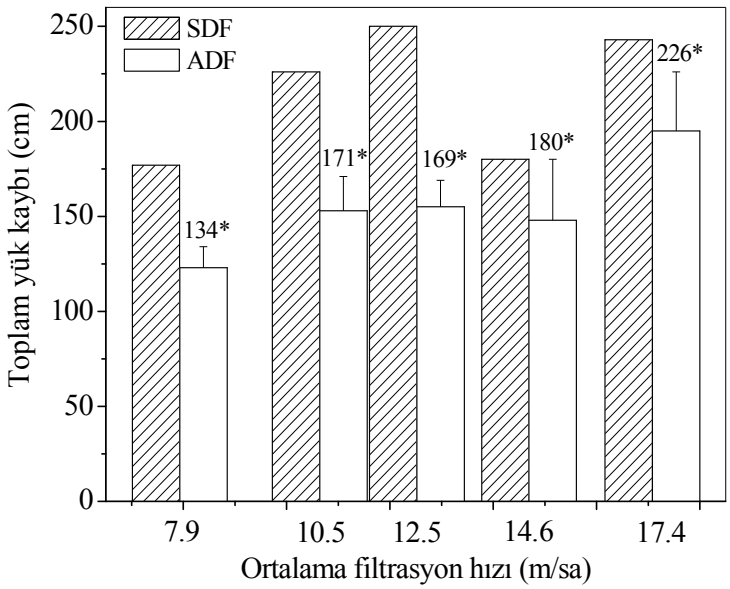
5.1.2.1.3. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneyler

Alum dozajının 10 mg/L'de sabit tutulup, ortalama filtrasyon hızının 7.9 ilâ 17.4 m/sa arasında değiştiği deneylerin şartları Tablo 5.17'de sunulmuştur. Bu deneylerde su seviyesi ADF için geri yıkama piklerinde bile SDF'den daha düşük olarak meydana gelmiştir.

Hudson (1959) ve Arboleda (1974) çalışmalarında aynı işletme şartlarında ADF'nin filtrasyon süresinin SDF'nin filtrasyon süresinden % 50 daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Yine literatürde ADF'nin SDF'ye göre daha az toplam yük kaybı gerektirdiği bildirilmiştir [Hudson, 1959; Cleasby, 1969; Di Bernardo and Cleasby, 1980; Cleasby and Di Bernardo, 1980; Hudson, 1981; Sanks, 1982].

Tablo 5.17. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
10	10.03	10	SDF: 30.08 ADF: 30.50	SDF: 7.81 ADF: 7.93	23
11	9.85	10	SDF: 39.93 ADF: 40.94	SDF: 10.37 ADF: 10.64	21
12	10.0	10	SDF: 48.23 ADF: 48.65	SDF: 12.53 ADF: 12.64	21
13	9.95	10	SDF: 55.96 ADF: 56.53	SDF: 14.54 ADF: 14.69	23
14	9.46	10	SDF: 68.74 ADF: 65.73	SDF: 17.86 ADF: 17.08	19



Şekil 5.52. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtre sistemlerinde ortalama filtrasyon hızına bağlı gelişen toplam yük kayıpları (2. Filtrasyon döngüleri esas alınmıştır, *: ADF'deki geri yıkama pik seviyelerini göstermektedir).

5.1.2.1.4. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneyler

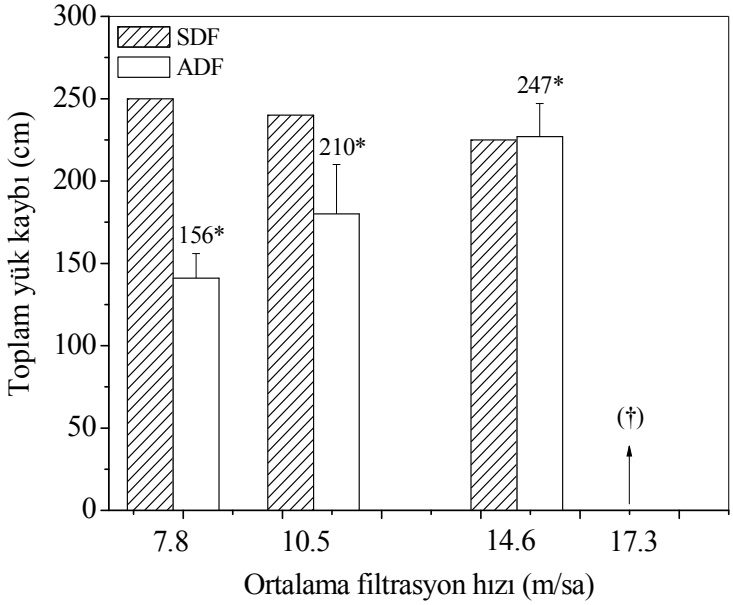
Deneylerdeki en yüksek dozaj olan 12.5 mg/L alum kullanılan deneylerin şartları Tablo 5.18'de gösterilmiştir. Tablodan görülebileceği gibi SDF ile ADF arasında gerçek bir mukayese yapabilmek için filtre debileri mümkün mertebe eşit tutulmuştur. Filtrasyon süresince su seviyelerindeki değişim EK-A'da Şekil A.15 ilâ A.18'de sunulmuştur. Aşağıdaki Şekil 5.53'den görülebileceği gibi ADF'deki maksimum su seviyeleri SDF'den daha düşüktür. 14.6 m/sa deneyinde SDF'nin su seviyesi biraz daha düşük gibi gözükmektedir. Ancak, 16 ve 17. deneylerde SDF 18, ADF ise normal olarak 24 saat işletilmiştir. Dolayısıyla ADF'nin SD filtresi, bu iki deneyde diğer bütün deneylerde kullanılan periyot olan 24 saatin dörtte üçlük kısmında (18 saat), izin verilebilir maksimum yükü (281 cm) aştığından 18 saat sonunda işletmeden çıkarılıp geri yıkamaya alınmıştır. 12.5 mg/L deneylerinin tamamında da ADF daha düşük yük kayıplarıyla işletilmiştir.

Tablo 5.18. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerin şartları.

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
15	9.90	12.5	SDF: 30.12 ADF: 30.03	SDF: 7.83 ADF: 7.80	18
16	9.87	12.5	SDF: 40.31 ADF: 40.91	SDF: 10.47 ADF: 10.63	22
17	9.96	12.5	SDF: 55.69 ADF: 56.27	SDF: 14.47 ADF: 14.62	21
18	9.30	12.5	SDF: 68.19 ADF: 65.64	SDF: 17.72 ADF: 17.06	20

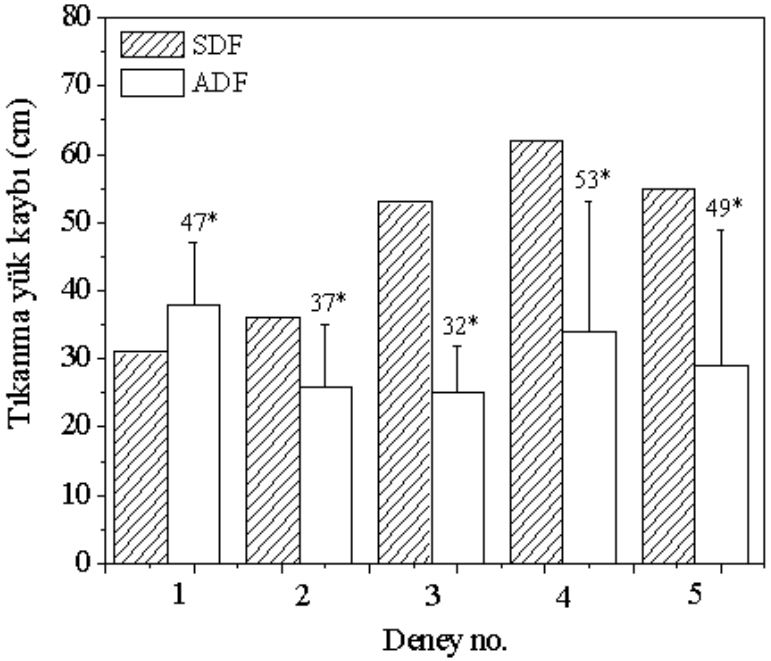
Şekil 5.54 ile 5.57 arasındaki şekillerde çeşitli deney şartları altında SDF ve ADF'de 2. filtrasyon döngüsünde filtre yatağı içerisinde farklı derinliklerde meydana gelen maksimum yük kayıpları verilmiştir. Kum yatağının farklı derinliklerinde bulunan basınç ölçerler ADF 1 üzerinde yer aldığı için, ADF 1'e ait tıkanıklık yük kaybı verileri gösterilmektedir. Filtrasyon süresince yük kayıplarının gelişimi ise aynı döngü için EK-E'de gösterilmiştir. Aşağıdaki 18 deneye ait tıkanıklık yük kaybı şekillerinden görülebileceği üzere, ADF'de her zaman daha düşük yük kayıpları meydana gelmektedir.

Di Bernardo (1987) matematiksel ADF tasarım modelinde tıkanma yük kaybı katsayısının Seviye 3'e (bir filtrenin geri yıkanmadan önce ulaştığı maksimum seviye) ulaştığında da değişmediğini kabul etmiştir. Su seviyesi tekrar 2'ye (geri yıkamadan hemen sonra kararlı hale (steady state) ulaşıldığındaki seviye) düştüğü için bu varsayımın doğru kabul edilebilir olduğu, daha öncesinde Arboleda (1985) tarafından da kabul edilerek uygulanmıştır.

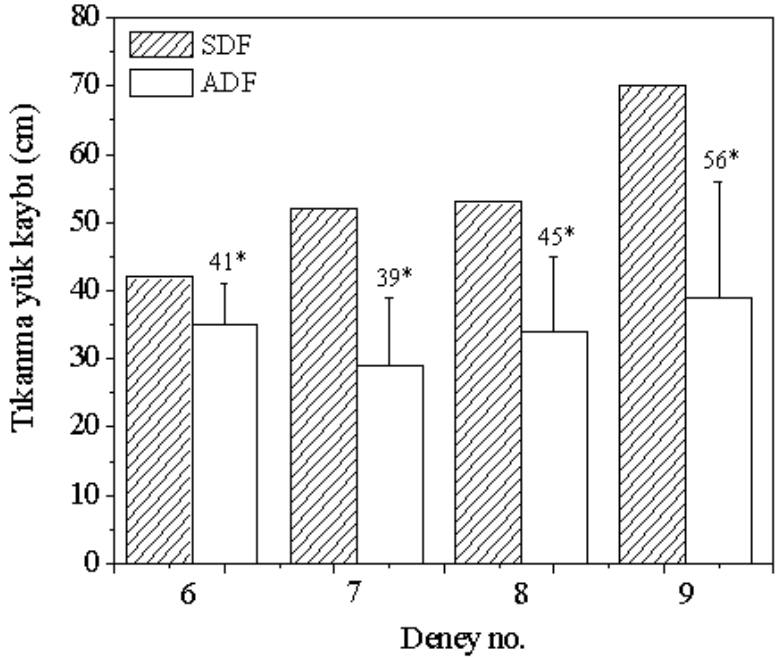


Şekil 5.53. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtre sistemlerinde ortalama filtrasyon hızına bağlı gelişen toplam yük kayıpları (2. Filtrasyon döngüleri esas alınmıştır, *: ADF'deki geri yıkama pik seviyelerini göstermektedir, †: 17.3 m/sa deneyinde filtreler izin verilebilir maksimum yük kayıplarına eriştiklerinden yalnızca 720 dakika işletilebilmiştir, dolayısıyla bu grafikte yer almamaktadır).

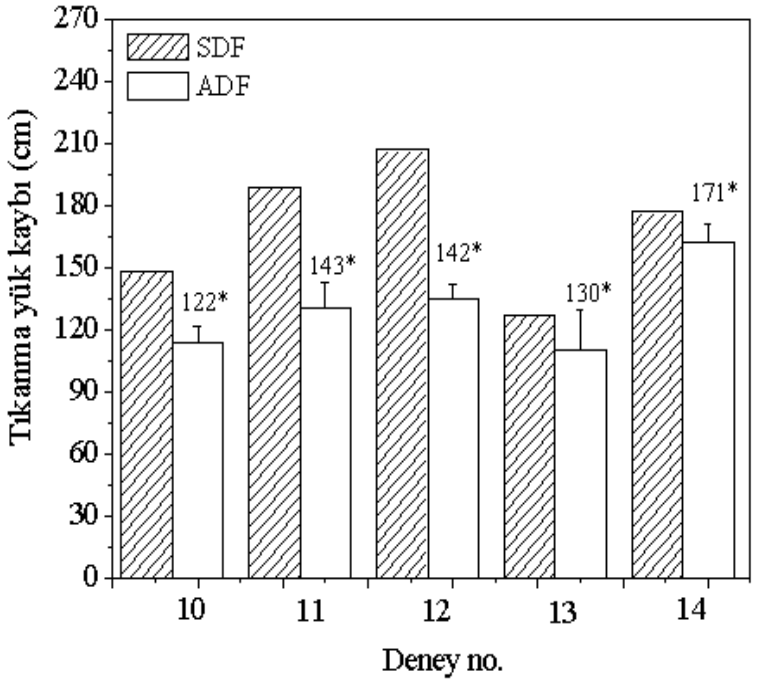
Di Bernardo'nun modeli filtre tasarımında q_{min}/q_{ort} oranının bilinmesini gerektirmemektedir. Ancak, tesiste sağlanması gereken tıkanma yük kaybının bilinmesine ihtiyaç vardır. Bu verilerin ise daha önce işletilmiş ya da tasarımda olan tam ya da pilot ölçekli SDF sistemlerinden elde edilebileceği bildirilmiştir [Cleasby, 1993]. Ancak bu çalışmada maksimum tıkanma yük kaybının SDF ve ADF için aynı olmadığı (Şekil 5.54-5.57) ve filtrasyon süresinin herhangi bir anında da eşit olmadıkları (EK-E) bulunmuştur. Tıkanma yük kaybı hesaplanırken SD filtresi üzerinde ve birinci AD filtresinde yer alan 1 no'lu (filtre kumunun üzerindeki su içerisinde bulunan ve işletme su seviyesini gösteren basınç sensörü) ile 5 no'lu (109 cm'lik filtre kumu yatağının 104 cm derinliğindeki basınç sensörü) basınç sensörlerinin online okuma değerlerinden ve asıl deneylerden önce düzenekteki bütün filtre kolonlarının eşdeğer olup-olmadığının kontrolü sırasında temiz su ile gerçekleştirilen testlerden elde edilen temiz yatak yük kayıplarından yararlanılmıştır. Bahsedilen dört şekilde bütün deneylerde ADF'de daha az tıkanma yük kaybı meydana geldiği görülmektedir.



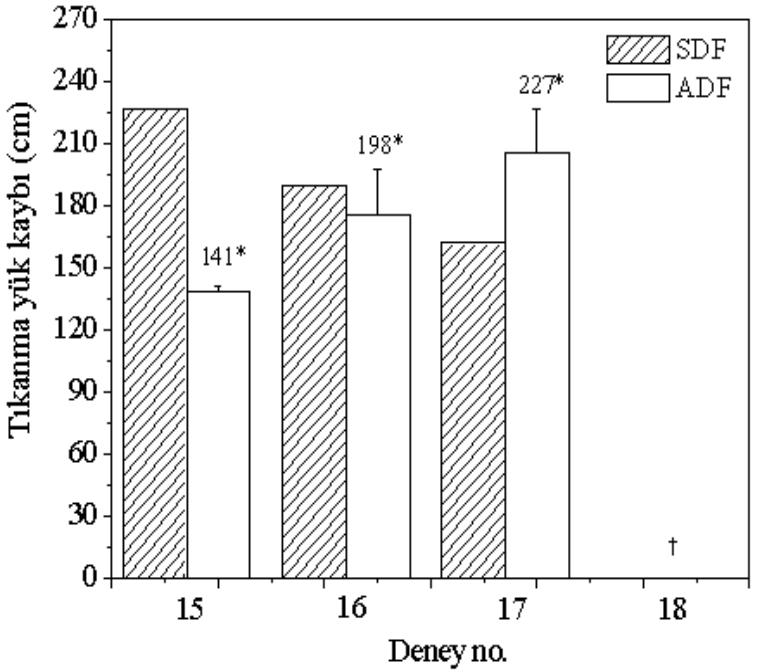
Şekil 5.54. 5 mg/L alum deneylerinde filtrasyon sonunda meydana gelen tıkanma yük kayıpları, 2. filtrasyon döngüsü, *: ADF'de geri yıkama sırasında elde edilen tıkanma yük kaybı).



Şekil 5.55. 7.5 mg/L alum deneylerinde filtrasyon sonunda meydana gelen tıkanma yük kayıpları, 2. filtrasyon döngüsü, *: ADF'de geri yıkama sırasında elde edilen tıkanma yük kaybı).



Şekil 5.56. 10 mg/L alum deneylerinde filtrasyon sonunda meydana gelen tıkanma yük kayıpları, 2. filtrasyon döngüsü, *: ADF'de geri yıkama sırasında elde edilen tıkanma yük kaybı).



Şekil 5.57. 12.5 mg/L alum deneylerinde filtrasyon sonunda meydana gelen tıkanma yük kayıpları, 2. filtrasyon döngüsü, *: ADF'de geri yıkama sırasında elde edilen tıkanma yük kaybı). Not: Filtreler tıkandığından, 16 ve 17. deneylere ait SDF verileri 24 değil, 18 saatliktir. †: 18. deneyde filtreler 12 saatte tıkanmış, ADF'deki maks. ve min. hız katsayıları elde edilememiştir.

Şekil 5.58'de, bu çalışmada birbirinden bağımsız yürütülen 18 adet deneydeki SDF ile ADF sistemlerinin yük kaybı eğrilerinin eğimlerinin oranları verilmiştir. Şekildeki değerler Tablo 5.19'da sunulmuştur. 18. deneye ait veriler, sadece ilk 12 saatlik başlangıç (start-up) periyodunu temsil ettiklerinden hem şekilde hem de tabloda gösterilmemiştir (18. deneyde 12 saatte maksimum izin verilebilir yük kaybına ulaşıldığından deney sonlandırılmıştır). Şekil 5.58'de ham veriler içi dolu siyah daire sembolleriyle gösterilmişlerdir. Şekilden görülebileceği gibi literatürde daha önce bildirilenin [Cleasby and Di Bernardo, 1980; Hilmoe and Cleasby, 1986] aksine iki sistemin yük kaybı eğrilerinin eğimleri eşit değildir. Eğim oranlarının 1'den sapma yüzdesi 14.4 ile 77.7 (ortalama: % 37.8) aralığında değişmektedir. Bu sapmadaki varyasyonların, ortalama hız ya da alum dozajlarından herhangi birine bağlı olan belirgin bir eğilim içinde olmadığı görülmektedir. Şekil 5.58'deki diğer sembol setinin (×) temsil ettiği düzeltilmiş veriler ise şu şekilde açıklanmaktadır: Akgiray and Saatçı [1998b] dikkate alınarak, ADF sistemine gelen toplam giriş debisi Q ve filtrelerdeki ortak su seviyesi de h (filtrat çıkış seviyesi referans alınarak) olsun. A and A_a ise sırasıyla her bir filtrenin yüzey alanı ve filtre başına kullanılabilir su birikme alanını temsil etsin. Ayrıca, $v_i(t)$ de sistemdeki i numaralı filtrenin zamana bağlı hızı olarak kabul edilsin. Akgiray and Saatçı [1998b]'de gösterildiği gibi su seviyesi değişim eğrisi (Seviye 2 ve Seviye 3 arasında) ADF için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{A}{A_a}\left[\frac{(Q/N)}{A} - v_m(t)\right] \tag{5.7}$$

Buradaki $V_m(t)$ (t anındaki ortalama hız) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

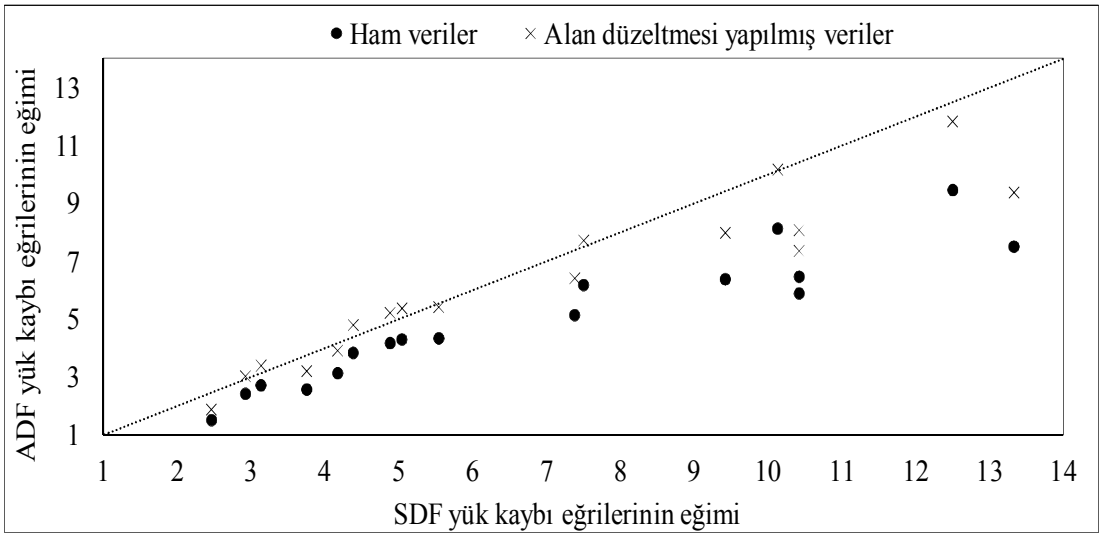
$$v_m(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} v_i(t) \tag{5.8}$$

5.7 denkleminin türetilişi ve detayları Akgiray and Saatçı [1998b]'de bulunabilir. 5.7 denklemine bakıldığında yük kaybı eğrisi eğiminin (d_h/d_t), A/A_a oranının azaltılmasıyla azaltılabileceği görülmektedir. Akgiray and Saatçı [1998b]'de h_2-h_3 ve h_3-h_4 seviyelerindeki varyasyonların pratikte nasıl azaltılacağı şu şekilde bildirilmektedir: Filtre tanklarından sonra, tanklara orifisler içeren batık kanallarla bağlı çöktürme tankları yerleştirilirse, çöktürme tanklarındaki su seviyesi filtre tanklarındaki su seviyesini takip edecektir [Cleasby, 1993]. Böyle bir durumda, çöktürme tanklarının yüzey alanı A_a alanının içinde yer alacak ve böylece A/A_a değeri çok küçük olacaktır.

Bu çalışmada A/Aa oranına bağlı h_2-h_3 su seviyesi eğrisinin, aynı ortalama hızda işletilen SD filtresinin tıkanma yük kaybı eğimine her zaman eşit olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Di Bernardo and Cleasby [1980] ve Hilmoe and Cleasby [1986]'nın çalışmalarında A/Aa oranının yaklaşık 1 ve ADF ile SDF için aynı olduğu pilot tesisler kullanılmıştır. Bu çalışmada ise tek bir SD filtresinin A/A_a oranının 1 olmasına karşın ADF için 4/5'tir (AD filtrelerine ham suyun dağıtılmadan önce biriktirildiği düşey kolon, dört adet AD filtresi ile aynı çapa sahiptir. Dolayısıyla bu kolonun da alanı filtre biriktirme alanı olarak hesaba katılmıştır: Aa = A + A/4 = 5A/4.). Bu nedenle, birinci dereceden bir düzeltme olarak ADF'deki Seviye 2 ve 3 arasındaki deneysel dh/dt değerleri 5/4 ile çarpılmış ve Şekil 5.58'de "alan düzeltmesi yapılmış veriler" olarak gösterilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, bu düzeltme ile SDF ve ADF eğimleri arasındaki uyumsuzluk biraz giderilmiş olsa da (yukarıda bahsedilen %37.8 sapma oranı % 14'e düşmüştür) Cleasby [1993]'ün *"aynı ortalama filtrasyon hızlarında işlerilen SDF ile ADF'nin yük kayıpları eğrilerinin eğimleri eşittir"* ifadesinin bu çalışmada her zaman doğru olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 5.19. ADF ve SDF filtrelerinin yük kaybı eğrilerinin eğim değerleri

Deney no.	Yük kaybı eğrilerinin eğimleri (cm/sa)			Oran ($SDF_{eğim}/ADF_{eğim}$)		Fark (%)	
	SDF	*ADF (ham veri)*	*ADF (alan düzeltmesi yapılmış)*	*(Ham veriye göre)*	*(Alan düzeltmesi yapılmış veriye göre)*	*Ham veriye göre*	*Alan düzeltmesi yapılmış veriye göre*
1	2.46	1.5	1.88	1.64	1.31	64.0	31.2
2	3.13	2.71	3.39	1.15	0.92	15.5	7.6
3	4.17	3.13	3.91	1.33	1.07	33.2	6.6
4	4.88	4.17	5.21	1.17	0.94	17.0	6.4
5	5.04	4.29	5.36	1.17	0.94	17.5	6.0
6	2.92	2.42	3.03	1.21	0.97	20.7	3.5
7	3.75	2.56	3.20	1.46	1.17	46.5	17.2
8	4.38	3.83	4.79	1.14	0.91	14.4	8.5
9	5.54	4.33	5.41	1.28	1.02	27.9	2.4
10	7.38	5.13	6.41	1.44	1.15	43.9	15.1
11	9.42	6.38	7.98	1.48	1.18	47.6	18.1
12	10.42	6.46	8.08	1.61	1.29	61.3	29.0
13	7.50	6.17	7.71	1.22	0.97	21.6	2.8
14	10.13	8.13	10.16	1.25	1.00	24.6	0.3
15	10.42	5.88	7.35	1.77	1.42	77.2	41.8
16	13.33	7.5	9.38	1.78	1.42	77.7	42.2
17	12.50	9.46	11.83	1.32	1.06	32.1	5.7
18	-	-	-	-	-	-	-



Şekil 5.58. Birbirine paralel işletilen ADF ile SDF sistemlerindeki yük kaybı eğrilerinin eğimlerinin karşılaştırılması.

5.2. Filtre Sistemlerinin Su Kalitesi Açısından İncelenmesi

Bu çalışmada öncelikle, AD filtrelerinin hidrolik davranışlarının farklı deney şartları altında incelenmesi amaçlanmış ve literatürdeki geçmiş çalışmalarda cevaplanmamış ya da kısmen cevaplanmış sorulara her zaman geçerli olabilecek cevaplar bulunmaya çalışılmıştır. Önceki kısımda (5.1'de) bu amaca yönelik çalışmaların sonuçları sunulmuş, ADF sistemi kendi içerisinde hidrolik olarak incelenirken bir yandan da geleneksel olarak kullanılan SD filtresi ile (yine hidrolik açıdan) mukayese edilmiştir.

Bilindiği gibi su arıtma tesislerindeki filtrasyon prosesleri genel olarak iki kontrol yönteminden birisi ile işletilirler: sabit debili (SD) ya da azalan debili (AD) sistemler. Sabit debili terimi, filtreden geçen debinin sabit olduğunu (debinin filtrasyon süresince hemen hemen değişmediğini) belirtmektedir. Bu kontrol yöntemi de: (1) sabit debili, (2) sabit su seviyeli ve (3) giriş akımının bölündüğü sistem şeklinde sınıflandırılabilir [Cornwell, et al, 1991]. İlk yöntemde (sabit çıkış debisi kontrollü sistem), giriş akımı her filtredeki su seviyesinin daha alt seviyesinden gerçekleşmekte ve herhangi bir kısıtlamaya tabi tutulmamaktadır. Hız kontrol cihazı (ya da sistemi) (kısıtlama) filtre çıkış suyu hattına yerleştirilmiştir. Böylelikle sürekli olarak arzu edilen sabit hız elde edilebilmektedir. İkinci yöntem (sabit su seviyesi kontrollü sistem) birinci yöntemdeki sistemle aynı tasarımda olmakla birlikte, burada çıkış hattındaki kontrol cihazı, filtre tankı içerisindeki su seviyesini kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Böylelikle sürekli olarak arzu edilen sabit su seviyesi elde edilebilmektedir. Üçüncü sistemde ise giriş akımı sistemdeki bütün filtrelere eşit olarak dağıtılır ve bu işlem her bir filtre üzerinde yer alan -genellikle- bir savak yardımıyla gerçekleştirilir. Filtre giriş akımı filtre tankı içerisindeki su seviyesinden daha yukarıda olarak gerçekleşmektedir [Cleasby, 1969; Cleasby and Di Bernardo, 1980]. Cleasby (1969) ve Cleasby and Di Bernardo (1980) ilk kontrol metodundaki debi kontrol cihazlarının yüksek başlangıç ve işletme maliyetleri gerektirdiğini belirtmiştir. Ayrıca kontrol cihazının ayarı, çıkış suyunun giriş suyuna eşit olacağı şekilde yapılmazsa filtre tanklarına gelen debi gerektiğinden çok daha yüksek ya da

çok daha düşük olabilecektir. Bu dezavantajlara ilâveten özellikle sabit seviye kontrollü filtrelerin kullanıldığı tesis giriş debisindeki herhangi bir artış ya da filtre sistemindeki bir filtrenin geri yıkamaya alınması sebebiyle diğer filtrelerdeki hız artışları, kısmî olarak kirlenmiş filtrelerin çıkış suyu kalitesini olumsuz olarak etkileyebilmektedir. Üçüncü kontrol yönteminde ise bahsedilen dezavantajlar yer almayıp, tesis giriş debisinde büyük değişiklikler olmadığı takdirde herhangi bir debi kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyulmamakta, filtre tanklarındaki su seviyeleri derece derece yükselmekte ve dolayısıyla çıkış suyu kalitesini olumsuz etkileyen ani hız değişikliklerine rastlanmamaktadır. Bununla birlikte hızda meydana gelebilecek artışlar da yine kademeli ve hafif olarak meydana gelmektedir. Tesise gelen toplam debi filtrelere eşit olarak paylaştırıldığı için, her bir filtrede hız ölçümüne de gerek yoktur. Bahsedilen avantajlara karşın, üçüncü kontrol yönteminde, herhangi bir debi/hız kontrol cihazı yer almadığından, muhtemel su seviyesi yükselmelerine karşın yük kayıplarını karşılayabilecek ekstra yükseklikte filtre tanklarının inşa edilmesi gerekebilmektedir. Bu kontrol yönteminin diğer yöntemlere karşılık tek dezavantajı olan ve yatırım maliyetini artırabilecek bu husus kontrol yöntemi seçiminde dikkate alınmalıdır [Cleasby, 1969].

Filtre hızını kontrol etmek için kullanılan ikinci yöntem ise 5.1'de ayrıntıları verilen AD sistemidir. Bu bölümde AD filtreleri ile SD filtresi hidrolik açıdan değil, ürettikleri suyun kalitesi açısından mukayese edilmişlerdir. Bu karşılaştırmada çıkış suyunda bulanıklık ve parçacık sayısı ölçümleri dikkate alınmıştır.

ADF kullanılarak gerçek tesis ölçeğinde yapılan ilk çalışmalardan birisi Jackson'a (1955) aittir. Çalışmada yüksek hızlı filtreler (5 m/sa'dan daha yüksek hızda işletilen filtreler) üzerine yoğunlaşılmıştır. Çalışmada kullanılan sistem gerçekte ADF olarak tasarlanmamıştır. Filtrasyonun başında kontrol mekanizması devreden çıkarılarak ya da vana tamamen açılarak başlangıç debisi yüksek tutulmaya çalışılmıştır. Filtreler tıkandıkça hızları da azalmıştır. Filtrasyon hızında meydana gelen bu dereceli azalmanın su kalitesine olumsuz bir etkisinin olmadığı raporlanmıştır.

Baylis (1959) ise değişken hızlı filtrasyon olarak adlandırdığı prosesi kullandığı tam ölçekli tesis çalışmalarında sabit debili filtre sisteminin azalan debiliye dönüştürülmesiyle birlikte su kalitesinde bozulma olmadığını bildirmiştir. Literatürde ADF teriminin ilk kez kullanıldığı tam ölçekli bir çalışmada ADF sisteminin SDF sistemine göre daha iyi kalitede çıkış suyu ürettiği rapor edilmiştir [Hudson, 1959; Hudson and Hazey, 1959].

Cleasby (1969), filtrasyon süresince su seviyelerinin nasıl değiştiğini gösterdiği ve prosesi "değişken azalan debili filtrasyon" (DADF) olarak adlandırdığı çalışmasında, tam ölçekte dört filtreli bir ADF'nin bir SD filtresiyle mukayesesi sonucu ADF'nin daha iyi kalitede filtrat ürettiğini bildirmiştir.

Bryant (1974) ve Arboleda (1974) yürüttükleri tam ölçekli çalışmalarda ADF sistemi kullanmanın SDF'ye göre daha avantajlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Literatürdeki ADF çalışmaları özetle şu şekilde sınıflandırılabilir: Mevcut SDF sistemlerinin modifiye edilerek ADF sistemlerine dönüştürülmesi [Baylis, 1959; Hudson, 1959; Cleasby, 1981], tam ölçekte ADF sistemlerinin hidrolik davranışlarının incelenmesi [Cleasby, 1969; Arboleda, 1974], tam ölçekte (veya pilot ölçekte) SDF ve ADF sistemlerinin hidrolik ve su kalitesi açısından karşılaştırılması [Arboleda, 1974; Di Bernardo and Cleasby, 1980; Hilmoe and Cleasby, 1986; Cornwell et al.; 1991].

Bu çalışmalardan birinde [Di Bernardo and Cleasby, 1980] bir kireç yumuşatma su arıtma tesisinde dört filtreden oluşan bir ADF sistemi ile tek bir SD filtresi paralel olarak üç farklı ortalama hızda (7.3, 12.2 ve 17.1 m/sa). işletilmiştir. Her iki filtre türü de aynı ortalama filtrasyon hızlarında aynı tıkanma yük kayıplarıyla işletilmişlerdir. ADF sistemi ile %30 daha düşük bulanıklıkta çıkış suyu elde edilmiştir.

Diğer benzer bir çalışmada [Hilmoe and Cleasby, 1986], pilot ölçekte ve iki farklı ortalama hızda (7.7 ve 13.4 m/sa) filtreler işletilmiştir. Bir önceki çalışmanın [Di Bernardo and Cleasby, 1980] aksine iki sistem arasında çıkış suyu kalitesi açısından bir fark gözlenmemiştir.

Ağırlıklı olarak 1970 ve 1990 yılları arasında yürütülen bu çalışmalardan görülebileceği gibi çalışmaların bazılarında su kalitesi açısından ADF ile SDF prosesleri arasında fark görülemezken bazılarında da ADF'nin avantajlı olduğu rapor edilmiştir. Buraya kadar bahsedilen bütün çalışmalarla ilgili bir analiz içeren son bir çalışma da Cornwell ve arkadaşları (1991) tarafından yürütülmüştür ve pilot sistemin tam ölçekli sisteme büyütülmesinden (scale-up) kaynaklanabilecek problemleri minimize edebilmek için tam ölçekli tesis tercih edilmiştir. Deneyler Durham, NC şehrindeki Williams Su Arıtma Tesisi'nde gerçekleştirilmiş, 10, 15 ve 20 m/sa aralığında üç farklı ortalama filtrasyon hızı seçilmiş ve SDF ile ADF prosesleri; filtrasyon süresi, filtrat hacmi, bulanıklık giderimi, çıkış suyu parçacık sayısı, geri yıkama şartları ve filtrasyon hidroliği açısından mukayese edilmiştir ve özel olarak şu aşağıdaki iddialar üzerinde durulmuştur:

1. ADF sisteminde daha iyi kalitede çıkış suyu elde edilir çünkü filtre yatağında parçacıklar tutuldukça filtrasyon hızı azalır ve bu parçacıkları çıkış suyuna sürükleyecek ve su kalitesini bozacak hızda bir akış meydana gelmez.
2. SDF sisteminde daha iyi kalitede çıkış suyu elde edilir çünkü filtrede yüksek başlangıç hızı meydana gelmez.
3. ADF sisteminin filtrasyon süresi daha uzundur ve her bir işletme periyodunda ürettiği filtrat hacmi daha fazladır.
4. SDF sisteminin filtrasyon süresi daha uzundur ve her bir işletme periyodunda ürettiği filtrat hacmi daha fazladır.
5. ADF sisteminde hızda ani dalgalanmalar meydana gelebileceğinden bu sistem bozulmalara karşı daha duyarlıdır.

6. SDF sisteminde hızda ani dalgalanmalar meydana gelebileceğinden bu sistem bozulmalara karşı daha duyarlıdır.
7. ADF sisteminde hızdaki yumuşak dalgalanmalardan dolayı bu sistem bozulmalara karşı daha az duyarlıdır.
8. SDF sisteminde hızdaki yumuşak dalgalanmalardan dolayı bu sistem bozulmalara karşı daha az duyarlıdır.
9. ADF sisteminin yatırım (inşa) ve bakım maliyetleri daha düşüktür.
10. SDF sisteminin yatırım (inşa) ve bakım maliyetleri daha düşüktür.
11. ADF ve SDF sistemlerinin yatırım (inşa) ve bakım maliyetleri hemen hemen aynıdır.
12. Geri yıkama süresince işletmedeki diğer filtrelerin hızı arttığından AD filtreleri bulanıklık pikleri oluşturmaya daha yatkındır.
13. Geri yıkama süresince işletmedeki diğer filtrelerin hızı arttığından SD filtreleri bulanıklık pikleri oluşturmaya daha yatkındır.

Çalışma sonucunda yukarıdaki iddialarla ilgili şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Çıkış suyu bulanıklık ölçümleri filtrasyonun "son bir saatinde" her 10 dakikada bir gerçekleştirilmiştir. 10, 15 ve 20 m/sa ortalama filtrasyon hızlarıyla işletilen filtrelerde ADF sisteminin deney sonundaki hızları sırasıyla yaklaşık olarak 6.25, 9 ve 13.25 m/sa'ya düşmüştür. Bu son hızlar, Cleasby and Di Bernardo'nun (1980) tipik olarak kabul ettiği gibi ortalama hızın 0.6-0.7 katıdır. SDF'nin hızı ise (beklendiği ve olması gerektiği gibi) yaklaşık aynı kalmıştır. Her iki sistemin de çıkış suyu bulanıklıkları aynı ölçülmüştür. *Dolayısıyla, filtrelerin tıkandıkça hızlarının yavaşlaması ve filtre yatağı içinde tutulan parçacıkları çıkış suyuna taşıyabilecek yüksek hızlara erişmemesi sebebiyle ADF'nin SDF'den daha iyi kalitede su ürettiği iddiası bu çalışmada ispatlanamamıştır.* Burada dikkate alınması gereken bir diğer husus, filtre işletme süresi çıkış suyu bulanıklığındaki artışa göre değil,

yük kaybı ölçümlerine göre belirlenmiştir. Belli bir yük kaybına ulaşıldığında filtrasyon sona erdirilmiş, geri yıkama başlatılmıştır.

2. Çıkış suyu bulanıklık ölçümleri filtrasyonun "ilk bir saatinde" her 10 dakikada bir gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 10, 15 ve 20 m/sa ortalama filtrasyon hızına sahip filtrelerde ADF sisteminin deney başlangıcındaki hızları sırasıyla yaklaşık olarak 12.75, 20.5 ve 28.5 m/sa olarak ölçülmüştür. Bu başlangıç hızları, Cleasby and Di Bernardo'nun (1980) tipik olarak kabul ettiği katsayıya (1.5) benzer şekilde ortalama hızın 1.3-1.4 katıdır. SDF ise filtrasyonun başlangıç periyodunda sabit ortalama hızla işletilmiştir. Her iki sistemin de çıkış suyu bulanıklıkları aynı ölçülmüştür. *Dolayısıyla, filtrasyonun yüksek hızla başladığı ADF'de çıkış suyundaki bulanıklıkta atılım (turbidity breakthrough) beklenmesi sebebiyle SDF'nin' ADF den daha iyi kalitede su ürettiği iddiası bu çalışmada ispatlanamamıştır.*

3. Çalışmadaki teorik hesaplamalara göre ADF sisteminin, aynı yük kayıplarında, 10, 15 ve 20 m/sa filtrasyon hızlarında SDF'ye oranla sırasıyla % 10, %17 ve %30 daha uzun filtrasyon süresine sahip olacağı belirtilmiş; deneylerde ise bu değerler sırasıyla %0, %13-15 ve % 40-90 olarak elde edilmiştir. *Bu çalışmada, ADF sisteminin aynı terminal yük kaybında SDF'ye kıyasla daha uzun filtrasyon sürelerine sahip olduğu iddiası ispatlanabilmiştir.*

4. Sadece geri yıkama periyotlarında önemli hız dalgalanmaları meydana gelmiştir. Bunun dışında, filtrasyon süresince hızlarda herhangi bir bozulma meydana gelmemiş ve *dolayısıyla ADF ya da SDF sisteminin hızlardaki dalgalanmalara karşı daha az ya da daha çok duyarlı oldukları iddiasına cevap bulunamamıştır.*

5. Her iki sistemde de filtrelerden biri geri yıkanırken işletmede kalan diğer filtreler için her beş dakikada bir hız, yük kaybı ve bulanıklık verisi toplanıp analiz edilmiştir. ADF sisteminde geri yıkamaya alınan filtrenin devreden çıkarılmadan önce, sistemin toplam debisinin %12-14'ü kadarını filtre ettiği tespit edilmiştir. Bu oranın SDF için % 25 olduğu görülmüştür. Her iki sistemde de herhangi bir işletme hızında bulanıklık pikine rastlanılmamıştır. *Bu araştırmada, bir filtrenin geri yıkamaya alınmasıyla birlikte kalan*

filtrelerdeki akış değişimlerinin ADF sisteminde daha yavaş ve ani olmadan gerçekleştiği iddiası doğrulanmıştır.

6. ADF sistemi, giriş akımını bütün filtrelere dağıtabilecek genişlikte bir giriş borusuna/kanalına sahip olacak şekilde inşa edilmelidir. Çıkışta ise her iki sistem için de arzu edilen statik su seviyesini sağlamak üzere bir çıkış savağı düşünülebilir ise de bu savak SDF için opsiyonel olmasına karşın ADF sisteminde dikkatle tasarlanmalıdır. SDF sistemi, akış/debi (hız) kontrol cihazı ve kontrol vanaları içerebilir. ADF sisteminde bu tür hız kontrol cihazlarına ihtiyaç bulunmamaktadır. Her iki sistemde de giriş ve çıkış vanası ve filter-to-waste (filtrasyonun ilk zamanlarında meydana gelen ve filtrenin olgunlaşması (ripening) olarak adlandırılan ve yaklaşık 15-30 dakika süren bu sürede su kalitesi oldukça kötüdür) yapısına gerek vardır. Filtrasyonda maliyeti artıran en büyük unsur geri yıkamada harcanan su miktarıdır. ADF sisteminde daha uzun filtrasyon süreleri elde edilebildiğinden daha az sıklıkta geri yıkama yapılacak, dolayısıyla daha az geri yıkama suyu tüketilecektir. Bu çalışmanın öncelikli amacı ADF ve SDF sistemlerinin maliyet açısından kıyaslanması olmamasına rağmen yukarıda sayılan maliyet parametreleri göz önüne alındığında, SDF sistemindeki hız ve debi kontrol cihazlarının kurulum ve bakım maliyetleri ile geri yıkama suyu tüketim maliyetlerinin fazlalığı ADF sistemini avantajlı hale getirmektedir. *Dolayısyla ADF sisteminin yatırım (inşa) ve bakım maliyetleri daha düşüktür iddiasının doğru olduğu söylenebilir.*

Cornwell'in çalışmasında [Cornwell et al., 1991] literatürdeki geçmiş iddialardan bazılarına yanıt bulunmuş olsa da bazı hususlar için geçerli cevaplar elde edilememiştir. Bunun sebebi de ADF ile SDF'nin tam birebir mukayesesini imkân vermeyen aşağıdaki durumlardır:

1. İki filtre sistemi aynı toplam yük kaybı ile işletilmemiş ve ADF sisteminde filtre yatağının susuz kalmasını engellemek için filtre yatağının daha üst bir seviyesinde yer alan filtrat çıkış yapısı inşa edilmiştir. SDF'de ise böyle bir çıkış yapısı kullanılmamış, dolayısıyla iki sistemin hidrolik açıdan benzerliği

sağlanamamıştır. Çıkış yapıları farklı olduğundan özellikle mansap tarafında doğru bir hidrolik mukayese gerçekleştirilememiştir.

2. SDF'de çıkış suyu seviyesi, filtre tankındaki statik su seviyesinden daha aşağıda yer aldığı için SDF'de zaman zaman negatif basınç oluşmuştur.
3. Karşılaştırma deneyleri tam ölçekli ve halk sağlığını korumak amacıyla kullanılan bir su arıtma tesisinde gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla çalışmanın önceliği, ADF ile SDF sistemlerinin karşılaştırılmasından ziyade doğru bir arıtma tekniği ile yüksek kalitede ve standartlara uygun içme suyu üretmektir. Bu nedenle çalışmanın bazı dönemlerinde filtrelere müdahale edilmiş, deneyler durdurulmuş ve farklı şartlarda devam ettirilmek zorunda kalınmıştır.

Görüldüğü gibi, literatürde SDF ile ADF'nin karşılaştırılmasına yönelik en kapsamlı ve en son çalışmalardan biri olan Cornwell ve arkadaşlarının (1991) çalışmasındaki bütün bu gerekçeler ADF ile SDF'nin etkin ve doğru bir biçimde karşılaştırılmasını zorlaştırmıştır. Netice olarak buradaki deneylerin tekrar edilmesi ve elde edilen sonuçların da tekrar doğrulanması ve analiz edilmesi ihtiyacı doğmuştur. Tam ölçekli testlerde karşılaşılabilecek zorluklar aşağıdaki gibi maddelendirilebilir:

- Tesis giriş debisinde meydana gelebilecek değişiklikler,
- İşletme koşullarındaki, filtre operatörlerinden kaynaklanabilecek değişiklikler,
- Filtrasyon süresince giriş suyu kalitesindeki muhtemel değişiklikler.

Tam ölçekli arıtma tesislerinde meydana gelebilecek güçlüklerden kaçınabilmek ve ADF ile SDF arasında hem hidrolik hem de su kalitesi açısından birebir karşılaştırma yapabilmek için bu tez çalışması kapsamında pilot ölçekli deneyler yürütülmüştür. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE), İçme Suyu Laboratuarında kurulan ve birbiriyle eşdeğer olan ADF ve SDF sistemleri,

laboratuvar kontrollü deney koşulları altında paralel olarak işletilmiştir. Filtrelerde aynı hidrolik yapıların inşa edilmesi sağlanmış, filtrelerde aynı miktarda kum yatağı temin edilmiş, aynı ham su, aynı filtrasyon hızları kullanılmıştır ve temel olarak şu soruya cevap aranmıştır: ADF, SDF'den daha iyi kalitede su üretir mi? Filtreleri ADF olarak inşa etmek, su kalitesini iyileştirir mi?

İki sistemin su kalitesini karşılaştırabilmek için literatürde bulanıklık ve parçacık sayısı olmak üzere iki ölçüme öncelik verilmiştir. Filtrasyon boyunca belirli sürelerde numuneler alınmış ya da teknolojinin gelişimine bağlı olarak akış üzerinde ölçüm yapan bazı cihazlar kullanılmıştır. Bu cihazların yoğun olarak kullanıldığı son çalışmalardan biri de yine yukarıda bahsedilen Cornwell ve arkadaşlarına (1991) ait çalışmadır. Her bir filtredeki akış hızı 30 dakika aralıklarla kaydedilmiş, 120 dakikada bir raporlanmıştır. Yine benzer şekilde 5-15 μm aralığında (Giardia cyst boyunu temsile etmek üzere) parçacık sayısı ölçülmüştür. Toplam yük kaybı ölçümleri yapılırken filtre ortamı, destekleyici çakıl tabaka, alt drenaj ve çıkış borulama sistemi dikkate alınmıştır. Ölçümler 30 dakika aralıklarla kaydedilmiş, 120 dakikada bir raporlanmıştır. Filtre hızları da aynı sıklıkta kaydedilmiş ve raporlanmıştır. ADF'de bir filtrenin geri yıkama süresince diğer filtreler daha fazla debi geçirdiklerinden hidrolik koşullarda da ani değişiklikler meydana gelebilmektedir. Bu sebeple geri yıkama ve filter-to-waste süresince yük kaybı ölçümleri sıklaştırılmış, 5 dakikada bir ölçüm alınmıştır.

Tez çalışmamızda, ilerleyen teknolojinin getirdiği imkânlar da kullanılarak, ADF ve SDF pilot tesisleri otomasyonlu olarak kurulmuştur. Yukarıda bahsedilen ölçümlerin çok daha hassas ve daha sık aralıklarla gerçekleştirilmesi, ADF sisteminin gerek hidrolik davranışlarını gerekse de çıkış suyuna etkilerini anlamak açısından faydalı olacaktır. Çalışmamızda yük kaybı ve hız ölçümleri 5 saniyede bir ölçülmüş ve raporlanmış, bulanıklık sürekli olarak (online) ölçülmüş ve 5 dakikada bir raporlanmış, parçacık sayısı da yine sürekli olarak (online) ölçülmüş ve 1 dakikada bir raporlanmıştır. Böylelikle her bir deneyden çok büyük miktarda veri elde edilmiştir. Ayrıca önceki çalışmalardan farklı olarak tek bir filtrasyon hızı ya da

yumaklaştırıcı dozajı değil, dört farklı yumaklaştırıcı dozajının ve 5 farklı ortalama filtrasyon hızının kullanıldığı bir deney matrisine göre testler yürütülmüştür.

5.2.1. Farklı Alum Dozajlarında Filtrasyon Hızının Etkisi

Filtrasyon, akış hızındaki değişimlere karşı oldukça hassas bir ileri arıtma prosesidir. Filtrasyon hızındaki ani ve büyük değişimlerin çıkış suyu kalitesini olumsuz etkilediği bilinmektedir. Bu yüzden işletme sırasında filtre hızını mümkün mertebe sabit tutabilmek amacıyla hız/akış kontrol cihazları kullanılmaktadır. Bu kontrol cihazlarının kullanımı sırasında karşılaşılan güçlükler aşağıdaki gibi özetlenebilir [Chaudry, 1987 (Part I)]:

- Filtrelerin bank şeklinde işletilmesi gibi sebeplerle giriş kısmındaki kontrol cihazları, filtre hızındaki çalkantıları tamamen engelleyememektedir,
- Cihazların her zaman arızalanma riski vardır,
- Pahalı cihazlardır, kurulumları ve bakımları oldukça maliyetlidir.

Filtrasyon hızındaki değişimlerin filtre çıkış suyu kalitesi üzerine olan muhtemel zararlı etkileri literatürde bazı çalışmalarla bildirilmiştir [Cleasby et al., 1963; Rogers, 1963; Rogers, 1964; Tuepker, 1965; Robeck, 1967]. Bu çalışmaların sonuçlarında özetle, kısmi olarak kirlenmiş bir filtrede, filtrasyon hızındaki artışın, çıkış suyu kalitesini bozduğu rapor edilmiştir. Özellikle, hızda meydana gelebilecek ani artışlar çıkış suyu kalitesini bozan bir flok atılımına (floc breakthrough) sebep olmaktadır (Baylis, 1958; Hudson, 1956; Cleasby, et al., 1963; Tuepker, 1965; Robeck, 1972). Dolayısıyla çıkış suyu kalitesini doğrudan etkileyen filtre hızının belirlenmesinde hidrolik kontrol tipi çok önemlidir ve filtrasyon hidroliği ile ilgili yapılan çalışmalarda filtrelerin sabit hızla çalışması gerektiği belirtilir. Ancak, yukarıda belirtildiği gibi kontrol cihazlarının sık sık arıza yapabilmesi ya da toplam

tesis giriş debisinin, çıkış kontrol cihazlarının ayarlandığı değerden çok büyük veya çok küçük olması durumunda hız değişken hale geçer. Bu durum, filtrelerin her zaman istenildiği gibi sabit hızda işletilememesine yol açar [Cleasby, 1972].

Filtre hızı sabitken (SDF sisteminde), doymamış filtre ortamı tabakası ince olduğundan filtreden kaçan bulanıklık/parçacık sayısı da artar (bu durum ayrıca flok sağlamlığına flok üzerine etkiyen kuvvetlere de bağlıdır). Filtre hızı "azalan" olarak dizayn edilirse doygun filtre ortamından geçen flok miktarı ve flok üzerine etkiyen kuvvetler de azalacak, aynı zamanda doymamış filtre ortamı daha ince olacaktır. Bu da çıkış suyu bulanıklığındaki artış hızını yavaşlatacaktır (Bryant, 1974). Azalan debili sistemde bütün filtreler ve kanallar birer rezervuar gibi çalıştıklarından, filtrelerdeki su akış varyasyonları çok yavaş olur ve su seviyesinde anî değişiklikler meydana gelmez [Arboleda, 1974].

ADF sistemi ile SDF sistemi arasında filtre hızı kontrol metodunun su kalitesi üzerindeki etkileri üzerine bir karşılaştırma yapabilmek için, farklı ortalama filtrasyon hızlarında, kontrollü deney şartları altında pilot ölçekli bir tesiste testler yürütülmüştür. Hızın etkisi farklı yumaklaştırıcı dozajları altında da incelenmiştir.

5.2.1.1. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneyler

Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerin şartları aşağıdaki Tablo 5.20'de sunulmuştur. Bu dozajda beş farklı ortalama filtrasyon hızında deneyler yürütülmüş ve ADF sistemine ait deneylerle paralel olarak gerçekleştirilen SDF deneyinin ortalama hızları, tablodan görülebileceği gibi mümkün mertebe eşit tutulmaya çalışılmıştır. ADF sisteminde dört, SDF'de ise bir filtre yer aldığı için ADF sistemine sağlanan ham su debisinin dörtte biri kadar debide ham su SDF'ye gönderilmiştir.

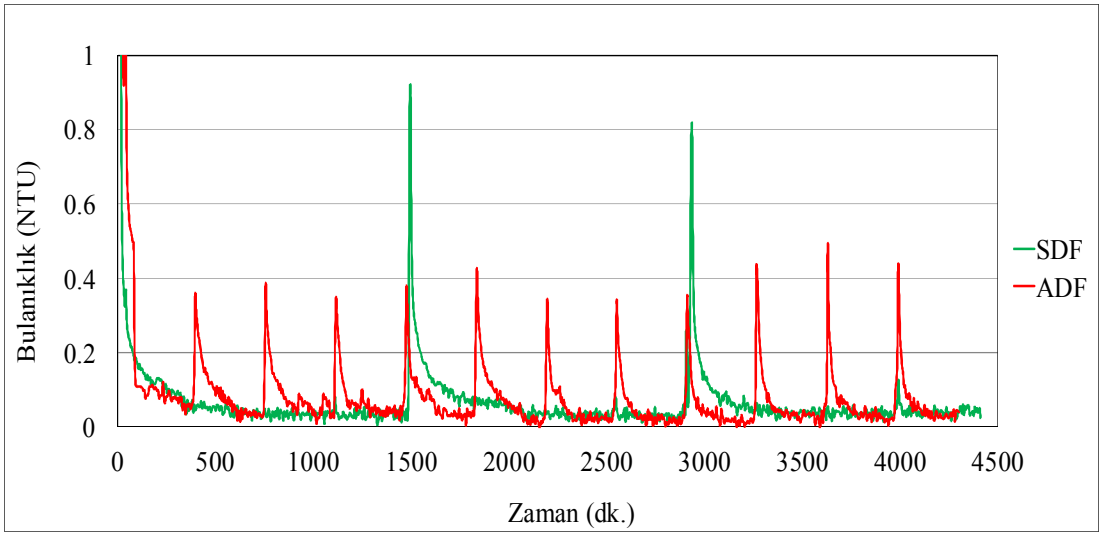
Deneylerde kullanılan ham su musluk suyu ve kaolin karışımından elde edilmiş, deney süresince ölçüm yapılarak ortalama bulanıklığı yaklaşık 10 NTU olarak sabitlenmeye çalışılmıştır. Bu ham suyun 2-5 μm aralığındaki ve 5 μm'den büyük parçacık sayıları da yaklaşık olarak sırasıyla 20,000 ve 13,000 adet/mL'dir.

Deneyler 72 saate kadar sürdürülmüş ve sürekli bulanıklık (5 dakikada bir) ile parçacık sayısı ölçümlerinden (dakikada bir) çok miktarda veri elde edilmiştir. Her bir deney için (1) Giriş bulanıklığının filtrasyon süresince değişimi, (2) Çıkış suyu bulanıklığı, (3) Çıkış suyunda 2-5 μm boyutundaki parçacık sayısı ve (4) Çıkış suyunda 5 μm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi olmak üzere toplam 18 deneye ait 72 adet grafik elde edilmiştir. Bu grafiklerde SDF ve ADF sistemi bir arada sunulmuştur. Veri miktarının fazlalığından dolayı bu grafiklerin bir kısmı Ekler-B bölümünde ve numaralandırılmış olarak verilmiştir. Bu dört tip grafik arasından burada sadece çıkış suyu bulanıklığının filtrasyon süresince değişimi ile ilgili olan grafikler verilmiştir. Ayrıca, tartışma sonuç bölümünde hem filtrasyon hızının su kalitesine muhtemel etkilerini hem de ADF ve SDF'nin mukayesesini daha net inceleyebilmek açısından sonuçlar toplu olarak tablolarda ve grafiklerde verilmiş, grafiklerde ortalama su kalitesi değerleri gösterilmiştir. Her dozaja ait sonuç tablolarında çıkış suyu ortalama bulanıklıkları ve parçacık sayıları hem pik değerlerini içerecek şekilde hem de pik değerleri ortalama hesabından atılarak verilmiş, standart sapmaları da birer sütun şeklinde tabloya ilâve edilmiştir.

Tablo 5.20. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
1	9.92	5	SDF: 30.12 ADF: 30.00	SDF: 7.79 ADF: 7.83	20
2	10.03	5	SDF: 40.09 ADF: 40.36	SDF: 10.41 ADF: 10.49	24
3	9.97	5	SDF: 48.19 ADF: 48.46	SDF: 12.52 ADF: 12.59	22
4	10.01	5	SDF: 56.11 ADF: 56.23	SDF: 14.58 ADF: 14.61	21
5	10.61	5	SDF: 67.65 ADF: 65.53	SDF: 17.58 ADF: 17.03	18

Deney 1'de kullanılan sentetik ham suyun filtrasyon süresince bulanıklık değişimi EK-F Şekil F.1'de, çıkış suyu bulanıklık değişimleri de hem SDF hem de ADF sistemi için karşılaştırmalı olarak Şekil 5.59'da verilmiştir. ADF sisteminde 4 filtre yer aldığı için, birbirini takip eden iki filtrenin geri yıkanması arasındaki süre 6 saattir. Böylece her bir filtre 24 saatte bir geri yıkanmış olmaktadır. SDF de 24 saatte bir geri yıkanmaktadır. Dolayısıyla ADF'nin her dördüncü bulanıklık pikinde SDF'de bir bulanıklık piki meydana gelmektedir. Bu pikler (ani sıçrayışlar) geri yıkamanın hemen sonrasında işletmeye alınan temiz filtrenin ham suyu hızlı bir şekilde filtre yatağından geçirerek çıkış suyuna katı maddelerin (bulanıklığa) kaçmasına sebep olmasıyla (karışmasıyla) meydana gelmektedir.



Şekil 5.59. Deney 1'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.92 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).

Çıkış suyu kalitesinin direkt olarak içme suyu ile (ağızdan) bulaşan virüs kaynaklı (virütik) kirlenme (hastalıklar) ile ilişkili olduğu ve bulanıklığın mümkün olduğu kadar düşürülmesi ve filtrasyon süresince de düşük tutulması (içme suyu standartlarına uygun halde) gerektiği bildirilmiştir [Hudson, 1956; Robeck, 1962].

Bu deneyde, SDF sistemi ile ADF sistemi hemen hemen aynı bulanıklıkta çıkış suyu üretmiş (Tablo 5.21), ancak geri yıkama sonrasında bulanıklık SDF sisteminde 1 NTU civarına yükselmiştir (Şekil 5.59) ADF sisteminde ise bu sıçrayışlar 0.4 NTU civarlarına erişmiştir.

Literatürde yer alan birçok direkt filtrasyon çalışmasında su kalitesinin birincil göstergesi olarak bulanıklık parametresi kullanılmıştır [Shea et al., 1971; Tanaka and Pirbazari, 1986; Ebie and Amano, 1993]. Ancak sadece bulanıklık sonuçlarına bakılarak *Giardia cysts* (10–12 µm) ve *Cryptosporidium oocysts* (4–6 µm) gibi

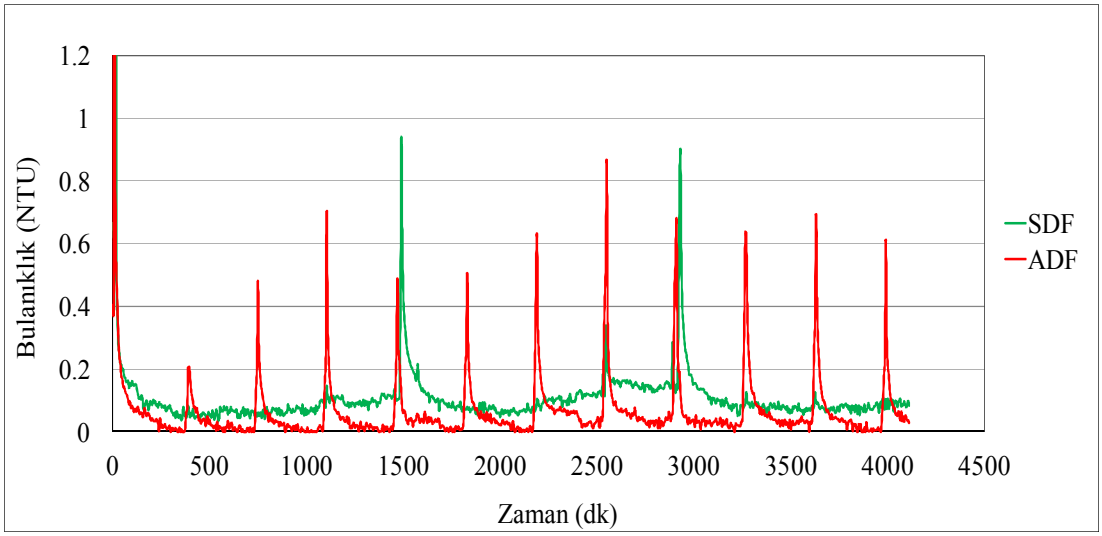
mikroorganizmaların de giderildiği garanti edilememektedir. Bu nedenle bulanıklığın yanında parçacık sayısı ve boyutu da dikkate alınmalıdır [Clark et al., 1992]. Yüzeysel suların arıtımında bulanıklığın 0.10 NTU'ya düşürülmesinin [US EPA, 2009] yanında *Giardia cysts* gideriminde 3 log (% 99.9), *Cryptosporidium oocysts* gideriminde de 2 log (% 99) değeri sağlanmalıdır [US EPA, 1997, Hatukai et al., 1997, US EPA, 1999]. Böylelikle, 2-5 μm boyutundaki parçacıkların (örneğin *Giardia cysts* veya *Cryptosporidium oocysts* boyutlarının) ölçülmesi/izlenmesi de, bahsedilen mikroorganizmaların giderilmesini temsil etmesi açısından önemlidir [OECD and WHO, 2003].

Bu çalışmada, iki farklı parçacık boyutu aralığında online ölçüm yapabilen bir parçacık sayıcı kullanılarak 2-5 μm aralığındaki ve 5 μm'den büyük parçacıkların filtrasyon boyunca çıkış suyundaki değişimleri takip edilmiştir. Deney 1 için bu ölçümler EK-F Şekil F.2 ve F.3'de sunulmuştur. Parçacık giderimlerinin % değerleri ise her bir dozaja ait deneylerin en sonunda verilmiştir. Bu çalışmanın birincil amacı filtre özelliklerini incelemek olduğundan, bulanıklık ve parçacık sayısı gideriminde belirlenen standartları yakalayabilmek için ilâve bir proses uygulanmamıştır. Öncelikle ADF ve SDF'nin eşit şartlarda işletilebilmesi temin edilmiştir. Bununla beraber, çıkış suyu bulanıklık değerinde çoğu zaman 0.10 NTU'nun altına inilmiş, parçacık sayısı gideriminde de standartlara oldukça yaklaşılmıştır.

Çalışmadaki en düşük alum dozajının ve filtrasyon hızının kullanıldığı Deney 1'de çıkış suyundaki toplam parçacık sayısı SDF sisteminde 50 adet/mL iken, ADF sisteminde ise 23 adet/mL olarak ölçülmüştür. Geri yıkama sonrası meydana gelen pik değerleri ise SDF'de 2000'e, ADF'de ise 900'a kadar yükselmiştir.

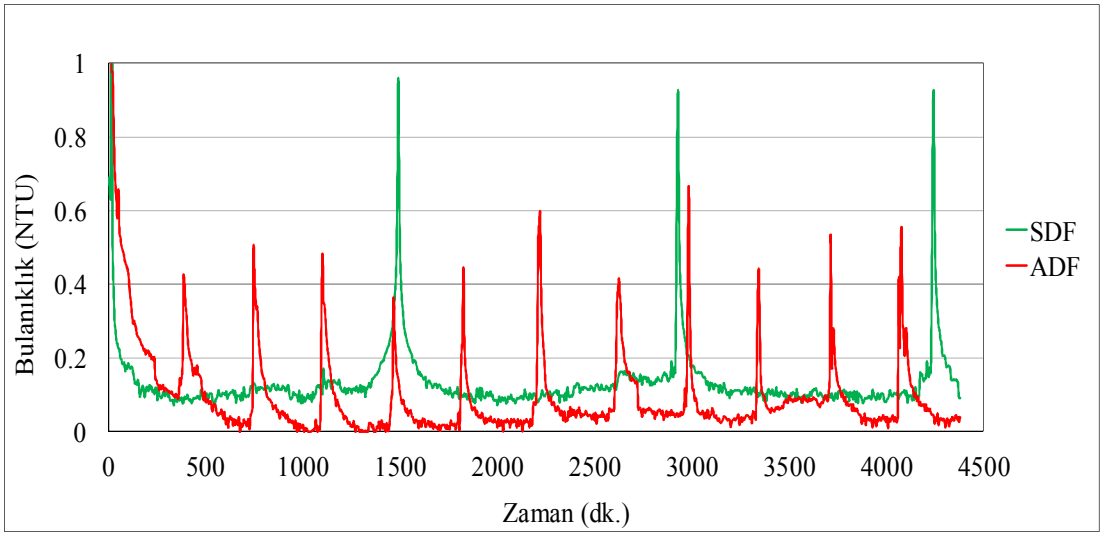
Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerin ikincisinde hız 10.5 m/sa'ya yükseltilmiştir. Sentetik ham suyun deney süresince bulanıklık değişimi EK-F Şekil F.4'de verilmiştir. Ham su bulanıklığının mümkün mertebe sabit ve 10 NTU civarında tutulabildiği şekilden görülmektedir. Deney 2 çıkış bulanıklık değişimi her

iki filtre sistemi için de Şekil 5.60'da gösterilmiştir. ADF'nin hem filtrasyon sırasında hem de geri yıkama sonrası pikleri dikkate alındığında SDF'den daha düşük bulanıklıkta çıkış suyu ürettiği görülmektedir. Her iki sistemde de 0.10 NTU değerinin altına inilmiş (Tablo 5.21), piklerde ise 1 NTU'ya varan artışlar elde edilmiştir. Deney 2'nin çıkış suyu parçacık sayısı değişimleri ise EK-F Şekil F.5 ve F.6'da gösterilmektedir. SDF ile çıkış suyunda ortalama 328 adet parçacık/mL elde edilirken, bu değer ADF'de 162 adet/mL olmuştur. Bu sonuçlara göre SDF'de parçacık giderme verimi % 99.85 iken, ADF'de ise % 99.93 olmuştur (Tablo 5.23).



Şekil 5.60. Deney 2'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).

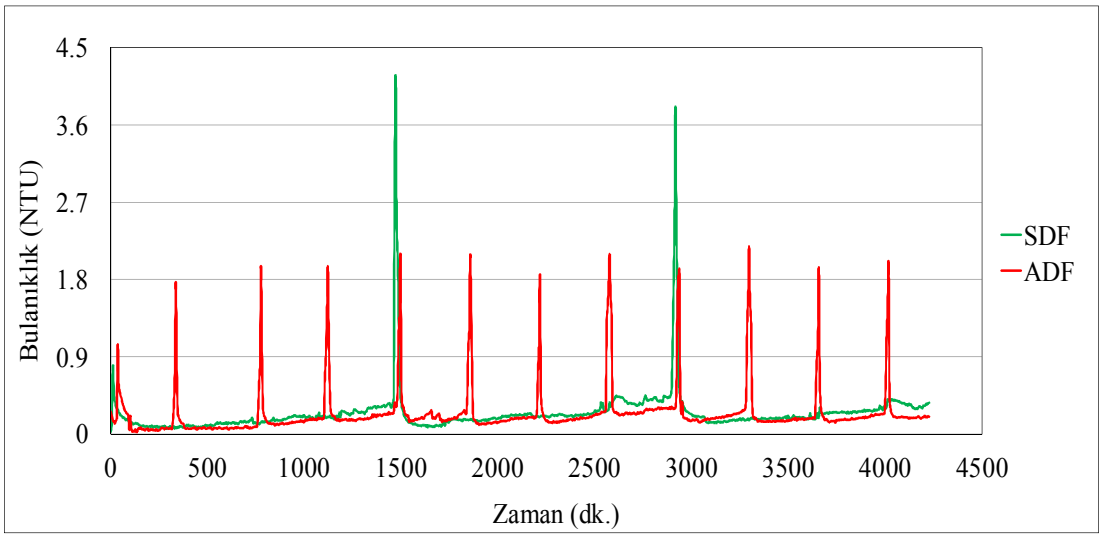
Ortalama filtrasyon hızının 12.5 m/sa'ya yükseltildiği üçüncü deneyin filtrasyon süresine karşı bulanıklık değişimi Şekil 5.61'de gösterilmiştir. ADF'nin 0.05 NTU ortalama çıkış suyu bulanıklığı ile SDF'den (0.11 NTU) daha iyi kalitede filtrat ürettiği görülmektedir (Tablo 5.21). Benzer durum, çıkış suyu parçacık sayısında da elde edilmiştir.



Şekil 5.61. Deney 3'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).

Filtratın kalitesindeki bozulmanın (filtre çıkış suyuna karışan madde miktarı), filtrasyon hızındaki artışın büyüklüğüne ve giriş suyu özelliklerine bağlı olduğu, hızdaki artışın süresine ise hemen hemen bağlı olmadığı bildirilmiştir [Cleasby et al., 1963; Rogers, 1963; Rogers, 1964; Tuepker, 1965; Robeck and Kreissl, 1967]. Tez çalışmamızda hem SDF, hem de ADF filtre sistemlerine aynı özellikte ham su sağlandığı için, çıkış suyu kalitesinde rol oynayan başlıca etkenin filtrasyon hızlarındaki artışların olduğu söylenebilir. ADF sisteminde bütün filtreler ve kanallar birer rezervuar gibi çalıştıklarından, filtrelerdeki su akış varyasyonları çok yavaş olmakta ve su seviyesinde anî değişiklikler meydana gelmemektedir [Arboleda, 1974]. Bu durum filtrasyon hızında da anî değişiklikler meydana gelmesini ve dolayısıyla çıkış suyu kalitesinin bozulmasını önlemektedir. Bu bakımdan ADF'nin SDF'ye göre daha avantajlı olduğu görülmektedir. Ancak, ADF'nin her zaman ya da genellikle/çoğunlukla SDF'den daha iyi kalitede su ürettiğini söyleyebilmek için farklı dozajlar ve farklı filtrasyon hızlarının kullanıldığı testler yapılmalıdır. Dolayısıyla 5mg/L alum dozajı deneylerinde 14.5 m/sa ve 17.5m/sa gibi iki farklı ortalama filtrasyon hızında daha deneyler yürütülmüştür.

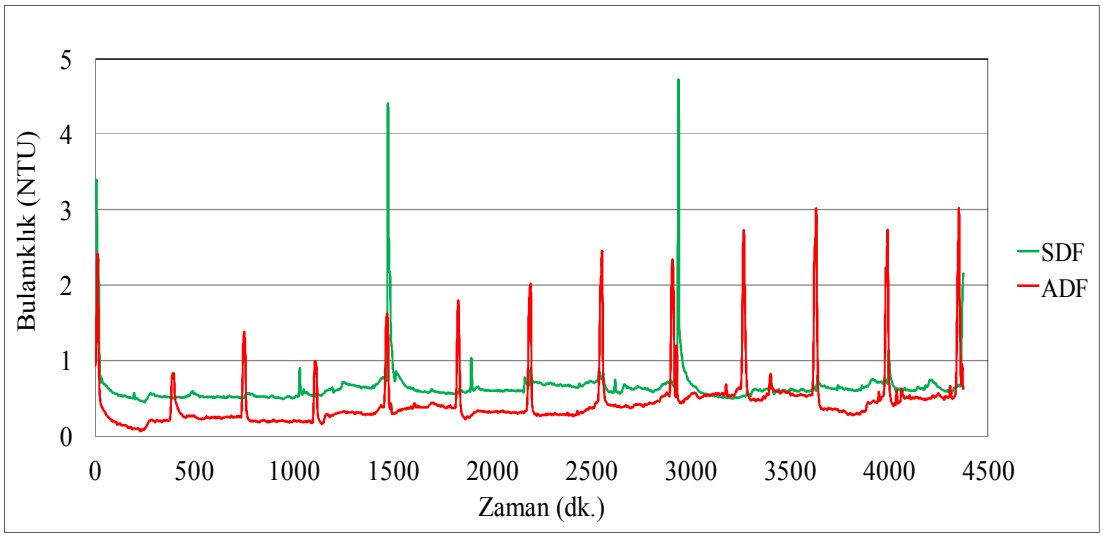
14.5 m/sa deneyine ait ham su bulanıklık değişimi EK-F Şekil F.10'da, filtrata ait bulanıklık değişiminin filtrasyon süresiyle ilişkisi ise Şekil 5.62'de sunulmuştur. Parçacık sayısının zamana bağlılığı ise EK-F Şekil F.11 ve F.12'de verilmiştir. Bulanıklık açısından SDF ve ADF benzer kalitede çıkış suyu üretirken, geri yıkama sonrası pikleri, ortalama filtrasyon hızının artmasına bağlı olarak SDF'de 4, ADF'de 2 NTU'ya kadar yükselmiştir.



Şekil 5.62. Deney 4'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.01 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).

Alum dozajının 5 mg/L olduğu beşinci ve son deneyde ortalama filtrasyon hızı 17.5 m/sa mertebesine yükseltilmiştir. Ham su bulanıklığının zamanla değişimi EK-F, Şekil F.13'de gösterilmiştir. Çıkış suyu bulanıklığı ise Şekil 5.63'de sunulmuştur. Hızın artması, çıkış suyu bulanıklığı ve geri yıkama sonrası piklerinin büyüklüğünü de artırmıştır. SDF'de 0.61 NTU ortalama çıkış suyu bulanıklığı elde edilirken, geri yıkamadan sonra temiz olarak işletmeye alınan filtrenin çıkış suyunda bulanıklık 5

NTU'lara kadar yükselmiştir. ADF sisteminde ise bu değerler sırasıyla 0.36 NTU ve yaklaşık 3 NTU olmuştur.

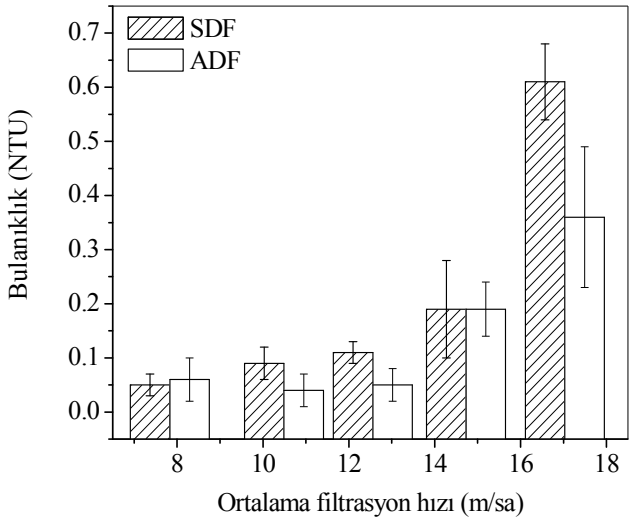


Şekil 5.63. Deney 5'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.67 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).

Deney 5'e ait çıkış suyu parçacık değişimleri ise Şekil F.14 ve F.15'de grafiğe geçirilmiştir. Geri yıkama sonrası pikleri dışında parçacık sayısı yönünden SDF ve ADF'nin birbirine oldukça yakın kalitede çıkış suyu ürettikleri söylenebilir. Yine hızın artmasına bağlı olarak geri yıkama pikleri önceki deneylerden çok daha yüksek olarak meydana gelmiştir. Buraya kadar verilen sonuçlarda her bir deneyde SDF ve ADF'nin kendi su kalitesi bakımından karşılaştırılmaları sunulmuştur. ADF ve SDF filtre sistemlerinin 5 mg/L sabit alum dozajı altında hızın değişmesine bağlı olarak ürettikleri çıkış suyu bulanıklığının ortalama filtrasyon hızına bağlı değişimi ise Şekil 5.64'de gösterilmektedir. Her iki sistemde de çıkış suyu ortalama bulanıklığının filtrasyon hızının artmasıyla arttığı görülmektedir ve çoğunlukla ADF sistemi, SD filtresinden daha düşük bulanıklıkta filtrat üretmiştir.

Tablo 5.21. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.

Deney No.	Filtre	Ort. Bulanıklık (NTU)	STD	Ort. Bulanıklık (ripening ve pikler hariç) (NTU)	STD
1	SDF:	0.07	0.16	0.05	0.02
	ADF:	0.1	0.34	0.06	0.04
2	SDF:	0.11	0.12	0.09	0.03
	ADF:	0.07	0.30	0.04	0.03
3	SDF:	0.14	0.12	0.11	0.02
	ADF:	0.10	0.18	0.05	0.03
4	SDF:	0.22	0.19	0.19	0.09
	ADF:	0.29	0.23	0.19	0.05
5	SDF:	0.64	0.27	0.61	0.07
	ADF:	0.44	0.36	0.36	0.13



Şekil 5.64. Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama bulanıklığına etkisi (alum dozajı: 5 mg/L, ham su bulanıklığı: ~ 10 NTU)

Tablo 5.22'de çıkış suyu ortalama bulanıklıkları hem pik değerlerini içerecek şekilde hem de pik değerleri ortalama hesabından atılarak verilmiş, standart sapmaları da birer sütun şeklinde ilâve edilmiştir. Tablo 5.23'de de parçacık sayıları, SDF ve ADF sistemlerinde % parçacık giderimi cinsinden aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanarak sunulmuştur:

$$\%\ \text{Giderim} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \qquad (5.9)$$

Burada C_0, ham su ortalama parçacık sayısını ve C filtratın ortalama parçacık sayısını temsil etmektedir.

Tablo 5.22. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.

Filtre sistemi	Ort. Filtrasyon hızı (m/sa)	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı (adet/mL)*	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı† (adet/mL)*	Geri yıkama sonrası piklerinin ortalaması (adet/mL)*
SDF:	7.79	67	50	750
ADF:	7.83	38	23	250
SDF:	10.41	390	328	2600
ADF:	10.49	244	162	1500
SDF:	12.49	92	80	700
ADF:	12.56	58	44	250
SDF:	14.57	1349	1255	7000
ADF:	14.63	434	321	2000
SDF:	17.58	1343	1280	8000
ADF:	17.03	1648	1472	4000

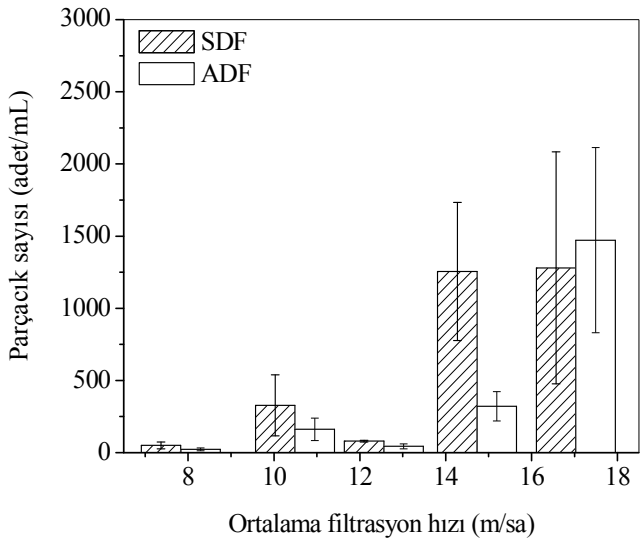
†(Başlangıç (ripening) periyodundaki ve geri yıkama sonrasındaki pik değerleri çıkarıldıktan sonra ortalama alınmıştır.)

* (Parçacık sayıları, 2-5 µm aralığındaki parçacıklar ile 5 µm'den büyük parçacıkların sayılarının toplamı olarak verilmiştir.

Tablo 5.23. Alum dozajının 5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları üzerinden hesaplanan parçacık giderim verimleri.

Deney No.	Ortalama filtrasyon hızı (m/sa)	Parçacık giderimi (%)	
		SDF	ADF
1	7.8	99.85	99.93
2	10.5	98.99	99.50
3	12.5	99.75	99.86
4	14.6	96.20	99.03
5	17.3	96.05	95.46

Sabit alum dozajında, filtrasyon hızının çıkış suyu parçacık sayısına etkisi Şekil 5.65'de gösterilmektedir. Hızın artmasıyla çıkış suyu parçacık sayısı ortalamalarının her iki filtre sistemi için de genellikle arttığı söylenebilir.



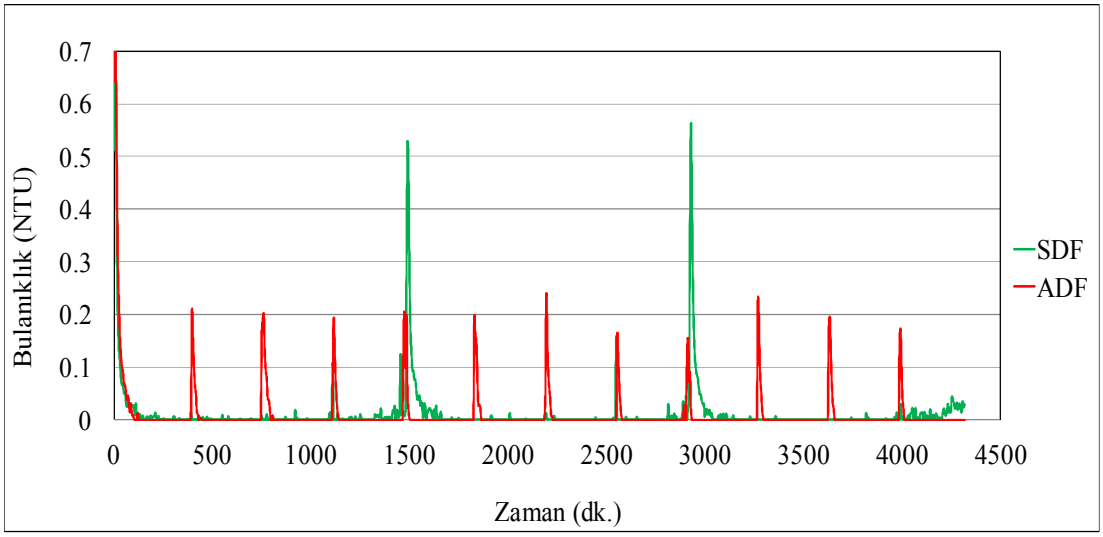
Şekil 5.65. Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi (alum dozajı: 5 mg/L, ham su parçacık sayısı: ~ ((2-5 µm) + (>5 µm): 33,000 adet/mL).

5.2.1.2. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneyler

Bu tez kapsamındaki bütün deneyler –materyal ve metot kısmında da belirtildiği gibi- direkt filtrasyon kullanılarak yürütülmüştür. Direkt filtrasyon performansının yumaklaştırıcı kullanımından oldukça hassas bir şekilde etkilendiği bilinmektedir. Yumaklaştırma prosesi optimize edilmezse (ya da tamamen terk edilirse) bulanıklık ve mikrobiyolojik kirleticilerin giderilme verimlerinin hızlı bir şekilde düştüğü bildirilmiştir [US EPA, 1998]. Uygun bir yumaklaştırıcı türünün uygun bir dozajda kullanılarak optimize edilmesi, güvenilir bir su arıtımı için çok önemlidir. Tam ölçekli filtrasyon tesislerinde, tesise giriş yapan yüzeysel suyun özellikleri arıtım süresince değişiklik gösterebilmektedir. Bu nedenle yumaklaştırıcı ve yumaklaştırıcı yardımcısının dozajı bu değişimlere göre ayarlanmalıdır [US EPA, 2001]. Literatürdeki direkt filtrasyon ile ilgili pek çok çalışmada da maksimum bulanıklık/parçacık giderimi ile minimum yük kaybı oluşumunu sağlamak amacıyla farklı türlerde/dozajlarda yumaklaştırıcılar kullanılmıştır [Cams and Parker, 1975; Yeh and Ghosh, 1981; McCormick and King, 1982; Nieminski and Ongerth, 1995; Eyvaz et al., 2010]. Bu nedenle bu çalışmada 5 mg/L deneyleri tamamlandıktan sonra aynı hızlarda 7.5 mg/L alum dozajı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney 6-9'da 7.5 mg/L alum dozajı kullanılmış, dört farklı hız denenmiş, deney şartları Tablo 5.24'de verilmiştir. Buna göre, en düşük filtrasyon hızı Deney 6'da kullanılmış, SDF ve ADF proseslerinin çıkış suyu bulanıklıkları Şekil 5.66'da sunulmuştur.

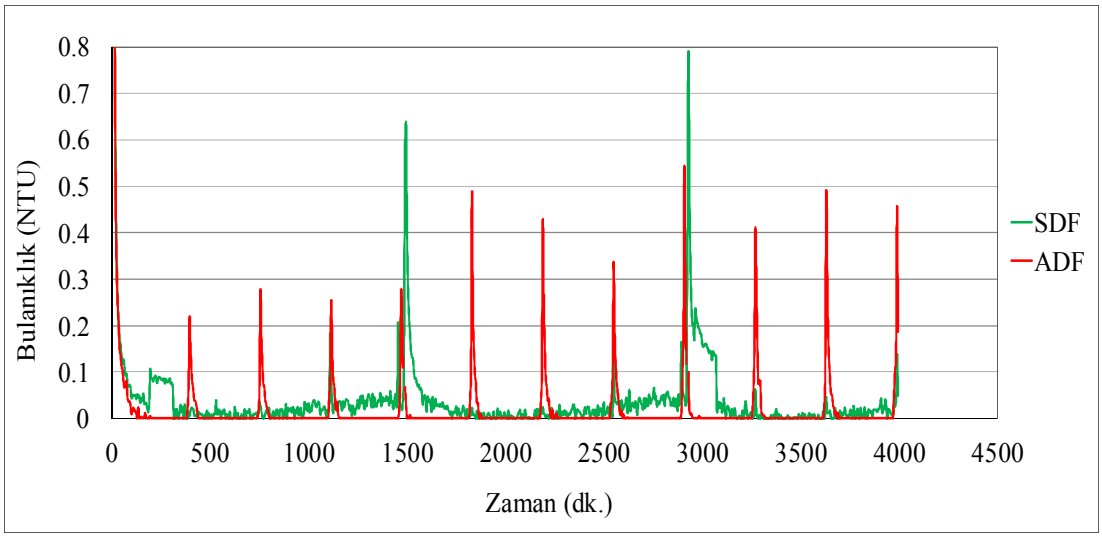
Tablo 5.24. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/l)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
6	9.99	7.5	SDF: 30.00 ADF: 30.57	SDF: 7.79 ADF: 7.94	17
7	10.02	7.5	SDF: 40.18 ADF: 40.64	SDF: 10.44 ADF: 10.56	17
8	9.93	7.5	SDF: 56.16 ADF: 56.20	SDF: 14.59 ADF: 14.60	21
9	9.97	7.5	SDF: 67.51 ADF: 68.00	SDF: 17.54 ADF: 17.67	17



Şekil 5.66. Deney 6'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.99 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).

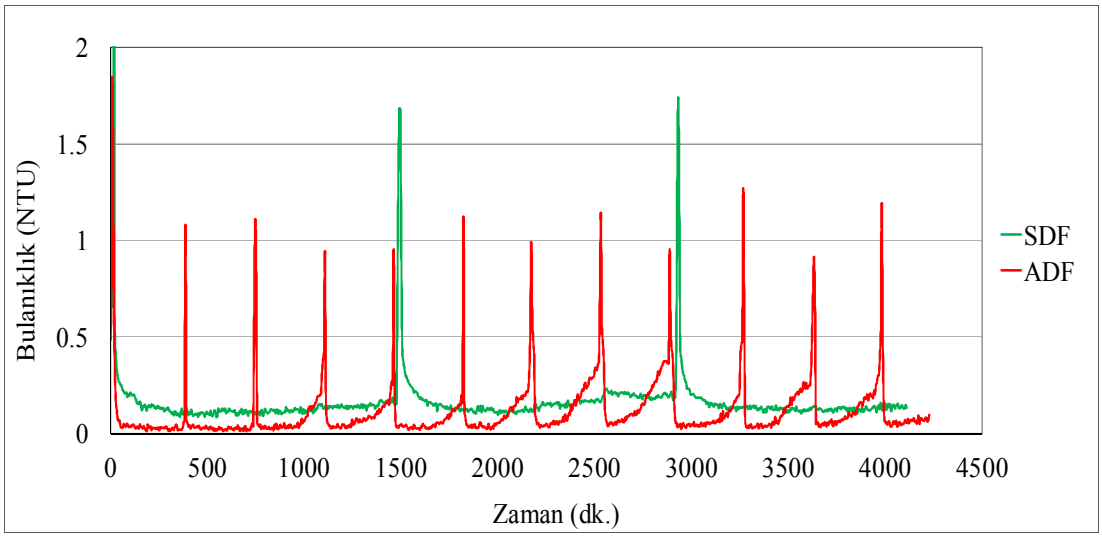
Şekil 5.66'ya göre SDF ve ADF sistemleri benzer çıkış suyu bulanıklıkları (sırasıyla 0.003 ve 0.001 NTU) meydana getirmiş, SDF için 0.6 NTU, ADF için ise 0.2 NTU civarında geri yıkama sonrası piki meydana gelmiştir. Ortalama filtrasyon hızının 10.5 m/sa'ya yükseltilmesiyle çıkış suyu bulanıklıklarının zamana karşı değişimi Şekil 5.67'de gösterilmektedir. SDF'de 0.02 NTU, ADF'de ise 0.001 NTU çıkış suyu ortalama bulanıklığı ölçülürken, geri yıkama pikleri ise bir önceki deneye göre artmış, SDF için 0.7 ve ADF için 0.5 NTU değerlerine yükselmiştir.



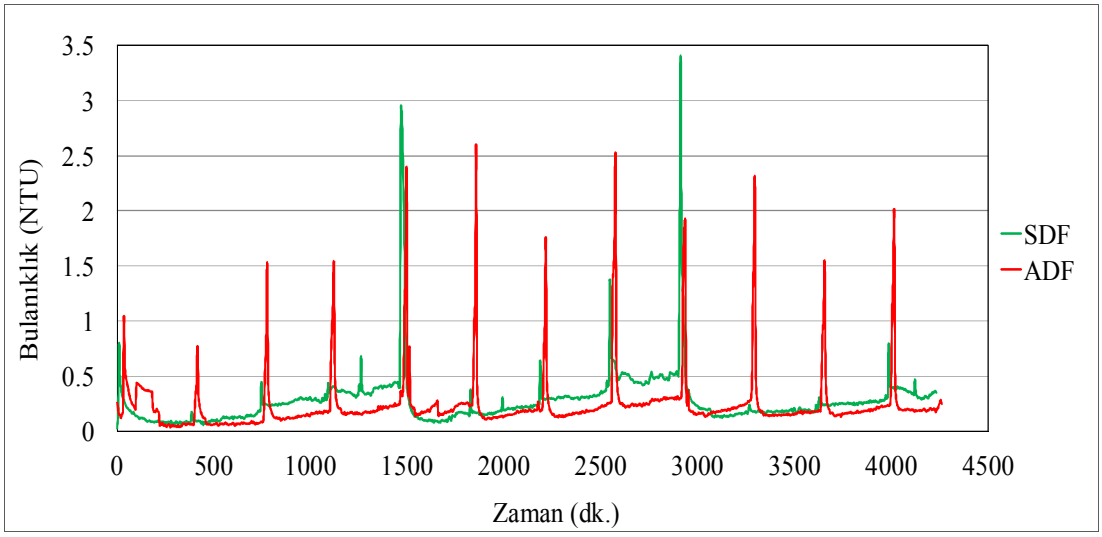
Şekil 5.67. Deney 7'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.02 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).

Filtrasyon hızı arttıkça bir filtrenin sudaki katıları (bulanıklığı, mikroorganizmaları vb.) tutma veriminin azaldığı, bundan dolayı da temiz bir filtrenin (ADF'de en temiz filtre, en hızlı çalışan filtredir) çıkış suyu kalitesinin başlangıçta kötü olabileceği bildirilmiştir. [Cleasby, 1981; Cleasby, 1993; Akgiray ve Saatçı, 1996]. Şekil 5.68'den (Deney 8) görülebileceği gibi, SD filtresinde ortalama filtrat bulanıklığı 0.05 NTU ve geri yıkama pikleri de 1.75 NTU civarına yükselmiştir. Ortalama filtrasyon hızının 17.6 m/sa'ya çıkarılmasıyla (Deney 9) bu değerler sırasıyla 0.25 ve 3.5 NTU olmuştur (Şekil 5.69). ADF'de Deney 8'de 0.03

NTU bulanıklığında, Deney 9'da ise 0.17 NTU bulanıklığında filtrat elde edilmiştir. ADF'deki çıkış suyu kalitesinin daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 5.68. Deney 8'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.93 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



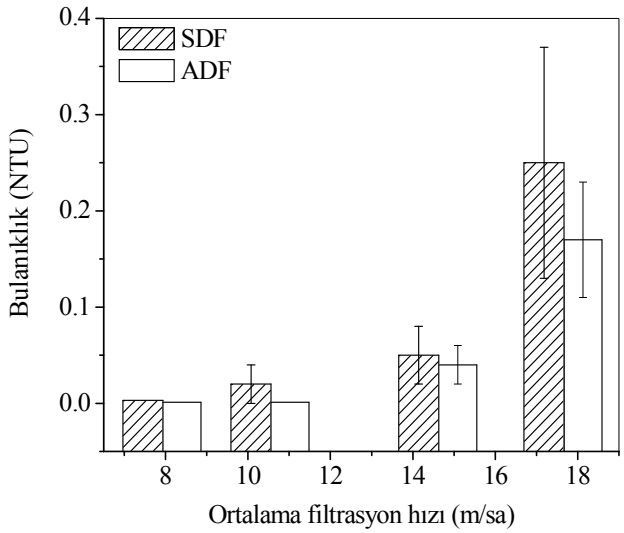
Şekil 5.69. Deney 9'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.6 m/sa).

Gregory ve Yadav (Gregory and Yadav, 1979) pilot ve tam ölçekli çalışmalarında iki farklı yüzeysel suya filtrasyondan önce yumaklaştırma ve çöktürme uygulamış, ADF'de herhangi bir kısıtlayıcı kullanılmamasına rağmen (maksimum hız, ortalama hızın beş katına kadar yükselmiştir) SDF'den daha iyi kalitede çıkış suyu elde edilmiştir. Bir başka çalışmada ise kireç yumuşatması uygulanan bir yer altı suyu, direkt filtrasyon modunda ve 3 farklı hızda paralel olarak işletilen bir adet SD filtresi ile dört filtreli bir ADF sistemi ile arıtılmıştır. ADF sistemi ile daha düşük çıkış suyu bulanıklığı elde edilmiştir [Di Bernardo and Cleasby, 1980]. Bu çalışmadaki 7.5 mg/L deneylerinin çıkış suyu ortalama bulanıklığına ait toplu sonuçları Tablo 5.25'de, bulanıklığın hıza göre değişimi Şekil 5.70'de, çıkış suyu ortalama parçacık sayısına ait toplu sonuçlar Tablo 5.26'da, parçacık giderme verimleri Tablo 5.27'de ve parçacık sayısının hıza göre değişimi de her iki filtre sistemi için Şekil 5.71'de verilmiştir. Şekillerden ADF'nin daha iyi kalitede çıkış suyu ürettiği görülmektedir. Bütün hidrolik özellikleri ve işletme şartları aynı olan bu iki sistemden ADF'nin avantajlı olmasının başlıca sebebinin de filtre hızlarındaki herhangi bir değişikliğin düzgün ve kademeli olarak meydana

gelmesi sebebiyle çıkış suyu kalitesine olumsuz etki etmemesi olduğu söylenebilir [Cleasby, 1969].

Tablo 5.25. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.

Deney No.	Filtre	Ort. Bulanıklık (NTU)	STD	Ort. Bulanıklık (ripening ve pikler hariç) (NTU)	STD
6	SDF:	0.03	0.41	0.003	0.001
	ADF:	0.01	0.06	0.001	0.001
7	SDF:	0.04	0.09	0.02	0.02
	ADF:	0.03	0.12	0.001	0.001
8	SDF:	0.13	0.2	0.05	0.03
	ADF:	0.16	0.3	0.03	0.02
9	SDF:	0.28	0.26	0.25	0.12
	ADF:	0.24	0.27	0.17	0.06



Şekil 5.70. Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama bulanıklığına etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L, ham su bulanıklığı: ~ 10 NTU)

Tablo 5.26. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.

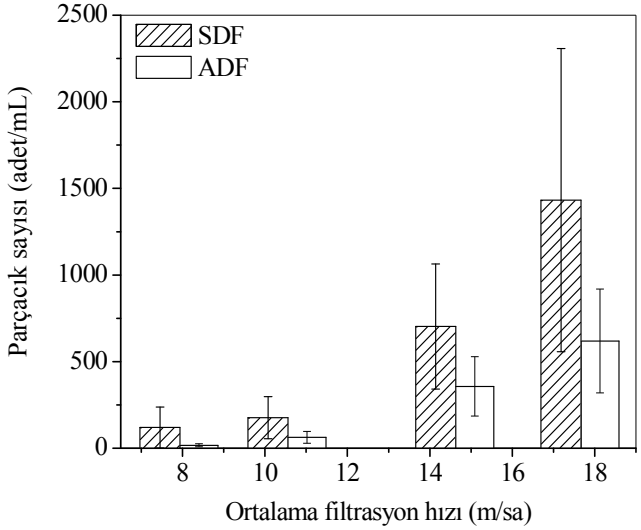
Filtre sistemi	Ort. Filtrasyon hızı (m/sa)	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı (adet/mL)*	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı† (adet/mL)*	Geri yıkama sonrası piklerinin ortalaması (adet/mL)*
SDF:	7.79	134	120	1100
ADF:	7.94	23	17	300
SDF:	10.44	187	176	1350
ADF:	10.56	98	63	650
SDF:	14.54	785	703	4000
ADF:	14.63	444	357	1800
SDF:	17.54	1491	1432	6000
ADF:	17.67	760	619	3000

†(Başlangıç (ripening) periyodundaki ve geri yıkama sonrasındaki pik değerleri çıkarıldıktan sonra ortalama alınmıştır.)

* (Parçacık sayıları, 2-5 µm aralığındaki parçacıklar ile 5 µm'den büyük parçacıkların sayılarının toplamı olarak verilmiştir.

Tablo 5.27. Alum dozajının 7.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları üzerinden hesaplanan parçacık giderim verimleri.

Deney No.	Ortalama filtrasyon hızı (m/sa)	Parçacık giderimi (%)	
		SDF	ADF
6	7.8	99.63	99.95
7	10.5	99.46	99.81
8	14.6	97.87	98.92
9	17.6	95.59	98.09



Şekil 5.71. Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L, ham su parçacık sayısı: ~ ((2-5 μm) + (>5 μm): 33,000 adet/mL).

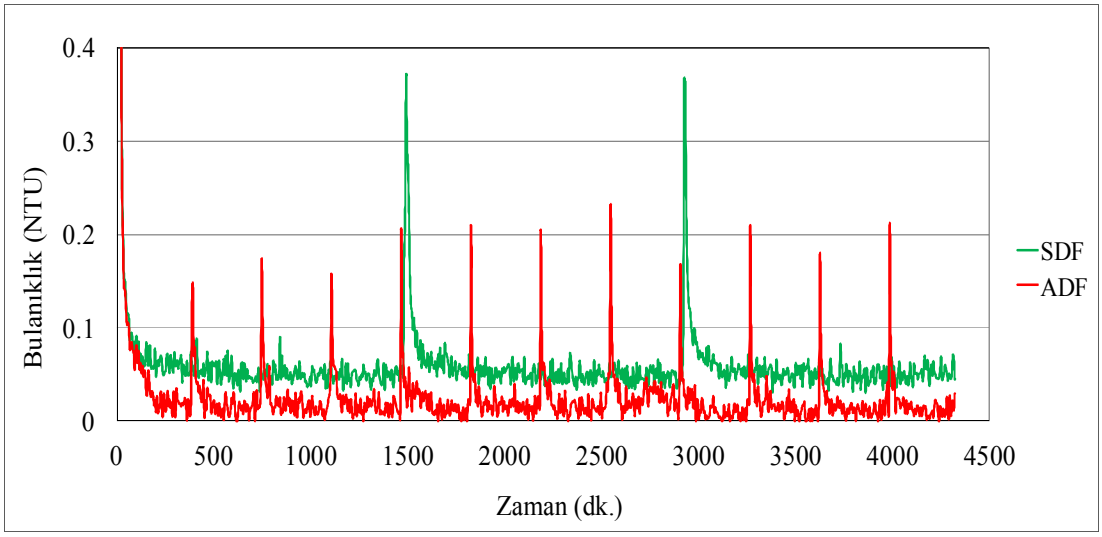
5.2.1.3. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneyler

Yukarıda belirtildiği üzere, literatürde ADF'nin SDF'ye oranla daha iyi kalitede su ürettiği çalışmalar (Gregory and Yadav, 1979; Di Bernardo and Cleasby, 1980 gibi) olduğu gibi, ADF ile SDF arasında (filtrasyon süreleri ve yük kayıpları bakımından farklılıklar olmasına rağmen) benzer işletme koşullarında su kalitesi açısından farklılığın tespit edilmediği çalışmalar da (Hudson, 1959; Hilmoe and Cleasby, 1986) mevcuttur. Ancak bütün bu çalışmaların ortak özelliği, tek bir yumaklaştırıcı dozajı ya da tek bir ortalama filtrasyon hızında çalışılmasıdır. Çıkış suyunda yapılan sürekli ölçümler 30 ya da 60 dakikada bir geçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında ise SDF ile ADF arasında sonuçları daha genel geçer bir su kalitesi mukayesesi yapabilmek için, farklı dozaj ve farklı hızların aynı anda kullanıldığı bir deney matrisi oluşturulmuş ve hızlar ile dozajlar seçilirken yüzeysel suların arıtıldığı filtrasyon tesislerinde uygulanan ve neredeyse standart halini alan hızlar ve dozajlar seçilmiştir. Çıkış suyunda yapılan ölçümlerin aralıkları (ölçüm sayısı) bulanıklık için 5, parçacık sayısı için 1 dakikaya kadar indirilmiştir. Alum dozajının 10 mg/L olarak uygulandığı ve beş farklı ortalama filtrasyon hızının seçildiği deney setinin koşulları Tablo 5.28'de sunulmuştur. Setin ilk deneyine ait (Deney 10) giriş suyu bulanıklığının ve çıkış suyu parçacık sayılarının filtrasyon süresince değişimleri EK-F Şekil F.28, F.29 ve F.30'da gösterilmektedir.

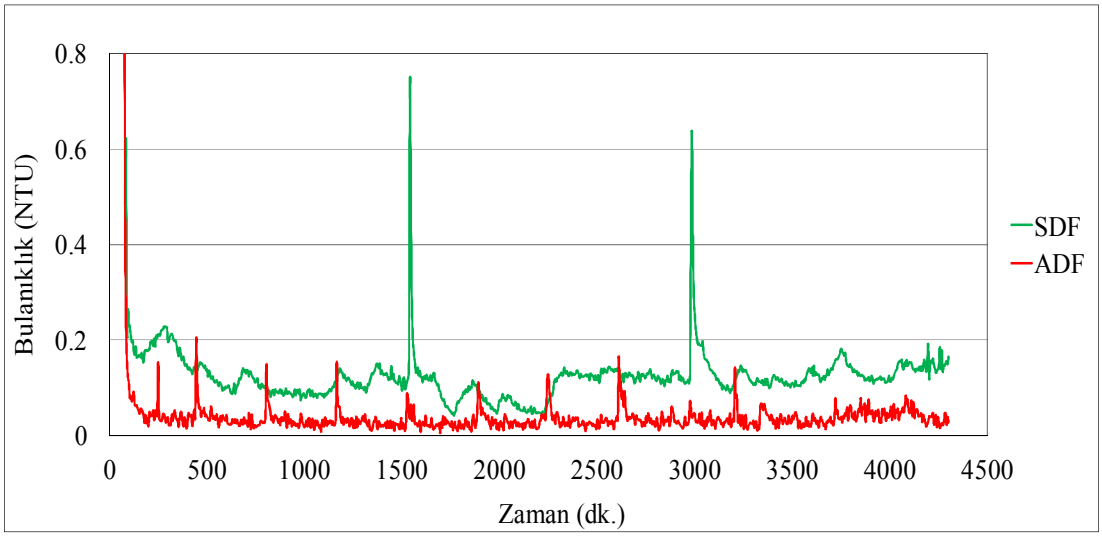
Tablo 5.28. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/l)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
10	10.03	10	SDF: 30.08 ADF: 30.50	SDF: 7.81 ADF: 7.93	23
11	9.85	10	SDF: 39.93 ADF: 40.94	SDF: 10.37 ADF: 10.64	21
12	10.0	10	SDF: 48.23 ADF: 48.65	SDF: 12.53 ADF: 12.64	21
13	9.95	10	SDF: 55.96 ADF: 56.53	SDF: 14.54 ADF: 14.69	23
14	9.46	10	SDF: 68.74 ADF: 65.73	SDF: 17.86 ADF: 17.08	19

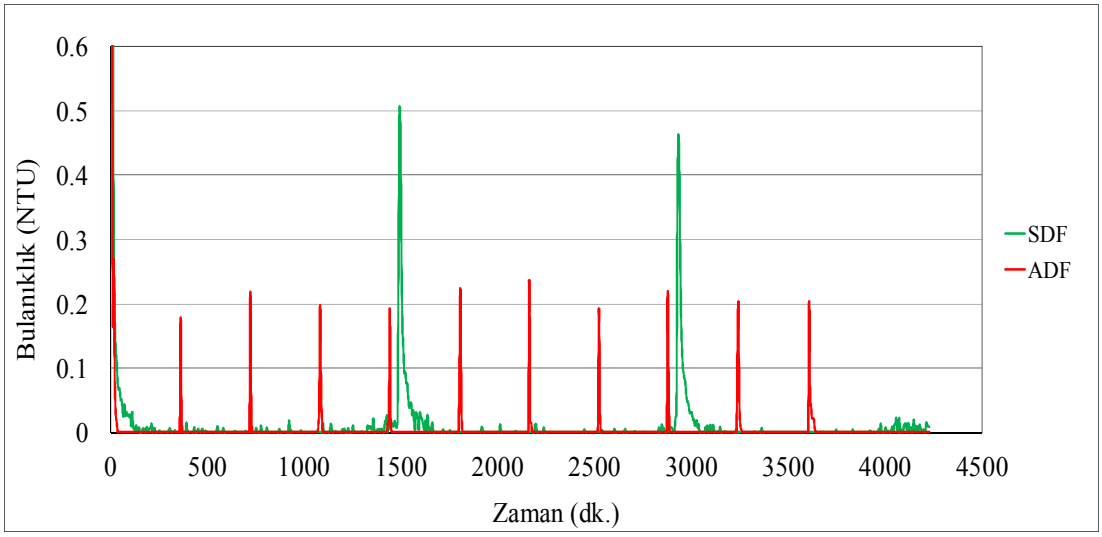
Filtrasyon hızının ortalama 7.9 m/sa olduğu deneyin çıkış suyu ortalama bulanıklığı Şekil 5.72'de gösterilirken; 10.5 m/sa deneyinin Şekil 5.73'de, 12.5 m/sa deneyinin Şekil 5.74'de, 14.6 m/sa deneyinin Şekil 5.75'de ve 17.4 m/sa deneyininki ise Şekil 5.76'da sunulmaktadır. Şekillerden görülebileceği gibi, her iki filtre sistemi ile çıkış suyu bulanıklığında 0.1 NTU içme suyu bulanıklık standardının (US EPA, 2009) altına inilmiş (ayrıca Tablo 5.29 ve Şekil 5.77), ADF ile daha iyi kalitede filtrat elde edilmiştir.



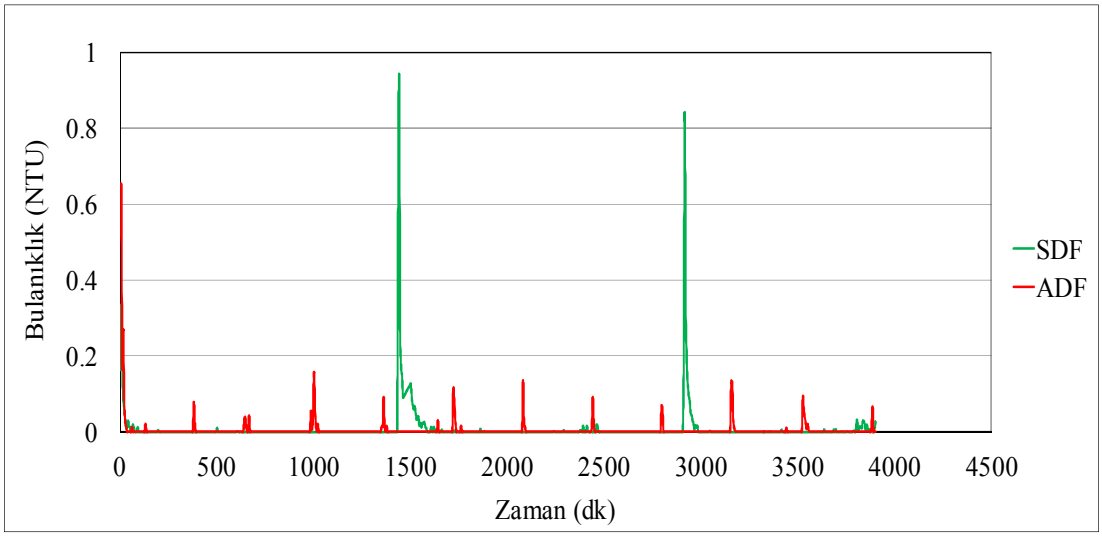
Şekil 5.72. Deney 10'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa).



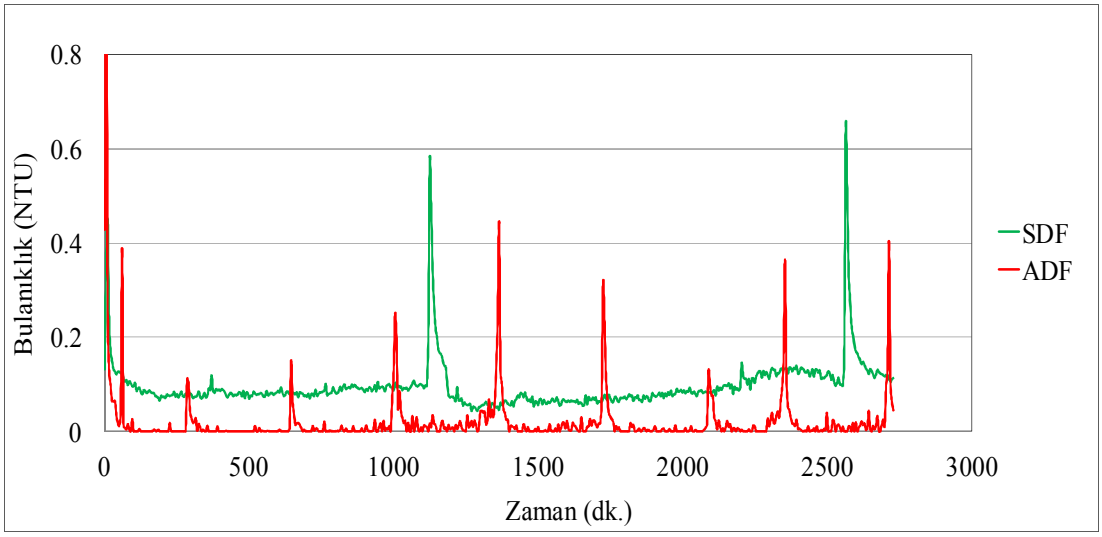
Şekil 5.73. Deney 11'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.85 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



Şekil 5.74. Deney 12'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 10 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



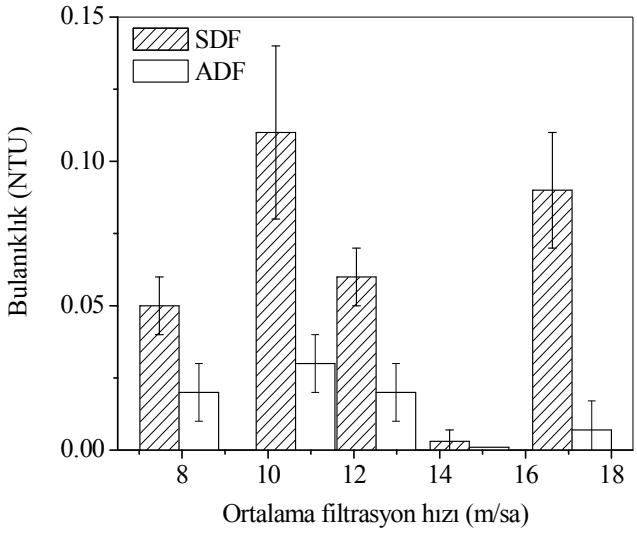
Şekil 5.75. Deney 13'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.95 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



Şekil 5.76. Deney 14'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.46 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.4 m/sa).

Tablo 5.29. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.

Deney No.	Filtre	Ort. Bulanıklık (NTU)	STD	Ort. Bulanıklık (ripening ve pikler hariç) (NTU)	STD
10	SDF:	0.06	0.09	0.05	0.01
	ADF:	0.03	0.1	0.02	0.01
11	SDF:	0.15	0.22	0.11	0.03
	ADF:	0.07	0.26	0.03	0.01
12	SDF:	0.03	0.07	0.005	0.001
	ADF:	0.01	0.05	0.001	0.001
13	SDF:	0.01	0.06	0.003	0.004
	ADF:	0.01	0.04	0.001	0.001
14	SDF:	0.1	0.06	0.09	0.02
	ADF:	0.02	0.07	0.007	0.01



Şekil 5.77. Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama bulanıklığına etkisi (alum dozajı: 10 mg/L, ham su bulanıklığı: ~ 10 NTU)

10 mg/L deneylerine ait çıkış suyu parçacık sayısı ortalamaları Tablo 5.30'da, parçacık giderme verimleri Tablo 5.31'de ve parçacık sayısına ortalama filtrasyon hızının etkisi de SDF ve ADF sistemleri için Şekil 5.78'de sunulmuştur. Bütün ortalama hızlarda ADF, filtrat kalitesi bakımından daha avantajlı bulunmuştur. Bu durum, ADF sistemlerinde filtrasyon süresince filtre hızının gittikçe azalmasından ötürü filtre kirlendikçe çıkış suyu kalitesinin bozulmamasıyla izah edilebilir [Akgiray ve Saatçı, 1996].

Tablo 5.30. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.

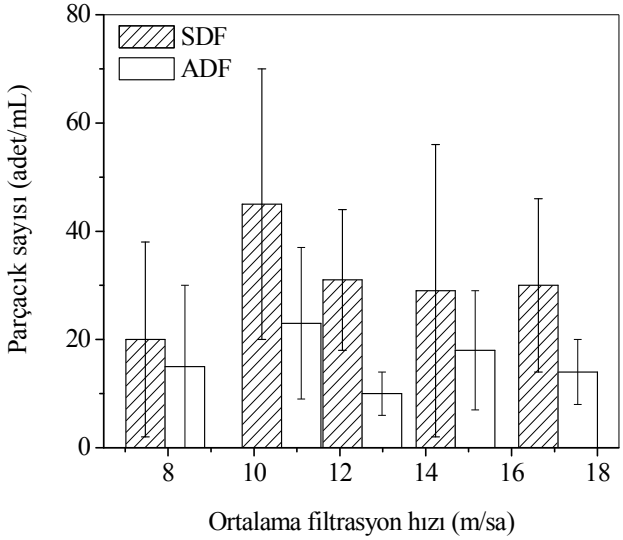
Filtre sistemi	Ort. Filtrasyon hızı (m/sa)	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı (adet/mL)*	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı† (adet/mL)*	Geri yıkama sonrası piklerinin ortalaması (adet/mL)*
SDF:	7.81	30	20	1600
ADF:	7.93	20	15	400
SDF:	10.37	66	45	900
ADF:	10.64	34	23	125
SDF:	12.48	43	31	700
ADF:	12.52	14	10	100
SDF:	14.54	41	29	2500
ADF:	14.69	28	18	250
SDF:	17.86	41	30	1000
ADF:	17.08	35	14	300

†(Başlangıç (ripening) periyodundaki ve geri yıkama sonrasındaki pik değerleri çıkarıldıktan sonra ortalama alınmıştır.)

* (Parçacık sayıları, 2-5 µm aralığındaki parçacıklar ile 5 µm'den büyük parçacıkların sayılarının toplamı olarak verilmiştir.

Tablo 5.31. Alum dozajının 10 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları üzerinden hesaplanan parçacık giderim verimleri.

Deney No.	Ortalama filtrasyon hızı (m/sa)	Parçacık giderimi (%)	
		SDF	ADF
10	7.9	99.94	99.95
11	10.5	99.86	99.93
12	12.5	99.91	99.97
13	14.6	99.91	99.94
14	17.4	99.91	99.96



Şekil 5.78. Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi (alum dozajı: 10 mg/L, ham su parçacık sayısı: ~ ((2-5 μm) + (>5 μm): 33,000 adet/mL).

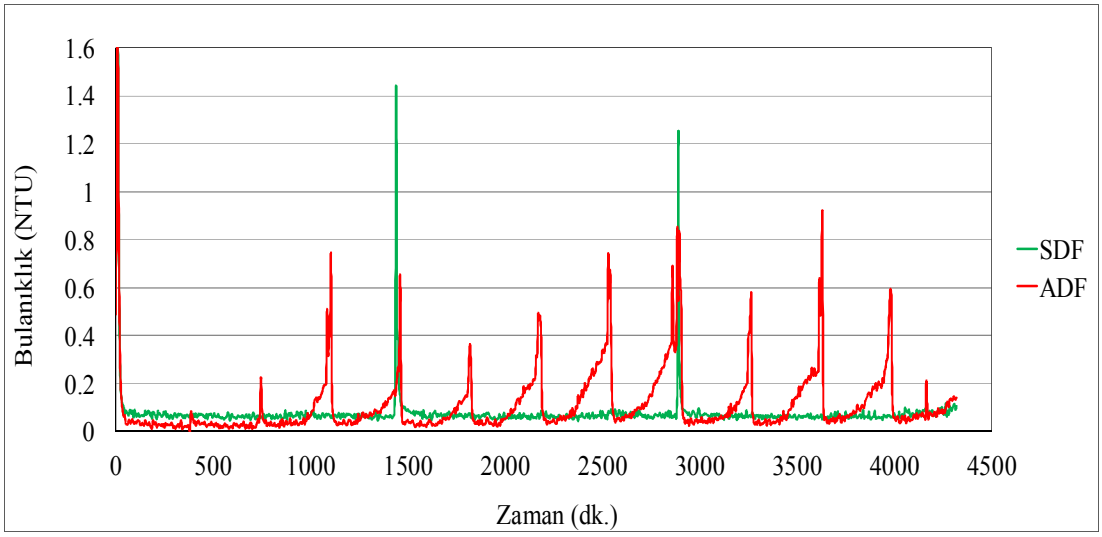
5.2.1.4. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneyler

Deneylerdeki en yüksek alum dozajı olan 12.5 mg/L'de dört farklı ortalama filtrasyon hızında çalışılmış ve deney şartları da Tablo 5.32'de sunulmuştur. Tablodan görülebileceği gibi SDF ve ADF sistemlerine sağlanan ham su debileri ve ortalama filtrasyon hızları doğru bir karşılaştırma yapılabilmesi açısından mümkün mertebe birbirine yakın tutulmaya çalışılmıştır. Buraya kadar bahsedilen bütün deneylerde hem SDF'de hem de ADF'de her bir filtre 24 saatte bir geri yıkanmıştır. Ancak son üç 12.5 mg/L deneyinde SDF 24 saatten önce tıkanmış (filtre kolonundaki su seviyesi kolonun maksimum yüksekliğine ulaşmıştır) ve 16 ile 17. deneylerde SD filtresi 18 saat işletilebilmiştir. Diğer bir deyişle, her bir AD filtresi 24 saatte bir geri yıkanırken, SD filtresi 18 saatte bir geri yıkanmıştır. Bu durum, aynı ortalama filtre hızlarında AD filtrelerinde daha az yük kaybı meydana geldiğini ve ADF'nin daha uzun süre işletilebildiğini göstermektedir. Benzer şekilde, deney matrisindeki en yüksek dozaj ve en yüksek hızın kullanıldığı 18. deneyde SD filtresi maksimum yük kaybına ulaşılmasından dolayı ancak 12 saat işletilebilmiş, SDF ile birlikte ADF de sonlandırılmıştır. Son deneyde bütün AD filtreleri en az bir kere geri yıkanamadığından, tipik bir ADF periyodu tamamlanmamış, SDF ile gerçek bir karşılaştırma yapmak mümkün olmamıştır. Buna rağmen 12 saatlik filtrasyonda alınan ölçümler yine burada verilmiştir (Şekil 5.82). 12.5 mg/L deneylerine ait çıkış suyu ortalama bulanıklık değerleri Tablo 5.33'de, çıkış suyu bulanıklığının zamana göre değişimi Şekil 5.83'de, çıkış suyu ortalama parçacık sayısı değerleri ve % giderme verimleri sırasıyla Tablo 5.34 ve 5.35'de ve yine ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi SDF ve ADF için mukayeseli olarak Şekil 5.84'de verilmiştir.

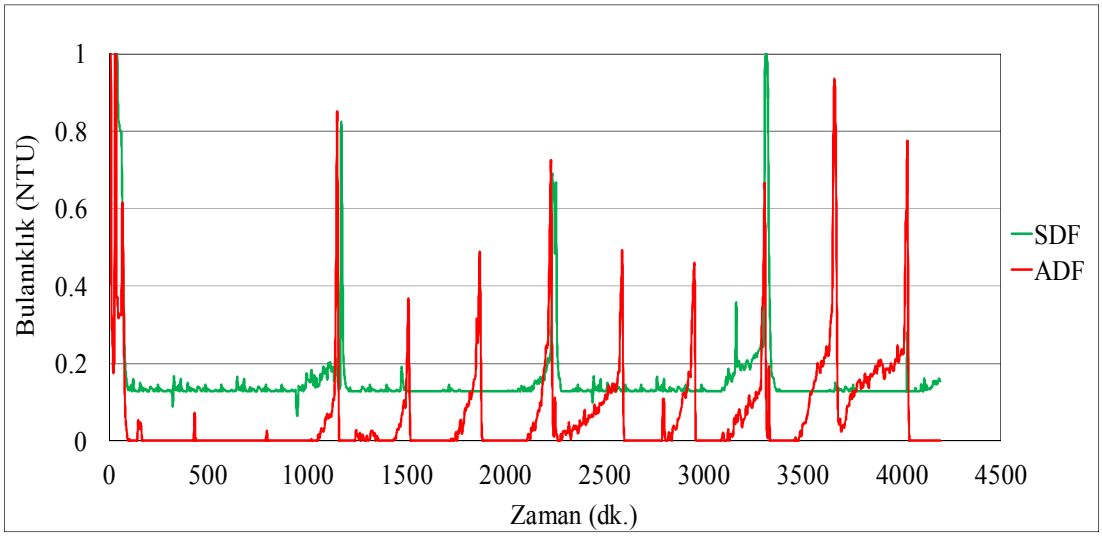
Tablo 5.32. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerin şartları

Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/l)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
15	9.90	12.5	SDF: 30.12 ADF: 30.03	SDF: 7.83 ADF: 7.80	18
16	9.87	12.5	SDF: 40.31 ADF: 40.91	SDF: 10.47 ADF: 10.63	22
17	9.96	12.5	SDF: 55.69 ADF: 56.27	SDF: 14.47 ADF: 14.62	21
18	9.30	12.5	SDF: 68.19 ADF: 65.64	SDF: 17.72 ADF: 17.06	20

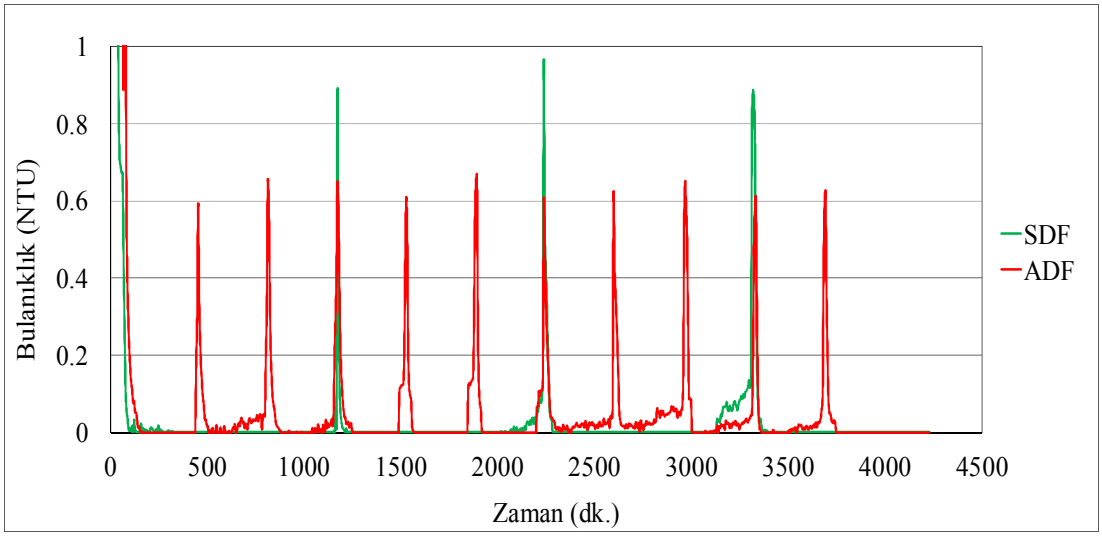
Deney 15, 16 ve 17'ye ait çıkış suyu bulanıklıklarının zaman göre değişimleri Şekil 5.79, 5.80 ve 5.81'de gösterilmektedir. Önceki dozajlardan farklı olarak bu deney setinde ADF'de birbirini takip eden iki filtrenin geri yıkanması arasındaki filtrasyon sürelerinde bulanıklık genellikle artma eğilimi göstermiştir.



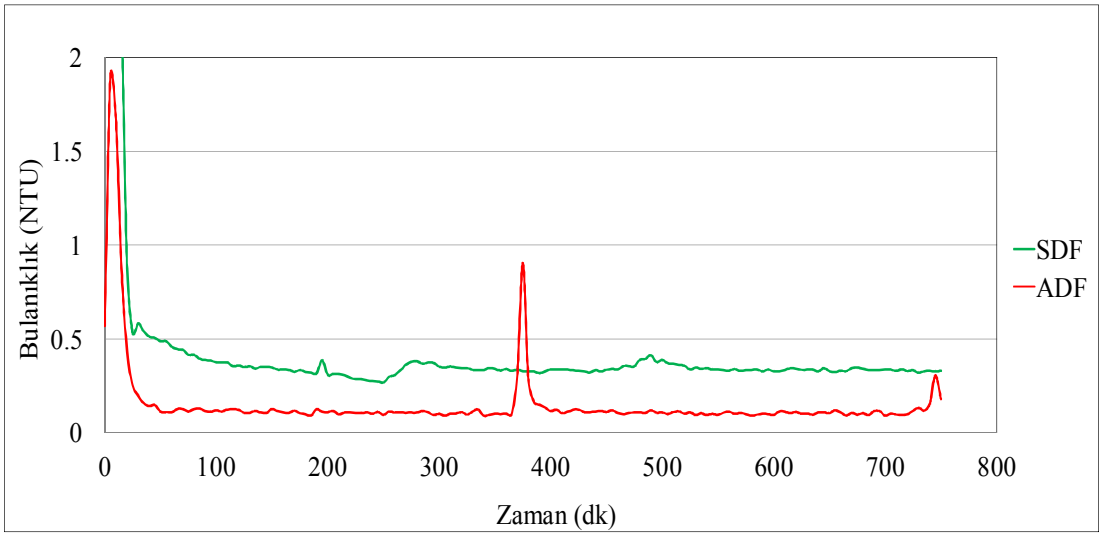
Şekil 5.79. Deney 15'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.90 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



Şekil 5.80. Deney 16'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.87 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



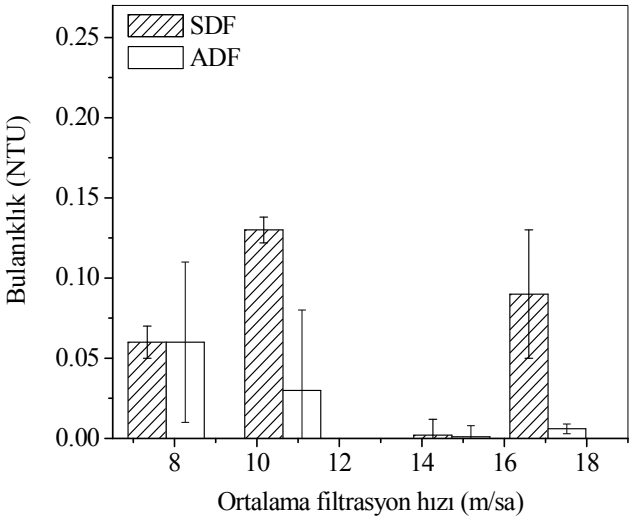
Şekil 5.81. Deney 17'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



Şekil 5.82. Deney 18'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.30 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).

Tablo 5.33. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.

Deney No.	Filtre	Ort. Bulanıklık (NTU)	STD	Ort. Bulanıklık (ripening ve pikler hariç) (NTU)	STD
15	SDF:	0.08	0.11	0.06	0.01
	ADF:	0.11	0.15	0.06	0.05
16	SDF:	0.04	0.19	0.13	0.008
	ADF:	0.07	0.16	0.03	0.05
17	SDF:	0.04	0.15	0.002	0.01
	ADF:	0.09	0.19	0.001	0.007
18	SDF:	0.28	0.37	0.09	0.04
	ADF:	0.14	0.22	0.006	0.003



Şekil 5.83. Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama bulanıklığına etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L, ham su bulanıklığı: ~ 10 NTU)

Tablo 5.34. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.

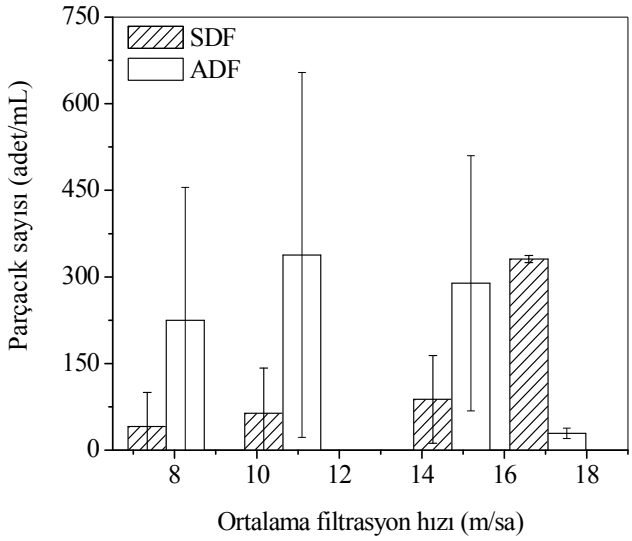
Filtre sistemi	Ort. Filtrasyon hızı (m/sa)	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı (adet/mL)*	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı† (adet/mL)*	Geri yıkama sonrası piklerinin ortalaması (adet/mL)*
SDF:	7.83	106	41	2100
ADF:	7.80	331	225	1400
SDF:	10.47	112	64	900
ADF:	10.63	465	338	1500
SDF:	14.52	105	88	3100
ADF:	14.73	324	289	1700
SDF:	17.72	360	331	-
ADF:	17.06	69	29	-

†(Başlangıç (ripening) periyodundaki ve geri yıkama sonrasındaki pik değerleri çıkarıldıktan sonra ortalama alınmıştır.)

* (Parçacık sayıları, 2-5 µm aralığındaki parçacıklar ile 5 µm'den büyük parçacıkların sayılarının toplamı olarak verilmiştir.

Tablo 5.35. Alum dozajının 12.5 mg/L olduğu deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları üzerinden hesaplanan parçacık giderim verimleri.

Deney No.	Ortalama filtrasyon hızı (m/sa)	Parçacık giderimi (%)	
		SDF	ADF
15	7.8	99.87	99.31
16	10.5	99.80	98.96
17	14.6	99.73	99.13
18	17.3	98.98	99.91



Şekil 5.84. Ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama parçacık sayısına etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L, ham su parçacık sayısı: ~ ((2-5 μm) + (>5 μm): 33,000 adet/mL).

5.2.1.5. Farklı Alum Dozajlarında Filtrasyon Hızının Su Kalitesine Etkisi ile İlgili Genel Sonuçlar ve Tartışma

Filtrasyon prosesinin ilk uygulandığı zamanlarda filtre verimliliği değerlendirilirken katı madde (bulanıklık), görünür renk, organik maddeler (uçucu katılar) ve bakteri sayısı (plaka sayımı) gibi parametreler dikkate alınmaktaydı [Fuller, 1898]. İçme suyu ile ilgili düzenleme ve standartların getirilmesiyle fiziksel arıtım proseslerinin birçoğunda, özellikle filtrasyonda bulanıklık (bulanıklığın sürekli ölçümü), mikrobiyolojik ölçümleri çoğunlukla birinci derecede temsil edebilen bir parametre haline gelmiştir. Filtrasyon ve dezenfeksiyon prosesleri birlikte uygulandığında ise iki sistemin bir arada verimi toplam koliform bakteri sayısıyla değerlendirilmektedir. Daha sonraları, filtre verimliliği değerlendirilirken sınırlı sayıdaki çalışmalarda da olsa *Giardia* ve *Cryptosporidium* gibi spesifik patojenlerin ölçümü/giderimi dikkate alınmıştır [Rose, 1988]. Günümüzde ise, filtre çıkış suyunda sürekli olarak bulanıklık ve parçacık sayısı ölçümleri oldukça yaygın olarak uygulanmaktadır ve EPA tarafından da standardize edilmiştir [O'Connor and O'Connor, 2002].

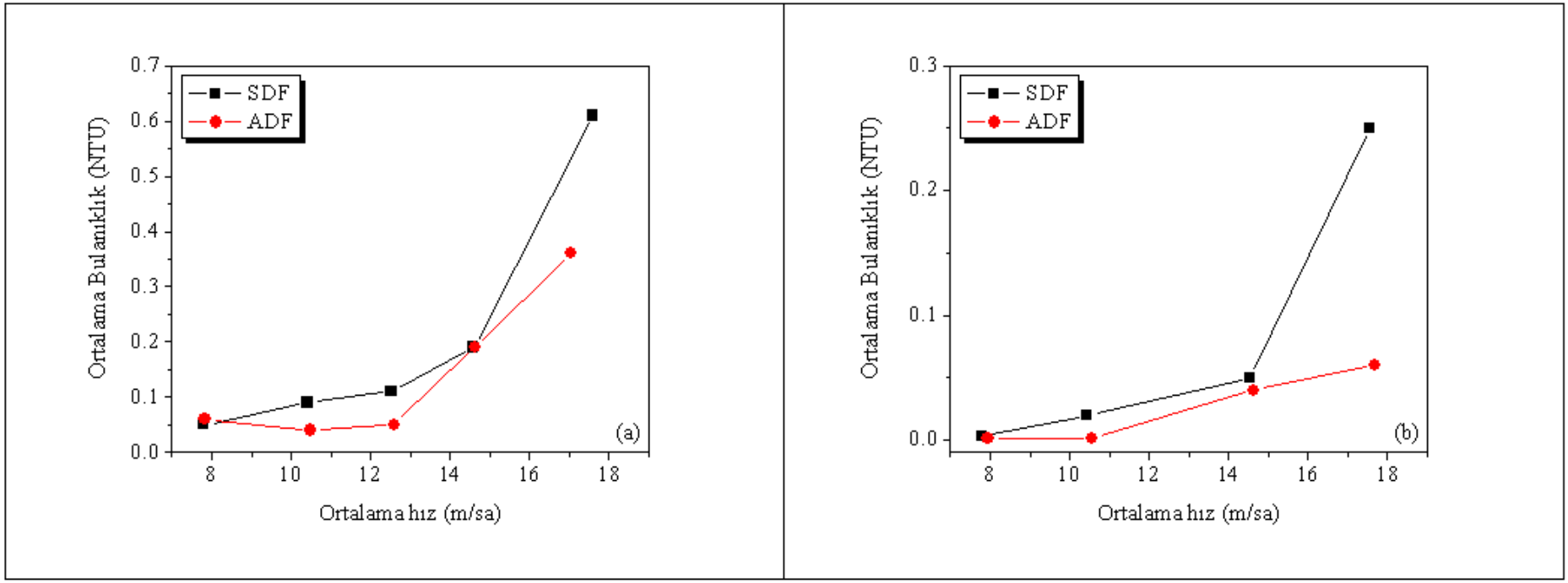
Bu tez kapsamındaki deneylerde de filtre verimliliği değerlendirilirken bulanıklık ve parçacık sayısı ölçümleri dikkate alınmıştır. Deneylerde kullanılan ham su sentetik olarak hazırlandığı için, çıkış suyu bulanıklık ve parçacık giderme eğilimleri benzerdir. Bu nedenle farklı alum dozajlarında filtrasyon hızının etkisi ile ilgili genel değerlendirme yapılırken sadece çıkış suyu ortalama bulanıklıklarına ait grafikler toplu halde aşağıda verilmiştir. Dört farklı alum dozajı ve beş farklı ortalama filtrasyon hızında, laboratuar kontrollü pilot tesis şartları altında 72 saate varan testler yürütülmüştür. Literatürdeki ADF'nin SDF'den daha iyi ya da benzer kalitede filtrat ürettiği iddiası kapsamlı şekilde ele alınmıştır. Şekil 5.85 ve 5.86'daki grafiklerin tamamı dikkate alındığında ADF sistemi ile SD filtresinin benzer kalitede çıkış suyu ürettiği, ADF'de çıkış suyu bulanıklığının % 1 daha düşük ölçüldüğü görülmektedir. Bu farklılık az gibi gözükse de bulanıklık standardının 0.1 NTU olması durumunda; SD filtresi ile standardın üzerinde bulanıklıkta çıkış suyu elde

edilmesine rağmen aynı şartlarda ADF'nin sözkonusu standardı sağladığı deneyler de mevcuttur.

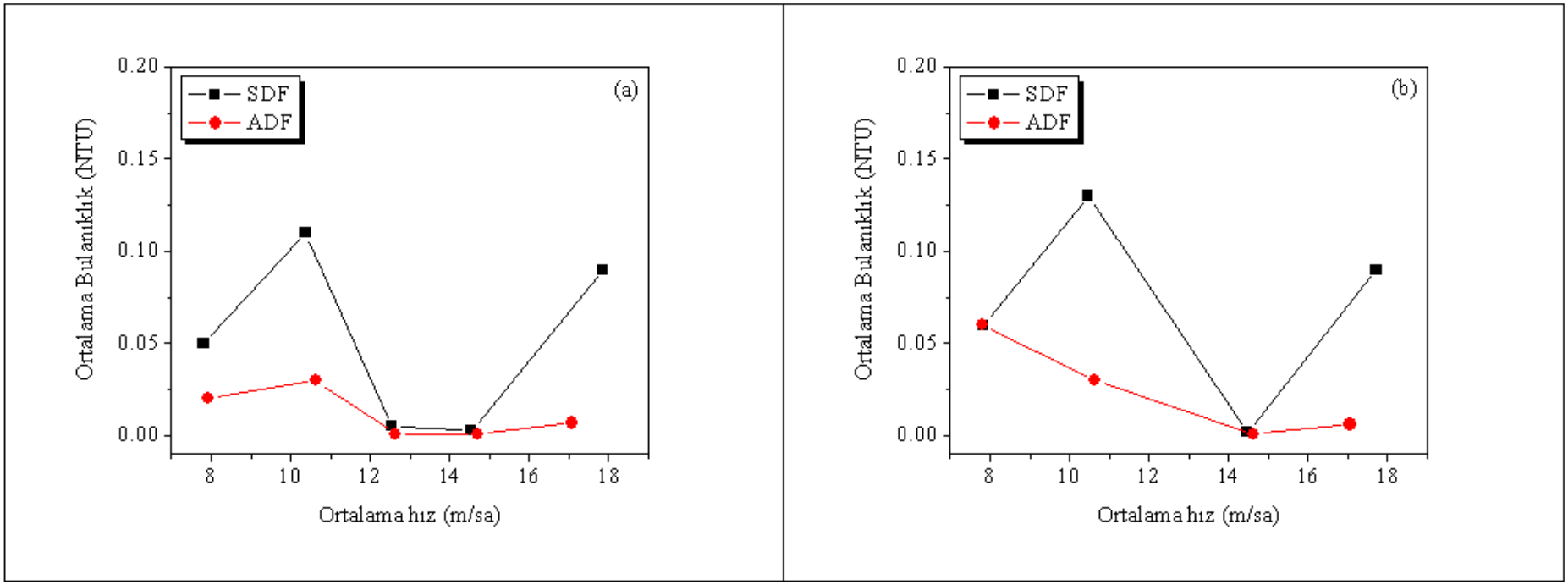
Parçacık gideriminde de ADF sistemi bulanıklık giderimindekine benzer şekilde % 1 mertebesinde daha iyi kalitede çıkış suyu üretmiştir. Parçacık gideriminde yüksek yüzde değerlerinde verimler elde etmek, filtre çıkış suyuna hastalık yapıcı mikroorganizmaların karışmadığından emin olabilmek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın öncelikli amacı halk sağlığına yönelik ve standartları sağlamış yüksek kalitede filtre çıkış suyu üretmek olmamasına rağmen standartlara yakın verimlerde parçacık giderimleri elde edilmiştir. Genel sonuçlar aşağıdaki gibi maddelendirilebilir:

- 5 mg/L ve 7.5 mg/L alum kullanılan deneylerde ortalama filtrasyon hızının artmasıyla çıkış suyu bulanıklığı da artmıştır. Filtrasyon hızı arttıkça bir filtrenin sudaki katıları tutma veriminin azaldığı bildirilmektedir. İşletmeye alınan temiz bir filtrede hızın yüksek olması sebebiyle çıkış suyu kalitesinde bulanıklık ve parçacık sayısı artışının sebebi de budur [Cleasby, 1981].
- 10 mg/L ve 12.5 mg/L dozajlarında hızın artmasıyla çıkış suyu kalitesi değişiminde belirgin bir eğilim gözlemlenmemiştir.
- Dört farklı dozajın hepsinde de farklı hızların hemen hepsinde ADF, SDF'den daha düşük ortalama bulanıklıkta filtrat üretmiştir.
- 18 deneydeki bütün çıkış suyu grafiklerinde hem bulanıklık hem de parçacık sayısı açısından geri yıkama pikleri SDF'de daha yüksektir. Bunun sebebi de ADF'de dört filtrenin toplam çıkış suyunda su kalitesi ölçümü yapıldığından, temiz filtrede işletme başlangıcında oluşan pikler diğer filtrelerin çıkış suyu ile karışarak seyrelmektedir (küçülmektedir). SDF'de tek bir filtre işletildiğinden direkt olarak bu filtrenin geri yıkama piki dikkate alınmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmada, ADF'nin (dört filtrenin çıkış sularının karışımının bulanıklığı ölçüldüğünden) SDF'den biraz daha iyi kalitede su ürettiği söylenebilirken, geri yıkama pikleri

hakkında yorum yapabilmek için ise ADF ve SDF'deki filtre sayıları eşit olmalıdır.



Şekil 5.85. Ortalama çıkış suyu bulanıklığının ortalama filtrasyon hızına göre değişimi: (a) 5 mg/L alum deneyleri için, (b) 7.5 mg/L alum deneyleri için.



Şekil 5.86. Ortalama çıkış suyu bulanıklığının ortalama filtrasyon hızına göre değişimi: (a) 10 mg/L alum deneyleri için, (b) 12.5 mg/L alum deneyleri için.

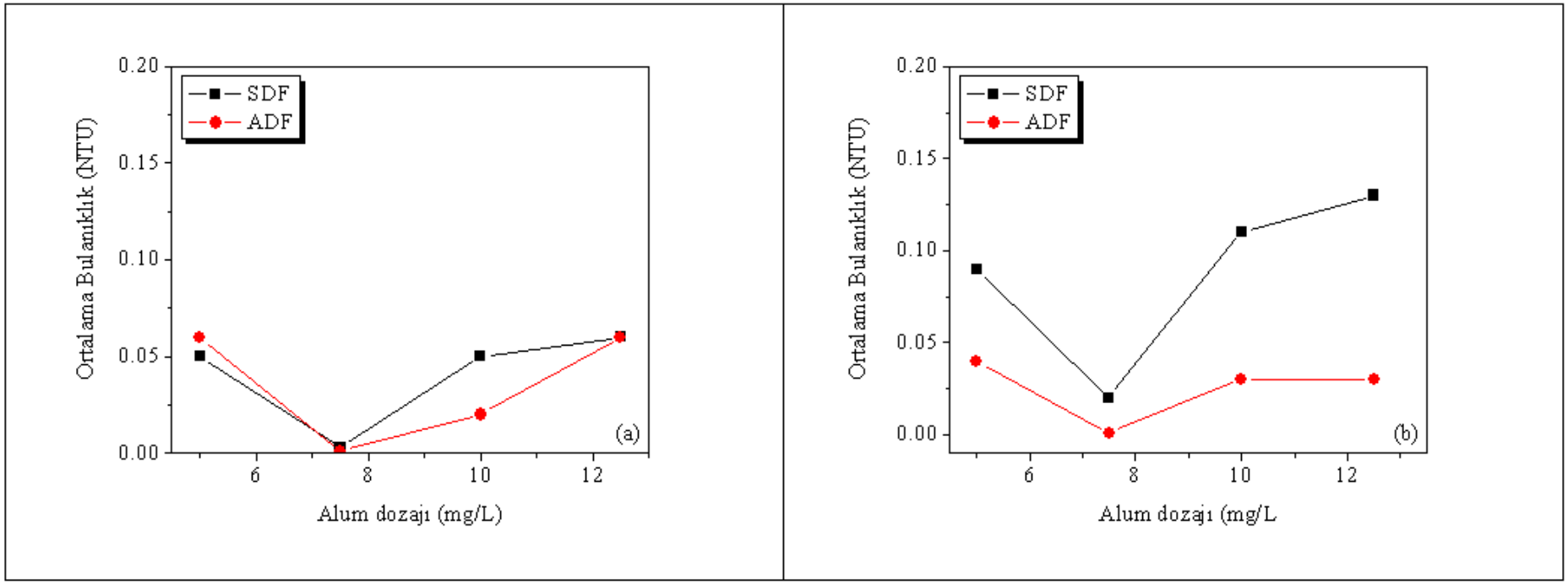
5.2.2. Farklı Filtrasyon Hızlarında Alum Dozajının Su Kalitesine Etkisi ile İlgili Genel Sonuçlar ve Tartışma

Direkt filtrasyonda kullanılması tavsiye edilen alum dozajının alt limiti genellikle 5 mg/L iken [EPA, 2002], üst limiti 12-15 mg/L'dir [Hutchison, 1976] ve hızlı olarak işletilen kum filtrelerinde seçilen hız aralığı da genellikle 5-15 m/sa'dır [Huisman, 1983; AWWA, 2003; AWWA, 2005; MWH, 2005]. Bu bilgiler dikkate alınarak belirlenen deney koşulları altında filtrasyon hızının sabit kalması şartıyla alum dozajındaki değişikliğin filtre sistemlerine ve ADF ile SDF'nin karşılaştırılmasına ne derecede etki ettiği incelenmiştir. Deneylerde 5, 7.5, 10 ve 12.5 mg/L olmak üzere dört farklı alum dozajı uygulanmıştır. Deney şartları, çıkış suyu bulanıklığının zamanla değişimi ve parçacık sayısı ile ilgili veriler bir önceki kısımda ayrıntılı sunulduğu için burada tekrar edilmemiş, Şekil 5.85 ve 5.86'ya benzer şekilde ortalama çıkış suyu bulanıklıkları gösterilmiş ve direkt olarak genel sonuçlar verilmiştir. Uygulanan dört farklı dozajda da ADF'nin daha iyi kalitede filtrat ürettiği görülmektedir (Şekil 5.87 ve 5.88). Sonuçlar aşağıdaki gibi maddelendirilebilir:

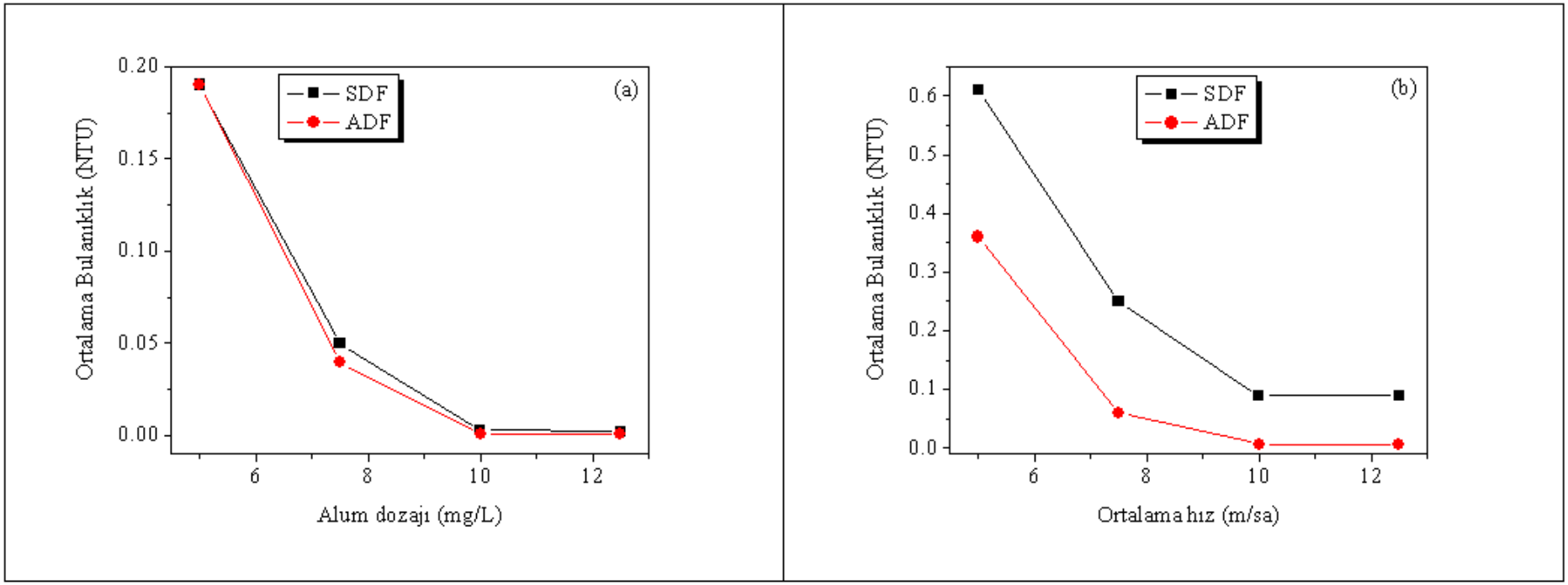
- 14.6 ve 17.5 m/sa deneylerinde alum dozajının 5 mg/L'den sırasıyla 7.5, 10 ve 12.5 mg/L'ye yükseltilmesiyle çıkış suyu bulanıklığı azalmıştır (Şekil 5.88a ve 5.88b). Bu sonuç şöyle açıklanabilir: Yumaklaştırıcı dozajı arttıkça, reaksiyon hızı artmakta ve filtre gözeneklerinde tutulabilecek daha büyük floklar meydana gelmekte, filtrenin katıları tutma verimi artmaktadır [O'Connor and O'Connor, 2002]. Ancak aşırı yumaklaştırıcı kullanıldığında ise erken zamanda "breakthrough" (filtrasyon prosesinde belli bir süre sonunda, filtrenin tıkanmasına bağlı olarak, filtre yatağı gözeneklerindeki kapiler hızın artması sebebiyle akışkanın filtre yatağından katı maddeleri sökmesi ve/veya yumaklaşamamış küçük boyuttaki parçacıkları çıkış suyuna taşıması) görülmekte ve su kalitesi bozulmaktadır. Bir diğer sakınca da filtre yatağındaki yük kayıplarının artması ve filtre işletme süresinin kısalmasıdır [Eikebrokk, 1982; Eikebrokk et al., 2006]. Bu durum, breakthrough görülene kadar işletilen filtreler açısından çok

önemlidir ancak bu tez çalışmasında filtreler, bir işletme süresi belirlenerek işletilmiştir. Bu süre içerisinde de SDF'de breakthrough görülmemiştir (breakthrough'a genellikle SD filtrelerinde rastlanır).

- 7.9 ve 10.5 m/sa deneylerinde alum dozajının artmasıyla bulanıklık değişimi arasında genel bir ilişki ortaya çıkmamıştır.
- Dört farklı ortalama filtrasyon hızının hepsinde de farklı alum dozajlarının hemen hepsinde ADF, SDF'den daha düşük ortalama bulanıklıkta filtrat üretmiştir.



Şekil 5.87. Ortalama çıkış suyu bulanıklığının alum dozajına göre değişimi: (a) 7.9 m/sa hız deneyleri için, (b) 10.5 m/sa hız deneyleri için.



Şekil 5.88. Ortalama çıkış suyu bulanıklığının alum dozajına göre değişimi: (a) 14.6 m/sa hız deneyleri için, (b) 17.4 m/sa hız deneyleri için.

5.2.3. Ham Su Sıcaklığının Filtre Performansına ve Çıkış Suyu Kalitesine Etkisi

Su sıcaklığının yumaklaştırma, çöktürme, filtrasyon ve dezenfeksiyon gibi birçok arıtma prosesinin arıtma verimine etki ettiği bilinmektedir. Bununla birlikte su ihtiyacı ve kalitesi de sıcaklıktan etkilenmektedir [Dabrowski and Mackie, 1994].

Reynold's sayısına bağlı olan hidrodinamik hareketler ile Stokes-Einstein difüzyon katsayısı ve Peklet Sayısı'na bağlı olan moleküler difüzyon sıcaklıkla değiştiği için derin yatak filtrasyonundaki taşınım mekanizmalarının çoğu sıcaklığın etkisi altındadır. Ayrıca, yerçekimine bağlı akış karakteristiğini etkileyen kinematik viskozite ve akışkanın yoğunluğu da sıcaklıkla yakından ilişkili parametrelerdir. Kirli ve temiz filtreler çoğunlukla Darcy Kanunu'na uyduklarından filtrasyon süresince filtre yatağındaki yük kaybı da kinematik viskoziteyle orantılı olarak değişir ve dolayısıyla yük kaybının da sıcaklığa bağlı bir parametre olduğu söylenebilir [Cleasby and Baumann, 1962]. Jackson (1980) filtre performansının yaz mevsiminde, suyun soğuk olduğu kış mevsimine oranla daha iyi olduğunu raporlamıştır.

Yumaklaşma (flokülasyon) kinetiğinin matematiksel olarak açıklandığı ve flok oluşum (k_1) ile flok kırılma (k_2) katsayılarının kullanıldığı bir çalışmada, sıcaklığın azalmasıyla k_1'in küçüldüğü ve k_2'nin de büyüdüğü görülmüştür [Hedberg, 1976]. Bu açıdan ham su sıcaklığı yumaklaştırıcı kullanılan filtrasyon prosesinde önemli bir parametre olmaktadır. Yine benzer bir çalışmada, bilgisayar kontrol modeli yardımıyla aynı çökme hızlarında, yüksek sıcaklıklarda daha düşük miktarda yumaklaştırıcıya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir [Miura and Ono, 1978].

Yukarıda bahsedilen çalışmalardan görüldüğü filtrasyon prosesi hem yük kaybı hem de filtrat kalitesi bakımından ham su sıcaklığıyla ilişkili bir prosesdir. Bu çalışma kapsamında bir deneyin (SDF ve ADF'nin paralel işletildiği bir deney setinin) yaklaşık 72 saat sürmesi, laboratuar şartlarına bağlı olarak çoğunlukla haftada bir deney yapılabilmesi ve pilot tesiste karşılaşılan aksaklıkların da giderilmesinin zaman alması sebebiyle deneylerin tamamı uzun bir süreye yayılmıştır. Bu süre zarfında mevsim değişiklikleri sebebiyle deneylerde ham su olarak kullanılan şebeke suyu sıcaklığı da değişmiş, Deneyler ilkbahar ve sonbahar mevsimleri arasında 20±3.5 °C'de yürütülmüştür. Deneyler arasından farklı dozajlardan keyfî olarak (sıcaklığı birbirine en yakın ya da eşit dört deney olmasına dikkat edilmiştir) seçilen dört deney (4., 8., 12. ve 17. deneyler) kış mevsiminde farklı sıcaklıklarda tekrarlanmıştır (19-22. deneyler). Tekrar deneyleri daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildikleri için bunlar soğuk su deneyleri olarak adlandırılmıştır. Bölüm 5.1'de hidrolik açıdan filtre sistemleri karşılaştırılırken, bu kısımda da su kalitesi bakımından incelenmiştir. Keyfî seçilen deneyler ve tekrar deneylerinin şartları Tablo 5.36 ve 5.37'de sunulmuştur. Tablolardan görülebileceği gibi ham su sıcaklığı dışında bütün deneysel koşullar eşit tutulmaya çalışılmıştır.

Tablo 5.36. Sıcak ham su deneylerinin şartları.

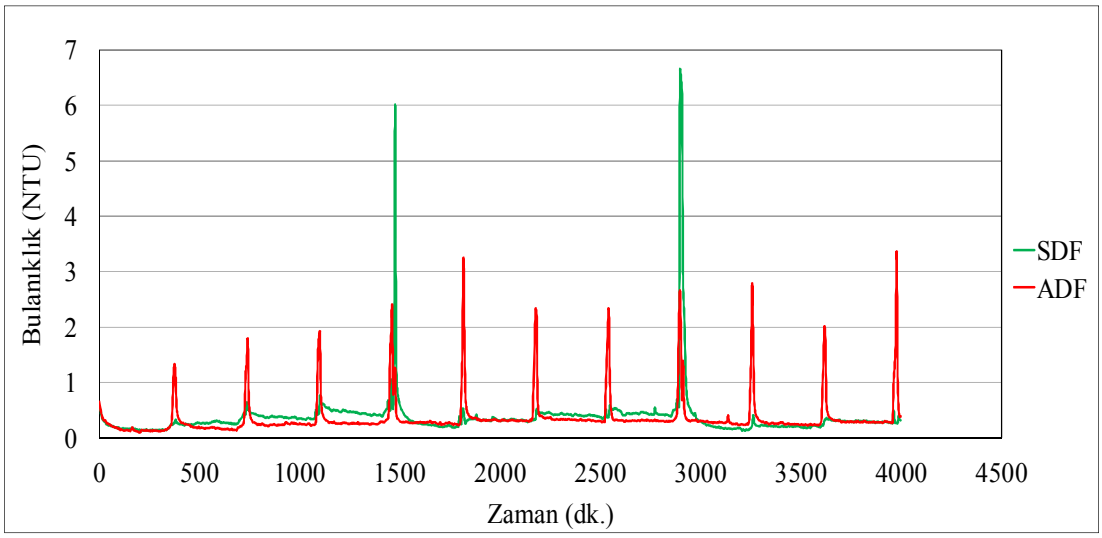
Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
4	10.1	5	SDF: 56.11 ADF: 56.23	SDF: 14.58 ADF: 14.61	21
8	9.93	7.5	SDF: 56.16 ADF: 56.20	SDF: 14.59 ADF: 14.60	21
12	10.0	10	SDF: 48.23 ADF: 48.65	SDF: 12.53 ADF: 12.64	21
17	9.96	12.5	SDF: 55.69 ADF: 56.27	SDF: 14.47 ADF: 14.62	21

Tablo 5.37. Soğuk ham su deneylerinin şartları.

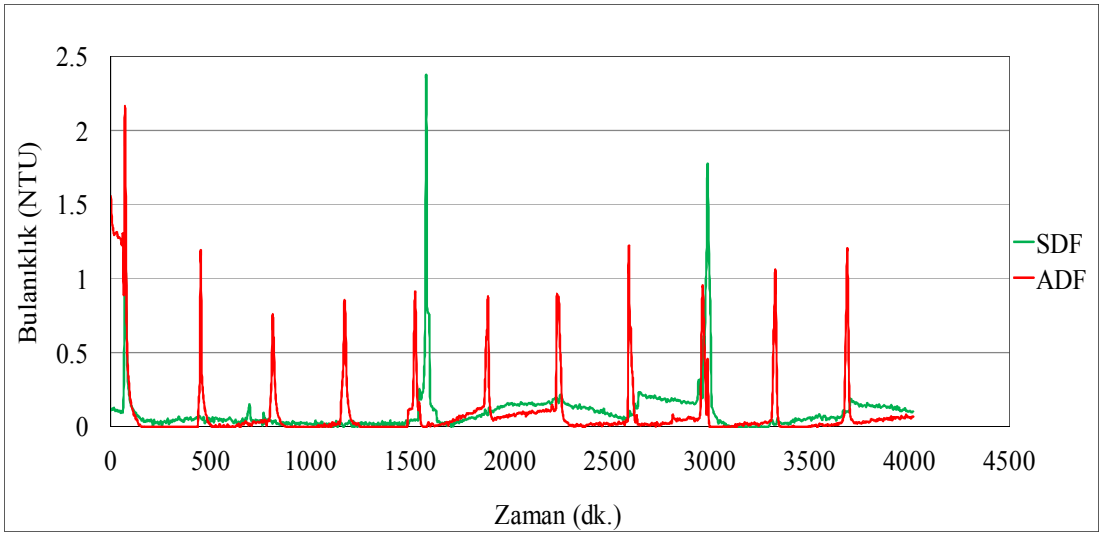
Deney No.	Ham su bulanıklık (Ort. NTU)	Alum dozajı (mg/L)	Ortalama Debi (L/sa)	Ortalama Hız (m/sa)	Su sıcaklığı (°C)
19	9.96	5	SDF: 56.07 ADF: 56.30	SDF: 14.57 ADF: 14.63	7
20	9.98	7.5	SDF: 55.95 ADF: 56.29	SDF: 14.54 ADF: 14.63	10
21	9.98	10	SDF: 48.05 ADF: 48.19	SDF: 12.48 ADF: 12.52	10
22	9.98	12.5	SDF: 55.90 ADF: 56.69	SDF: 14.52 ADF: 14.73	8

Soğuk ham su deneylerinde elde edilen çıkış suyu bulanıklıkları hem SDF hem de ADF için Şekil 5.89-5.92'de verilmiştir. Çıkış suyu bulanıklıklarının ortalama

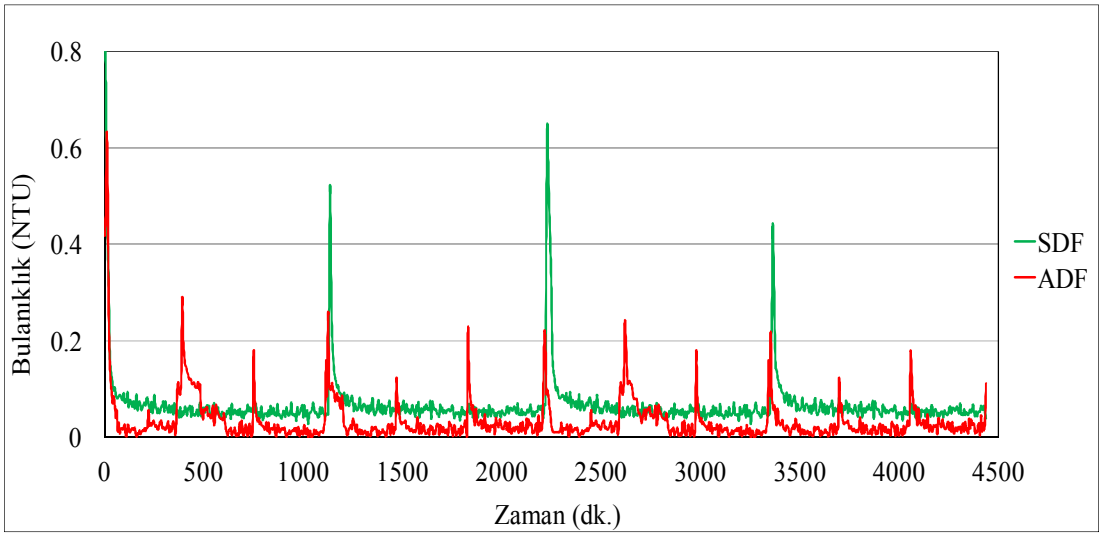
değerleri ve standart sapmaları sıcak ve soğuk ham su deneyleri için sırasıyla Tablo 5.38 ve 5.39'da sunulurken, karşılaştırma grafikleri Şekil 5.93 ve 5.94'de, parçacık sayısı ortalama değerleri de Tablo 5.40 ve 5.41'de gösterilmiştir.



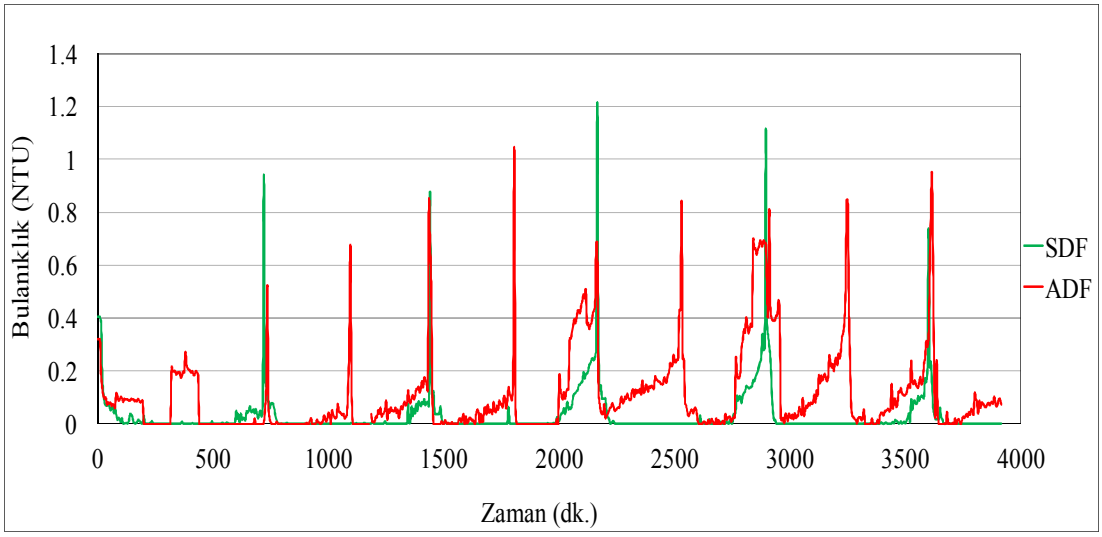
Şekil 5.89. Deney 19'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



Şekil 5.90. Deney 20'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.98 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



Şekil 5.91. Deney 21'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.98 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



Şekil 5.92. Deney 22'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun bulanıklık değişimi (ham su bulanıklığı: 9.98 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).

Tablo 5.38. Sıcak ham su kullanılan deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.

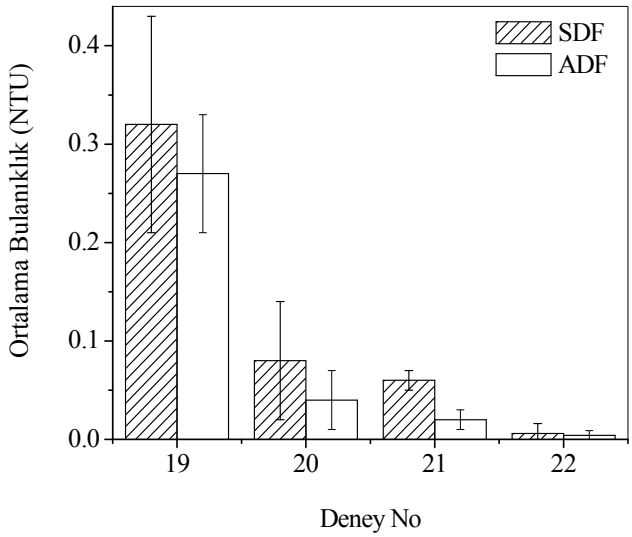
Deney No.	Filtre	Ort. Bulanıklık (NTU)	STD	Ort. Bulanıklık (ripening ve pikler hariç) (NTU)	STD
4	SDF:	0.22	0.19	0.19	0.09
	ADF:	0.29	0.23	0.19	0.05
8	SDF:	0.13	0.2	0.05	0.03
	ADF:	0.16	0.3	0.03	0.02
12	SDF:	0.03	0.07	0.005	0.001
	ADF:	0.01	0.05	0.001	0.001
17	SDF:	0.04	0.15	0.002	0.01
	ADF:	0.09	0.19	0.001	0.007

Tablo 5.39. Soğuk ham su kullanılan deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen bulanıklık değerlerinin ortalamaları.

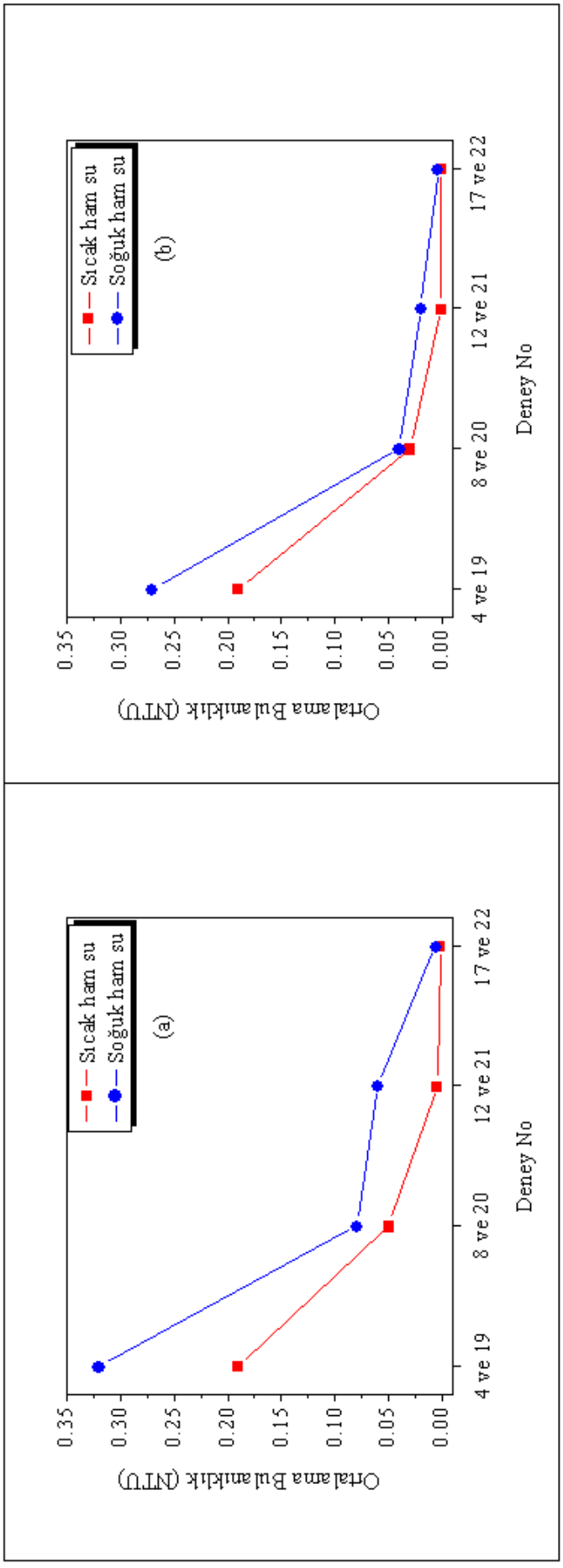
Deney No.	Filtre	Ort. Bulanıklık (NTU)	STD	Ort. Bulanıklık (ripening ve pikler hariç) (NTU)	STD
19	SDF:	0.36	0.46	0.32	0.11
	ADF:	0.36	0.36	0.27	0.06
20	SDF:	0.1	0.16	0.08	0.06
	ADF:	0.09	0.24	0.04	0.03
21	SDF:	0.07	0.06	0.06	0.01
	ADF:	0.03	0.05	0.02	0.01
22	SDF:	0.03	0.1	0.006	0.01
	ADF:	0.11	0.16	0.004	0.005

Şekil 5.93'deki ortalama çıkış suyu karşılaştırma grafiğinden görülebileceği gibi tekrar (soğuk ham su) deneylerinde ADF sistemi SDF'den daha düşük bulanıklıkta filtrat üretmiştir. Tekrar deneylerinin sıcak ham su deneyleriyle mukayesesi ise Şekil 5.94'de gösterilmektedir. Hem SDF hem de ADF için ham su sıcaklığının yüksek olduğu deney şartlarında daha düşük bulanıklıkta filtrat elde edilmiştir. Şekil 5.108'den de görülebileceği gibi her iki sıcaklık koşulunda da çoğunlukla 0.1 NTU'dan (EPA standardı, 2002) düşük bulanıklık kalitesinde çıkış suyu elde edilebilmiştir. Bir diğer su kalitesi parametresi olan parçacık sayısı ile ilgili ölçüm sonuçları da Tablo 5.20 ile 5.21'de verilmiştir. Bu tablolara göre çıkış suyu ortalama parçacık sayısı tekrar deneylerinde daha yüksektir. Tekrar deneylerinin sonuçları yukarıda verilen literatür bilgileriyle örtüşmektedir. Yüksek sıcaklıkta filtre performansı daha yüksek bulunmuştur. Bu kısımdaki sonuçlar sadece su kalitesi ile ilgili bir değerlendirmedir. Sıcaklık, akışkanın kinematik vizkozitesi ve yoğunluğuna doğrudan etki ettiğinden, -özellikle- filtre tankı içindeki su seviyesini, dolayısıyla da

filtrasyon süresini etkilemektedir. Filtrasyon süresini içeren filtre hidrolik karakteristikleri Bölüm 5.1'de sunulmuştur.



Şekil 5.93. Soğuk ham su deneylerinde ortalama filtrasyon hızının çıkış suyu ortalama bulanıklığına etkisi (her bir deneyin şartları Tablo 5.17'de verilmiştir).



Şekil 5.94. Ortalama çıkış suyu bulanıklığının ham su sıcaklığına göre değişimi: (a) SDF için, (b) ADF sistemi için.

Tablo 5.40. Sıcak ham su kullanılan deneylerde deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.

Deney No.	Filtre	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı (adet/mL)*	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı† (adet/mL)*	Geri yıkama sonrası piklerinin ortalaması (adet/mL)*
4	SDF:	1349	1255	7000
	ADF:	434	321	2000
8	SDF:	785	703	4000
	ADF:	444	357	1800
12	SDF:	43	31	700
	ADF:	14	10	100
17	SDF:	105	88	3100
	ADF:	324	289	1700

†(Başlangıç (ripening) periyodundaki ve geri yıkama sonrasındaki pik değerleri çıkarıldıktan sonra ortalama alınmıştır.)

* (Parçacık sayıları, 2-5 µm aralığındaki parçacıklar ile 5 µm'den büyük parçacıkların sayılarının toplamı olarak verilmiştir.

Tablo 5.41. Soğuk ham su kullanılan deneylerde deneylerde filtrasyon süresince çıkış suyunda ölçülen parçacık sayısı değerlerinin ortalamaları.

Deney No.	Filtre	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı (adet/mL)*	Ort. çıkış suyu parçacık sayısı† (adet/mL)*	Geri yıkama sonrası piklerinin ortalaması (adet/mL)*
19	SDF:	2106	2064	10000
	ADF:	695	513	3500
20	SDF:	1022	1004	5000
	ADF:	450	363	2250
21	SDF:	56	34	650
	ADF:	15	12	100
22	SDF:	131	83	3600
	ADF:	389	307	1800

†(Başlangıç (ripening) periyodundaki ve geri yıkama sonrasındaki pik değerleri çıkarıldıktan sonra ortalama alınmıştır.)

* (Parçacık sayıları, 2-5 µm aralığındaki parçacıklar ile 5 µm'den büyük parçacıkların sayılarının toplamı olarak verilmiştir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

İçme suyu standartlarının daha da yükselmesi, hızlı nüfus artışı ve arıtma tesislerindeki işletme maliyetlerinin büyük önem arzetmeye başlaması neticesinde, günümüzde, azalan debili filtrasyon (ADF), konvansiyonel sabit debili filtrasyon (SDF) karşısında, filtre debisi kontrol yöntemi, işletme maliyetleri ve su kalitesi açısından farklı ve daha avantajlı bir alternatif haline gelmiştir. Son elli yılda yapılan deneysel ve teorik çalışmaların çoğu ADF sisteminin daha iyi çıkış su kalitesi ürettiğini ve daha uzun işletme süresine sahip olduğunu (filtrenin daha geç tıkandığını) bildirmiştir. Ayrıca ilk yatırım maliyetlerinin de düşük olduğu bilinmesine rağmen hâlâ su arıtma tesislerinde SDF kadar tercih edilmemektedir. Bunun sebebi ise, tüm bu zaman boyunca yapılan çalışmalar sonunda ADF tasarımına yönelik bazı ampirik hesaplama yöntemleri ve kabuller ortaya konmasına rağmen bu yöntemlerin çoğunun deneysel olarak ispat edilememesi, online izlenememesi ve ADF'nin hidrolik davranışlarının yeterince ortaya konulamaması, dolayısıyla da ADF tasarımının güçlüğü ve işletmede karşılaşılabilecek tahmini zor problemlerdir.

Son 10 yılda başdöndürücü bir hızla gelişen bilgi işlem teknolojilerine paralel olarak otomasyon ve veri (data) aktarım teknolojileri de büyük bir ilerleme katetmiştir. Bu çalışmada gelişmiş otomasyon ve data aktarım teknolojilerinden faydalanılmak suretiyle ADF sistemi hidrolik ve su kalitesi açısından detaylı bir şekilde incelenmiş ve değerlendirilmiştir. ADF'nin tasarımına yönelik daha önce önerilen hesaplama yöntemleri (ampirik hesaplama yöntemleri dahil) ile ortaya konan kabullerin doğruluğu ve geçerliliği, pilot ölçekli deneyler yardımıyla deneysel

olarak araştırılmıştır. Bu amaçla dört adet filtre içeren bir ADF sistemi inşa edilmiş ve işletilmiştir. Filtrelerdeki ortak su seviyeleri, her bir filtrenin filtrasyon hızı ve filtre yatağının çeşitli derinliklerindeki yük kayıpları zamana bağlı olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. ADF ile ilgili önceki diğer çalışmaların çoğunda tek bir ortalama filtrasyon hızı ya da tek bir yumaklaştırıcı dozajı kullanılmıştır. Bu çalışmada ise farklı filtrasyon hızları ve yumaklaştırıcı dozajları kullanılarak aynı özellikteki ham su filtre edilerek deneyler tekrar edilmiştir. Böyle bir deneysel matris kullanımıyla, çeşitli işletme şartlarının ADF sisteminin hidrolik davranışları üzerindeki etkileri daha detaylı ele alınmıştır.

ADF sisteminin yanında, giriş akımının bölünmesi (influent-flow splitting) esasına dayanan pilot ölçekte bir sabit debili filtre de paralel olarak işletilmiştir. Aynı ham su, aynı ortalama filtrasyon hızı kullanılmıştır. Bütün filtre kolonları eş değer özellikte olup, aynı ağırlıkta ve seviyede aynı kum ile doldurulmuştur. Her iki sistemin de çıkış suyu kalitesini değerlendirmek ve mukayese etmek amacıyla sürekli (online) olarak bulanıklık ve parçacık sayısı ölçümleri yapılmış ve kaydedilmiştir. Beş farklı ortalama filtrasyon hızı ve 4 farklı yumaklaştırıcı dozajının kullanıldığı 22 set deney sonunda büyük miktarda veri toplanmıştır. Her iki sistemin de filtre yük kaybı eğrilerinin eğimleri mukayese edilmiştir. Bu mukayese, tasarlanacak filtre tankının duvar yüksekliklerinin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Bahsedilen deneyler sonunda elde edilen netîceler hidrolik ve su kalitesi açılarından olmak üzere iki madde halinde aşağıda verilmiştir:

6.1. Hidrolik Açıdan Sonuçlar

1. Her bir ADF'nin ortalama filtrasyon hızı geri yıkandıkça kademeli olarak azalmış ve iki geri yıkama arasında hemen hemen sabit kalmıştır. Bu sonuç literatürdeki geçmiş çalışmaların sonuçlarıyla örtüşmüştür. Ancak geri yıkanan bir filtre işletmeye alınır alınmaz (temiz filtre) filtrenin hızı, takip eden filtre geri yıkanıncaya kadar azalan bir eğilim izlemiştir. ADF sisteminin bu davranışı daha önce literatürdeki deneysel çalışmalarda açıkça ortaya konmamış, filtre hızının her zaman sabit olduğu kabul edilmiştir.
2. Maksimum su seviyesinin minimum su seviyesine oranı (h_3/h_2), yumaklaştırıcı dozajı sabit tutulmak şartıyla, ortalama filtrasyon hızının artmasıyla her zaman artmıştır. Diğer yandan bu oran, ortalama filtrasyon hızı sabit tutulmak şartıyla, yumaklaştırıcı dozajının artırılmasıyla genellikle artmıştır.
3. Su seviyesindeki mutlak değişim (h_3-h_2) [buna bağlı olarak su seviyesi eğrisindeki eğim], düşük yumaklaştırıcı dozajlarında (bu çalışmada 5 ve 7.5 mg/L) filtre hızının artmasından hemen hemen etkilenmemiş ve nisbeten düşük değerlerde kalmıştır. Yüksek dozajlarda (bu çalışmada 10 ve 12.5 mg/L) ise filtre hızının artmasıyla filtre yatağının hızla tıkanmasına bağlı olarak (h_3-h_2) değeri oldukça büyümüştür. Ancak (h_3-h_2) değişimi 12.5 mg/L dozajındaki deneylerde filtrasyon hızının artmasıyla artma eğilimi sergilerken, 10 mg/L yumaklaştırıcı deneylerinde ise bu eğilim net olarak elde edilememiştir. (h_3-h_2) değişimi, aynı filtre hızında yumaklaştırıcı dozajının artırılmasıyla her zaman artmaktadır.
4. Maksimum filtrasyon hızının minimum filtrasyon hızına oranı (V_{maks}/V_{min}) (bütün AD filtreleri işletmedeyken) ortalama filtrasyon hızının (tasarım hızı) artmasıyla genellikle azalmaktadır. Bu oranın değişimi, düşük yumaklaştırıcı

dozajlarında hız değişiminden daha az etkilenmektedir. Bununla beraber, yumaklaştırıcı dozajı artırıldığında (V_{maks}/V_{min}) oranının da arttığı görülmüştür.

5. Pik filtrasyon hızının minimum filtrasyon hızına oranının (V_{pik}/V_{min}) ortalama filtrasyon hızının artmasıyla genellikle azaldığı görülmüştür (V_{pik} hızı, kirlenen filtrenin geri yıkamaya alındığında maksimum su seviyesine (h_4) ulaştığı andaki hızıdır). V_{pik}/V_{min} oranı, V_{maks}/V_{min} oranında olduğu gibi düşük yumaklaştırıcı dozajlarında hız değişiminden daha az etkilenmektedir ve yumaklaştırıcı dozajı artırıldığında oranın arttığı görülmüştür.
6. V_{maks}/V_{av} oranında gözlenen değişim de V_{maks}/V_{min} oranında olduğu gibidir. Bu oran deneylerde 1.0-2.0 aralığında elde edilmiş olup, ortalama filtrasyon hızının (tasarım hızı) artmasıyla genellikle azalmakta ve yumaklaştırıcı dozajının artırılmasıyla da artmaktadır.
7. Minimum filtrasyon hızının ortalama filtrasyon hızına oranı (V_{min}/V_{av}), V_{maks}/V_{av} oranı ile uyum içerisinde ve 0.4-0.9 aralığında değişmektedir: Ortalama hızın artmasıyla artmakta ve yumaklaştırıcı dozajının artmasıyla azalmaktadır. Cleasby (1993) genel bir tasarım hesaplaması kullanarak ,V_{min}/V_{av} oranı 0.7 seçildiğinde V_{maks}/V_{av} oranının her zaman 1.5 olduğunu bildirmiştir. Ancak bu çalışmada V_{min}/V_{av} oranı 0.7 olduğunda V_{maks}/V_{av} oranının 1.5'den oldukça farklı olduğu tesbit edilmiştir.
8. SDF ve ADF filtrelerinde meydana gelen yük kaybı eğrilerinin eğimleri eşit çıkmamış ($ADF_{eğim}/SDF_{eğim} \neq 1$), ortalama %38 oranında farklı olarak elde edilmiştir. AD filtrelerinden önceki su biriktirme alanının da etkisi (accumulation area) hesaba katıldığında sapma azalmış ve %14'e düşmüştür. Alan düzeltilmesi yapılan aynı deneysel şartlarda SD filtresinin yük kaybı eğrisinin eğimi ADF sistemine ait eğimden genellikle daha yüksek bulunmuştur.

9. ADF sisteminde Seviye-3 ve Seviye-5 değerleri, yüksek su seviyeleri elde edilen deneylerde hemen hemen birbirine eşit bulunmuştur. Bu bulgu, Cleasby (1993)'nin ADF tasarım yöntemindeki kabullerden birini desteklemektedir. Yumaklaştırıcı dozajının ve filtrasyon hızının çok düşük olduğu deneylerde su seviyesinin pik değeri (h_4), geri yıkanmak üzere devreden çıkarılan filtrenin tekrar devreye alınmadan önceki su seviyesinin (bu çalışmadaki geri yıkama giderinin bulunduğu yükseklik) ya altında kalmaktadır, ya da az bir miktar üzerine çıkmaktadır. Düşük hızlarda ve dozajlarda 3 ve 5 seviyeleri –Cleasby'nin kabulünün aksine- oldukça farklı bulunmuştur.
10. Bu çalışmadaki deneysel matrikste yer alan deneylerin 17 tanesinde (alum dozajının 12.5 mg/L ve ortalama filtrasyon hızının 17.5 m/sa olduğu Deney 18; müsaade edilebilen yük kaybının 12 saat sonunda hem SDF hem de ADF sisteminde aşılması sebebiyle tamamlanamamıştır) Seviye 2, Seviye 3 ve Seviye 5 deney süresince 5 saniyede bir kaydedilmiş ve şu sonuçlar elde edilmiştir: Suyun Seviye 4'ten Seviye 5'e değişim süresi: 47 saniye (standart sapma 22 saniye) ve Suyun Seviye 5'ten Seviye 2'ye değişim süresi: 23.4 dakika (standart sapma 4.8 dakika). Bu değerler daha önceki çalışmalarda (Cleasby and Di Bernardo 1980) rapor edilen "bir kaç dakika" ve "30 dakika" ifadelerine sırasıyla uymaktadır.
11. ADF sisteminde su seviyesi, ortalama filtrasyon hızı ve yumaklaştırıcı dozajındaki değişimlerden etkilenmektedir. Özellikle, sabit filtre hızında yumaklaştırıcı dozajının artırılması sonucu su seviyesinde nisbeten büyük bir artış meydana getirmektedir.

12. Aynı filtrasyon sürelerinde ADF sisteminde daha az yük kaybı meydana gelmiştir. İki deney haricindeki deneylerde SD filtresindeki yük kaybı ADF sistemindekinin 1-1.6 katı olarak ölçülmüştür.
13. Deney matriksinde yer alan deneylerden dört tanesi farklı sıcaklıklarda tekrarlanmıştır. Dört deney, ham su sıcaklığının 20-22 °C civarlarında olduğu yaz aylarında yürütülmüşken, aynı dört deney 8-10 °C sıcaklıklarındaki ham su ile kış aylarında yapılmıştır. Her iki mevsimde de, ADF sisteminde daha az yük kaybı elde edilmiştir. Bununla birlikte yaz mevsiminde yapılan deneylerde de aynı filtrasyon sürelerinde daha düşük su seviyeleri kaydedilmiştir. Bu sonuçlar da tez kapsamındaki diğer sonuçlarla uyum gösterirken, literatürdeki diğer bazı geçmiş çalışmaların sonuçlarıyla da örtüşmektedir [Dabrowski and Mackie 1994].

6.2. Su Kalitesi Açısından Sonuçlar

1. Bu çalışmada ADF sistemi ile SD filtresi benzer kalitede çıkış suyu üretmiş, ADF'de çıkış suyu bulanıklığı % 1 daha düşük ölçülmüştür. Bu farklılık az gibi gözükse de bulanıklık standardının 0.1 NTU olması durumunda; SD filtresi ile standardın üzerinde bulanıklıkta çıkış suyu elde edilmesine rağmen aynı şartlarda ADF'nin sözkonusu standardı sağladığı deneyler de mevcuttur.
2. Parçacık gideriminde de ADF sistemi bulanıklık giderimindekine benzer şekilde % 1 mertebesinde daha iyi kalitede çıkış suyu üretmiştir. Parçacık gideriminde yüksek yüzde değerlerinde verimler elde etmek, filtre çıkış suyuna hastalık yapıcı mikroorganizmaların karışmadığından emin olabilmek açısından büyük önem

taşımaktadır. Bu çalışmanın öncelikli amacı halk sağlığına yönelik ve standartları sağlamış yüksek kalitede filtre çıkış suyu üretmek olmamasına rağmen standartlara yakın verimlerde parçacık giderimleri elde edilmiştir. İlâve kimyasallar kullanılarak bu değerler standartlara yükseltilebilir.

3. Filtre çıkış suyu kalitesine sıcaklığın etkisi, dört deneyin yaz ve kış mevsimlerinde tekrarlanmasıyla incelenmiştir. Yaz mevsiminde ham su sıcaklığı 20-22 °C iken, kış mevsiminde 8-10 °C ölçülmüştür. Her iki mevsimde de, gerek ortalama bulanıklık ve parçacık sayısı değerleriyle, gerekse de geri yıkamanın hemen sonrasında elde edilen pik değerleriyle ADF sistemi çıkış suyu kalitesi açısından SDF sisteminden biraz daha avantajlı bulunmuştur. Bununla birlikte yaz mevsiminde yapılan deneylerde daha iyi kalitede su elde edilmiştir. Bu sonuçlar da tez kapsamındaki diğer sonuçlarla uyum gösterirken, literatürdeki diğer bazı geçmiş çalışmaların sonuçlarıyla da örtüşmektedir [Jackson 1980, Dabrowski and Mackie 1994].

Bu çalışmanın tüm sonuçları birlikte değerlendirildiğinde benzer çıkış suyu kalitesi elde edilen iki filtre sisteminden ADF'nin aynı deney şartlarında daha az yük kaybı meydana getirdiği görülmüştür. Filtredeki düşük yük kayıpları filtrasyon süresini uzatmakta ve uzun filtrasyon süreleri de geri yıkama sıklığını azaltmaktadır. Geri yıkama sıklığının/sayısının azalması da su tüketimini ve enerji gereksinimini azaltacaktır. Ayrıca düşük yük kayıplarında filtre tank duvarlarının daha yüksek yapılmasına da ihtiyaç kalmayacaktır ve bu durum işletme maliyetlerinin minimize edilmesi bakımından önem taşımaktadır. Ayrıca ADF sisteminin SDF'de olduğu gibi debi kontrol cihazları içermemesi, işletme ve bakım maliyetlerini azaltan bir diğer husustur. Bununla birlikte otomasyon ve kontrol cihazlarının arıza yapması sonucu

giriş-çıkış debi dengesinin sağlanabilmesindeki zorluklar ve operatörün müdahalesi neticesinde su kalitesinde meydana gelebilecek bozulmalar SDF'de karşılaşılması muhtemel dezavantajlardır. Bu bakımdan ADF sistemi SDF sistemine göre avantajlı bir alternatif olarak gözükmektedir.

Literatürdeki ADF tasarım ve modelleme çalışmalarındaki ampirik denklemlerde yaygın olarak kullanılan kabullerin bazıları bu tez çalışması kapsamında detaylı bir deney matrisi kullanılarak doğrulanmış, bazılarının ise her zaman doğru kabuller olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu neticelerden hareketle, bir ADF sistemi tasarlanırken/inşa edilirken, tesisin kurulacağı şartlar altında (ham su özellikleri, kullanılacak yumaklaştırıcı dozajı, filtrasyon hızı, işletme süresi vs.) pilot ölçekte SD filtresinin/filtrelerinin bir süre müddetle işletilerek veri toplanması faydalı olacaktır. Böylelikle içme suyu arıtma tesislerinde ADF kullanımı yaygın hale getirilebilecektir.

KAYNAKLAR

Adin, A., Rebhun, M., 1977. A Model to Predict Concentration and Headloss Profiles in Filtration, Journal AWWA, 69, 444-453.

Akgiray Ö., and Saatçi A.M., 1997. Büyükçekmece Filtrelerinin Azalan Debiliye Dönüştürülmesi, İSKİ Su Kaynaklarının Korunması ve İşletilmesi Sempozyumu, 2-3, İstanbul, Haziran.

Akgiray Ö., and Saatçi A.M., 1998a. An Algorithm for Bank Operation of Declining Rate Filters, Water Research, 32 (7), 2095-2105.

Akgiray, Ö., and Saatçi A.M., 1998b. A Critical Look At Declining Rate Filtration Design, Water Science and Technology, 38 (6), 89-96.

Akgiray, Ö., Saatçi, A.M., 1996. Azalan Debili Filtrasyon, İSKİ/İTÜ İçme Suyu Sempozyumu, İstanbul, 7-10 Ekim.

Akgiray, Ö., Saatçi, A.M., 2000. Evaluation of design methods for declining rate filtration. IV. International Conference Water Supply and Water Quality, Krakow Poland, September, 11-13th.

American Water Works Association (AWWA) Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies, 4th edition. McGraw-Hill Inc., New York. (1990).

Arboleda, J., 1974. Hydraulic control systems of constant and declining rate in filtration, Journal AWWA, 66 (2), 87-94.

Arboleda, J., Giraldo, R., Snel, H., 1985. Hydraulic behaviour of declining rate filtration, Journal AWWA, 77 (12), 67-74.

Aultman, W.W., 1959. Valve Operating Devices and Rate-of-Flow Controllers, Journal AWWA, 51 (11), 1467.

AWWA Filtration Committee, 1984. Committee Report: Comparison of Alternative Systems for Controlling Flow Through Filters. Journal AWWA, 76 (1), 91-95.

Babu, R., Chaudhuri, M., 2005. Home water treatment by direct filtration with natural coagulant, Journal of Water and Health, 3 (1), 27.

Baylis, J.R., 1958. Surges in the Flow of water through filters, Pure Water, 10 (5), 77-97.

Baylis, J.R., 1959. Variable Rate Filtration, Pure Water, 11 (5), 86-114.

Bishop, M.M., 1989. Personal communication.

Bryant, E.A., 1974. Variable Rate Filtration-Principles, Design and Operation, Water Sewage Works, 121 (12), 40-44.

Camp, T.R., 1964. Theory of Water Filtration, Journal of the Sanitary Engineering Division-ASCE, 90 (SA4).

Cams, K.E., Parker, J.D., 1975. Using Polymers with Direct Filtration, Journal AWWA, 67, 44.

Chaudhry, F. H., 1987. Theory of Declining Rate Filtration. I. Continuous Operation," by (Paper 21741, Journal of Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 113 (4), 834-851.

Chaudhry, F.H., 1987b. Theory of declining rate filtration: II. Bank operation. Journal Environmental Eng. Div., ASCE, 113 (4), 852-867.

Clark, S., Lawler, D.F., Cushing, R.S., 1992. Contact Filtration, Particle Size and Ripening, Journal AWWA, 84 (12), 61.

Cleasby, J. L. and Logsdon, G. S., 1999. Granular bed and precoat filtration. In: R. D. Letterman, ed. Water Quality and Treatment. McGraw-Hill Inc., New York.

Cleasby, J.L., 1969. Filter Rate Control Without Controllers, Journal AWWA, 61 (4), 181-185.

Cleasby, J.L., 1972. New Ideas in Filter Control Systems, Memorias del Simposio sobre Nuevos Métodos de Tratamiento de Aqua. Asunción, Paraguay. CEPIS/PAHO (Aug. 1972).

Cleasby, J.L., 1972. Variable Declining Rate Filtration: Case History. Memorias del Simposio sobre Nuevos Métodos de Tratamiento de Agua, Asunción, Paraguay, CEPIS/PAHO, August.

Cleasby, J.L., 1981. Declining Rate Filtration, Journal AWWA, 73 (9), 484-489, 9.

Cleasby, J.L., 1993. Status of declining rate filtration design, Water Science Technology, 27, 151-164.

Cleasby, J.L., Baumann, E.R., 1962. Selection of sand filtration rates, Journal AWWA, 54 (5), 579-602.

Cleasby, J.L., Di Bernardo, L., 1980. Hydraulics considerations in declining rate filtration, Journal of the Environmental Engineering Division-ASCE, 106, 1043-1055.

Cleasby, J.L., Hilmoe, D.J., Dimitracopoulos, C., Diaz-Bossio, L.M., 1984. Effective Filtration Methods for Small Water Supplies. Iowa State Univ., Ames. Dept. of Civil Engineering.;Municipal Environmental Research Lab., Cincinati, OH. Report Number: EPA-R-808837; EPA-600/2-84-088.

Cleasby, J.L., Williamson M.M., Baumann, E.R., 1963. Effect of filtration rate changes on filtration quality, Journal AWWA, 55 (7), 869.

Collins, M.R., Amy, G.L., Bryant, C.W., 1987. Evaluation of Factors Affecting Performance of Direct Filtration, Journal of Environmental Engineering, 113 (2), 330.

Cornwell, D.A., Bishop, M.M., Bishop, T.R., McTigue, N.E., Rolan, A.T., Bailey, I.W., 1991. Full-Scale Evaluation of Declining and Constant Rate Filtration. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, Denver, Colorado.

Cornwell, D.A., Bishop, M.M., Dunn, H.J., 1984. Declining-rate filters, regulatory aspects and operating results, Journal AWWA, 76 (12), 55-61.

Dąbrowski, W., 2006. The progression of flow rates in variable declining rate filter systems, Acta Hydrochimica et Hydrobiologica, 34, (1), 442-452.

Dąbrowski, W., 2011. Rational operation of variable declining rate filters, Environ. Prot. Eng. 37 (4) (2011) 35-53.

Dąbrowski, W., Mackie, R. I., 1994. Influence of Temperature on the Performance of Variable Declining Rate Filters for Drinking Water, Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 41 (3-4), 37-51.

Dąbrowski, W., Mackie, R.I., 1997. Dynamics of Variable Declining Rate Filters during Backwash, Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 44 (1-4), 69-83.

Dąbrowski, W., Mackie, R.I., Zielina, M., 2002. Application of a Combined UBE - Phenomenological Model to a Variable Declining Rate Filter Plant Design, 5th International Conference on Hydro-Science & Engineering, Warsaw. September.

Daniel, K., Nix, John Scott Taylor, 2003. Filter evaluation procedures for granular media, Journal AWWA (ISBN 1 58321 235 3).

Di Bernardo, L., 1986. A Rational Method of Design of Declining Rate Filters, 4th World Filtration Congress, held at Ostend, Belgium, April.

Di Bernardo, L., 1987. Designing declining-rate filters. Filtration and Separation, 24, 338-341.

Di Bernardo, L., Cleasby, J.L., 1980. Declining-rate versus constant-rate filtration, Journal of the Environmental Engineering Division-ASCE, 106 (EE6), 1023-1041.

Droste, R. L., 1997. Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment. John Wiley & Sons, New York.

Duran, M., Demirer, G. N., 1997. Su Arıtımında Temel İşlemler. TMMOB Çevre Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.

Ebie, K., Amano, S., 1993. Fundamental Behavior of Humic Acid and Kaolin in Direct Sand Filtration of Simulated Natural Surface Water, Water Science and Technology, 27 (11), 61.

Edwards, G.A., Amirtharajah, A., 1985. Removing color caused by humic acids, Journal AWWA, 77 (3), 50.

Edzwald, J.K., Belker, W.C., Tambini, S.J., 1982. Aspects of direct filtration in treatment of low turbidity, humic water, Water Filtration International Symposium, Antwerp, Belgium.

Eikebrokk, B., 1982. Coagulation-direct filtration for the removal of humic substances from drinking water (In Norwegian). Ph.D. Dissertation. Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.

Eikebrokk, B., Juhna T., Østerhus, S. W., 2007. Water treatment by enhanced coagulation – Operational status and optimization issues, Quality Assurance By consortium of WP5, Deliverable number: D 5.3.1 A, TECHNEAU Publishing.

Elimelech, M., Gregory, J., Jia, X., Williams, R., 1995. Particle deposition and aggregation –measurement, modelling and simulation. Butterworth Heinmann, Oxford.

Eyvaz, M., Aktaş, T.S., Yüksel, E., Saatçi, A.M. 2011. Effects of intermittent polyelectrolyte addition on water quality in direct filtration, Water Quality Research Journal of Canada, 46 (1), 52.

Eyvaz, M., Deniz, H., Aktaş, T.S., Yüksel, E., Saatçi, A.M., 2010. Pre-ozonation coagulant interactions in direct filtration, Water Quality Research Journal of Canada, 45 (3), 317.

Fuller, G.W., 1898. Report on the Investigation Into the Purification of the Ohio River Water at Louisville, Kentucky, D. Van Nostrand, N.Y.

Gitis, V., 2008. Rapid sand filtration of Cryptosporidium parvum: effects of media depth and coagulation. Water Science Technology: Water Supply, 8 (2), 129.

Gölhan, M., Aksoğan, S., Suların Arıtılması Cilt 1, Pimaş Yayınları, 1970, İstanbul.

Gray, R., 1983. Personal communication.

Gregory, R., Yadav, N.P., 1979. Evaluation of Variable Declining Rate Filtration Rate Control for Rapid Gravity Filters, Water Res. Ctr.(Water Resources Centre), LR 970.

Gupta, K. and Hayes, D.J., 1996. Hydraulics of Filters with Emphasis on Declining Rate Filtration. Engineering and Construction Conference, American Water Works Association, March 1996.

Hatukai, S., Ben-Tzur, Y., Rebhun, M., 1997. Particle Counts and Size Distribution in System Design for Removal of Turbidity by Granular Deep Bed Filtration, Water Science Technology, 36, 225.

Hedberg, T., 1976. Flocculation, sedimentation and filtration-a technical and economic analysis of water treatment, PhD thesis, Chalmers University of Technology-Goteborg.

Heertjes, P.M., Lerk, C.F., 1967. The functioning of deep-bed filters. Part 11: The filtration of flocculated suspensions. Trans. Inst. Chem. Eng. 45: T138-TI45.

Hendricks, D. W., 2006. Water Treatment Unit Processes (Physical and Chemical). CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL.

Hilmoe, D.J., Cleasby, J.L., 1986. Comparing constant-rate and declining-rate direct filtration of a surface water, Journal AWWA, 78, 26-34.

Huck, P.M., Coffey, B.M., Emelko, M.B., Maurizio, D.D., Slawson, R.M., Anderson, W.B., Van Den Oever, J., Douglas, I.P., 2002. Effects of filter operation on Cryptosporidium removal, Journal AWWA, 94 (6), 97.

Hudson H. E., Jr., 1956. Factors affecting filtration rates, Journal AWWA, 48 (9), 1138.

Hudson, H. E., Jr., 1959. Declining rate filtration, Journal AWWA, 51, 1455-1463.

Hudson, H. E., Jr., 1963. Functional design of rapid sand filters, Journal of the Sanitary Engineering Division-ASCE, 89 (1), 17-28.

Hudson, H.E., Jr., 1981. Water Clarification Processes, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.

Hudson, H.E., Jr., Hazey, G., 1959. Simplified Rapid Sand Filter System, Water Sewage Works, 106 (10), 448-451.

Huismann, L., Van Dijk, J. C., 1998. Rapid Filtration, University of Technology Press, USA.

Hutchinson, W., Foley, P.D., 1974. Operational and Experimental Results of Direct Filtration, Journal AWWA, 86.

Hutchison, W.R., 1976. High-rate direct filtration, American Water Works Association, 68 (6), 292.

İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi, İstanbul Su Kalitesi Raporu, Mayıs, 2012.

Jackson, G.E., 1980. Granular media filtration in water and wastewater treatment-Part 1, CRC Critical Reviews in Environmental Control, 10 (4), 339-373.

Jackson, N.E., 1955. Study of High-rate filtration at the Dalecarlia Plant, Washington, Journal AWWA, 47 (2), 129.

Johannteter, W., 1983. Personal communication.

Keskinler, B., Çakıcı, A., Yıldız, E., 1994. Çevre Mühendisliği Temel İşlemler ve Prosesler Ders Notları. Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Ders Notları Sayı No: 35, Erzurum.

Khan, Z., Thiem, T.L.T., 2006. Optimizing Coagulation and Direct Filtration Processes For Low Turbidity, Low Temperature Waters, Electronic Journal Environmental Agricultural Food Chemistry, 5 (3), 1395.

Lawler, D.F., Izurieta, E., Kao, C.P., 1983. Changes in particle size distributions in batch flocculation, Journal AWWA, 75 (12), 604.

Logsdon, G.S., Symons, J.M., Hoye, R.L., Jr., Arozarena, M.M., 1981. Alternative Filtration Methods for Removal of Giardia Cysts and Cyst Models, Journal AWWA, 73 (2), 111-118.

Mackie I., Zielina M., Dąbrowski W., 2003. Filtrate quality from different filter operations, Acta Hydrochimica et Hydrobiologica, 31 (1), 25-35.

Mackie R.I., Zhao Q., 1999. A framework for modelling removal in the filtration of polydisperse Suspensions, Water Research, 33 (3), 794-806.

Masschelein, W. J., 1992. Unit Processes In Drinking Water Treatment. Marcel Dekker Inc., 270 Madison Avenue, New York, USA.

McBride, D.G., Siemak, R.C., Tate, C.H., Trussell, R.R., 1977. Pilot plant investigations for treatment of Owens River water. Proc. AWWA National Conf, California, 14A-3, 1.

McCormick, R.F., King, P.H., 1982. Factors that Affect Use of Direct Filtration in Treating Surface Waters, Journal. AWWA, 74 (5), 234.

Miller, H.J., Declining Rate Filter Systems and Methods, United States Patent, Patent Number: 5,137,645. Aug. 11, 1992.

National Research Council (NRC), 1997. Safe Water from Every Tap: Improving Water Service to Small Communities, National Academy Press, Washington DC, USA.

Nieminski, E.C., Ongerth, J.E., 1995. Removing Giardia and Cryptosporidium by Conventional Treatment and Direct Filtration, Journal AWWA, 87 (9), 1996.

O'Connor, J.T., O'Connor, T.L., 2002. Rapid Sand Filtration in Control of Microorganisms in Drinking Water (Ed. S. Lingireddy), Chapter 8, ASCE Publications, Reston, Virginia, 127.

OECD and WHO, Non-microbial Parameters, in Assessing Microbial Safety of Drinking Water: Improving Approaches and Methods (Eds: A. Dufour, M. Snozzi, W. Koster, J. Bartram, E. Ronchi, L. Fewtrell), Chapter 2.3, World Health Organization and the Organisation for Economic Co-operation and Development, IWA Publishing, London, UK 2003.

Opachak, L., 1983. Personal communication.

Parsons, S. A., Jefferson, B., 2006. Introduction to Potable Water Treatment Process. Blackwell Publishing, Oxford, UK.

Pelekani, C., Drikas, M., Bursill, D. B., 2006.Application of direct filtration to MIEX treated river murray water. Australian Water Quality Centre.

Petrusevski, B., 1996. PhD Thesis, Technical University of Delft, Delft, The Netherlands.

Reynolds, T. D., Richards, P. A., 1996. Unit Operations and Processes in Environmental Enginering, Second Edition. PWS Publishing Company, Boston, MA.

Richard, P., 2005. Filter troubleshooting and design handbook, Journal AWWA Beverly (ISBN 1 58321 349 X) (337 pgs)

Robeck, G., Kreissl, J.F., 1967. Multimedia Filtration: Principles and Pilot Experiments, Transactions of the Seventeeth Annual Conference on Sanitary Engineering, University of Kansas.

Robeck, G.G., Clarke, N.A., Dostal, K.A., 1962. Effectiveness of water treatment processes in virus removal, Journal AWWA, 54 (10), 1275.

Rogers, M.E., 1964. Effect of Control Systems on Filter Performance, Journal AWWA, 56 (7), 907-914, July.

Rogers, M.E., Trends in Filter Design and Operation-Their Effect on Equipment Selection, presented at the 1963 Canadian Section of the American Water Works Association, held at Quebec, Canada.

Rose, J.B., 1988. Occurrence and Significance of Cryptosporidium in Water, Journal AWWA, 80 (2), 53-58.

Saatçi, A.M., 1989 Harmonic Mean Conductivity in Declining Rate Filters, Journal of Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 115, (2), 462-466, April.

Saatçi, A.M., 1990. Application of Declining Filtration Rate Theory-Continuous Operation, Journal of Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 116, (1), 87-105, February.

Saatçi, A.M., and Oulman, C.S., 1979. BDST Method for Deep Bed Filtration, World Filtration Congress II, London, 193-199, September.

Sanks, R. L., 1982. Water Treatment Plant Design Fort he Practising Engineer, Ann Arbor Science Publishing Inc. Ann Arbor, MI.

Shea, T.G., Gates, W.E., Argaman, Y.A., 1971. Experimental Evaluation of Operating Variables in Contact Flocculation, Journal AWWA, 63 (1), 41.

Soyer, E., Akgiray, Ö., Eldem, N.Ö., Saatçi, A.M., 2010. On the use of crushed recycled glass as a filter medium and comparison with silica sand, CLEAN - Soil, Air, Water, 38 (10), 927.

Tanaka, T.S., McGuire, M.J., Pirbazari, M., 1984. Prediction of direct filtration performance, Proc. Ann. ASCE Environ. Eng. Conf, New York. 94-100.

Tanaka, T.S., Pirbazari, M., 1986. Effects of Cationic Polyelectrolytes on the Removal of Suspended Participated during Direct Filtration, Journal AWWA, 78 (12), 57.

Tuepker J. L., 1965. Filter Performance Under Varying Operating Conditions. Proceeding Conference Water Filtration, Univ. Missouri at Rolla.

Tuepker, J., 1983. Personal communication.

U.S. Environmental Protection Agency. 2002. Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule: Quick Reference Guide. Office of Water (4606) EPA 816-F-02-001.

US EPA, 1999. EPA Guidance Manual, Turbidity Provisions, April, 1999, Washington, D.C.

US EPA, Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule Turbidity Provisions Technical Guidance Manual Office of Water (4606M) EPA 816-R-04-007 August 2004.

US, EPA, Drinking Water Contaminants, US EPA, Washington, DC 2009.

US, EPA, Economic Analysis for the Filter Backwash Recycling Rule, Diane Publishing, Darby, PA 2001.

US, EPA, Small System Compliance Technology List for the Nonmicrobial Contaminants Regulated before 1996, Diane Publishing, Darby, PA 1998.

USEPA, 1997. Occurrence Assessment for the Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule, Final Draft. Office of Ground Water and Drinking Water, Washington, D.C.

Van Der Walt, C.J., Ceronio, A., 1998. Declining Rate Filtration at the Cullinan Water Treatment Plant-A Case Study, WISA Biennial Conference & Exhibition, Cape Town.

Visscher, J. T., 1990. Slow sand filtratio: design, operation and maintenance. Journal AWWA, 82 (6), 67-71.

Wagner, E.G., Hudson, H.E., Jr., 1982. Low-dosage, high-rate direct filtration, Journal AWWA, 74 (5), 256.

Water treatment: Principles and design, MWH (2005), (ISBN 0 471 11018 3) (1948 pgs).

Yeh, H.H., Ghosh, M.M., 1981. Selecting Polymers for Direct Filtration, Journal AWWA, 73 (4), 211.

Yüksel, E., Eyvaz, M., Aktaş, T.S., Saatçı, A.M., 2011. A new polyelectrolyte dosing method: Injection into deep bed filter media, CLEAN - Soil, Air, Water, 39 (8), 750.

Zielina M., Dąbrowski W., Mackie I., 2005. Laboratory and full scale verification of an optimisation approach to VDR Filter plants, Proceedings on the International Conference & Exhibition for Filtration and Separation Technology "FILTECH", Wiesbaden, 1, 386-393.

Zielina, M., Dąbrowski, W., Mackie, R. I., 2002. Empirical Verification of an Optimisation Approach to a VDR Filter Plant Operation, 5th International Conference on Hydro-Science & Engineering, Warsaw, September.

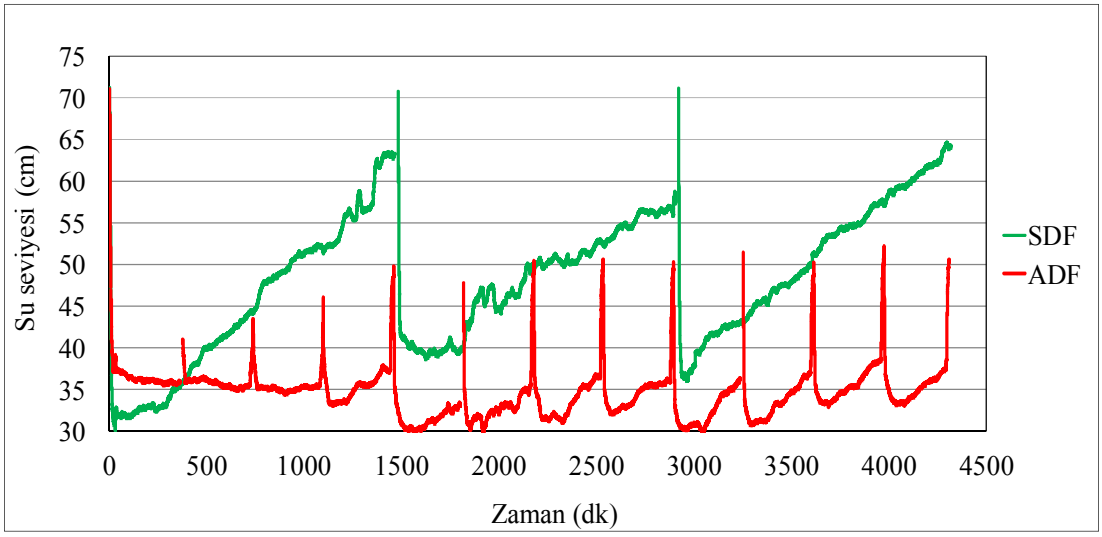
Zielina, M., Dąbrowski, W., Mackie, R.I., 2003. Analiza numeryczna wplywu temperatury wody na eksploatacje filtrow o skokowo zmiennej wydajnosci (VDRF), Ochrona Srodowıska, 4, 57-60.

ÖZGEÇMİŞ

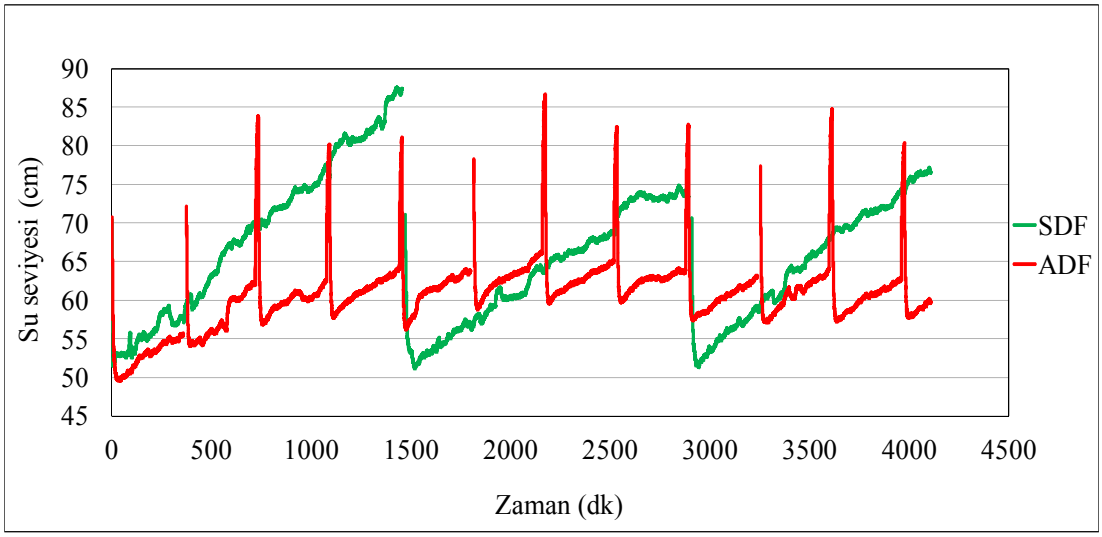
1982 yılında Ankara'da doğan Murat EYVAZ ilk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde lisans programını bitirdi. 2004-2005 güz döneminde Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans programından 2006 yılında mezun olarak aynı yıl aynı bölümde doktora programına başladı. 2005-2006 güz yarıyılında araştırma görevlisi olarak atandığı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümü'nde akademik çalışmalarına devam etmektedir.

EKLER

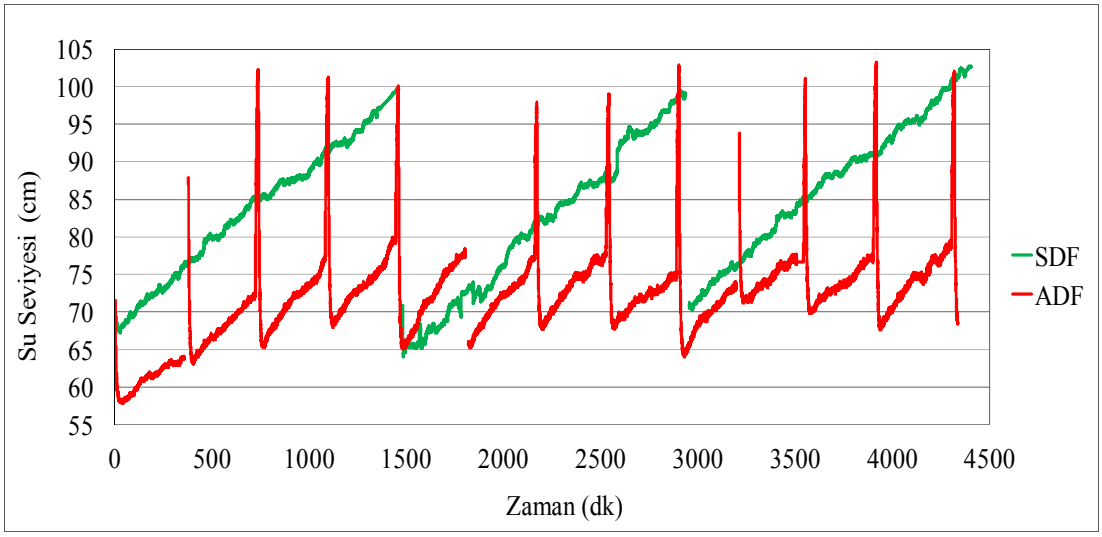
EK-A. Filtrasyon süresince filtrelerde su seviyesi ölçümlerini gösteren grafikler



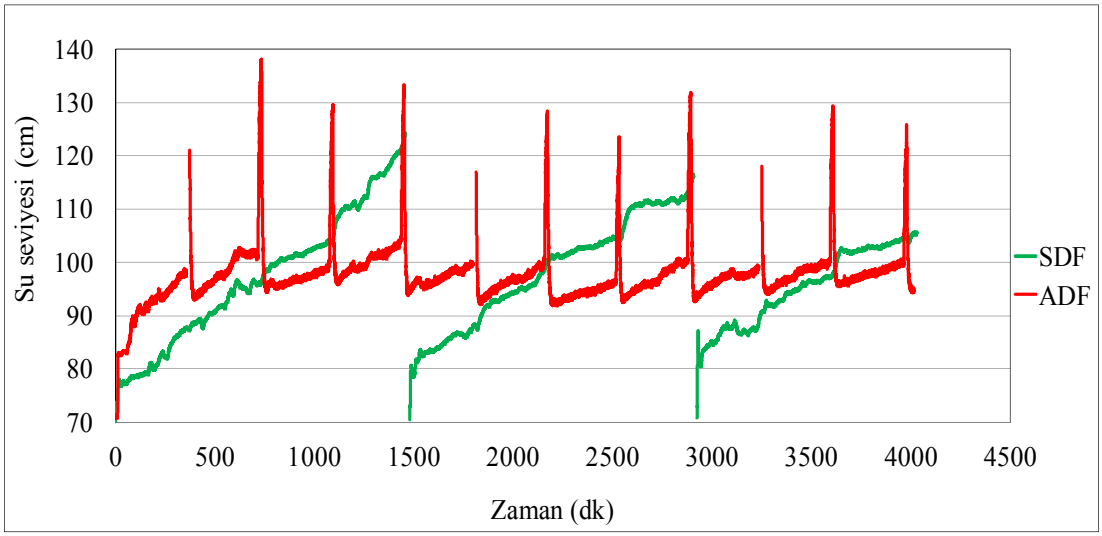
Şekil A.1. Deney 1'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.92 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



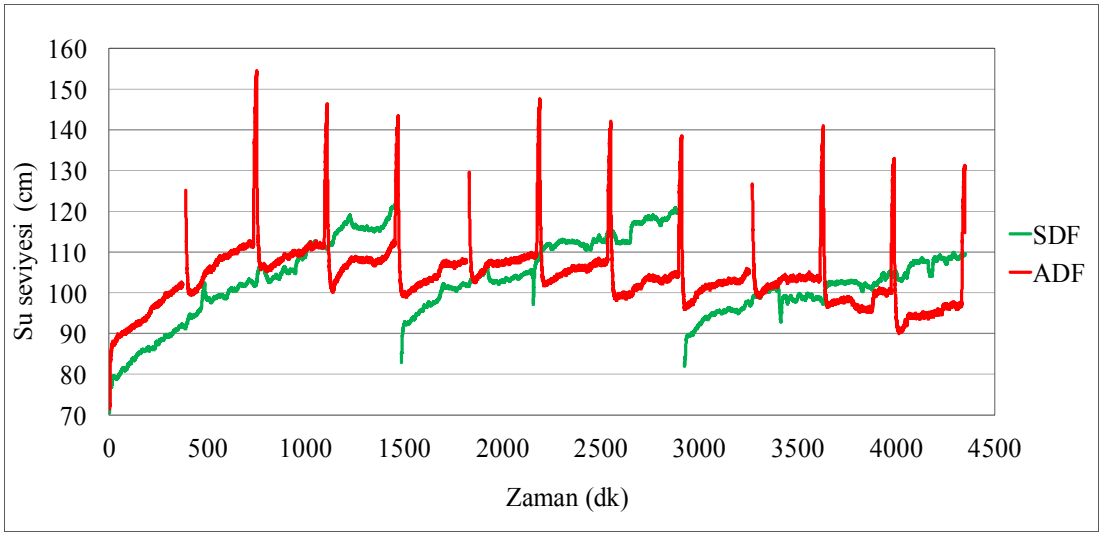
Şekil A.2. Deney 2'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



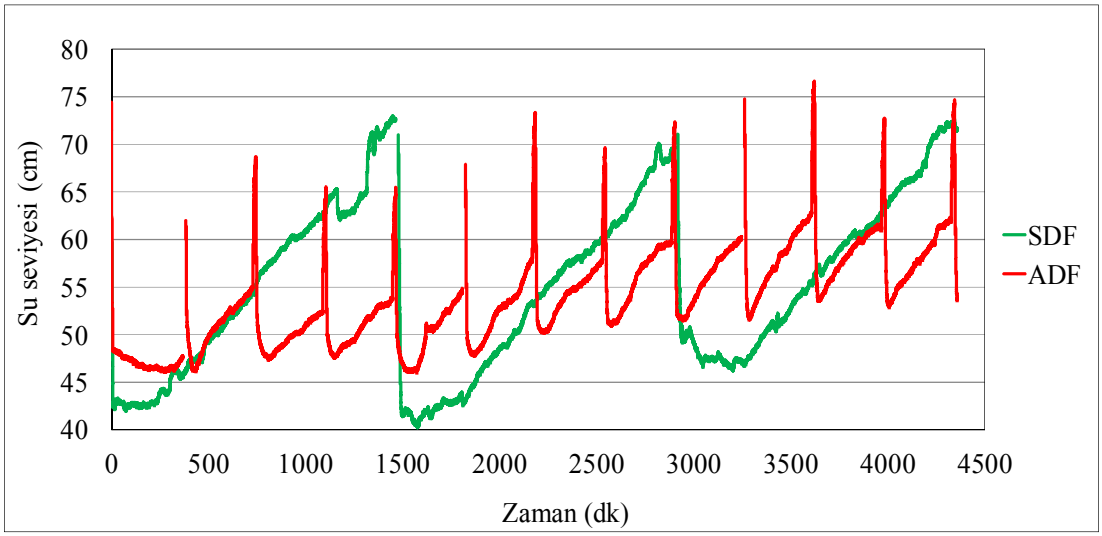
Şekil A.3. Deney 3'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



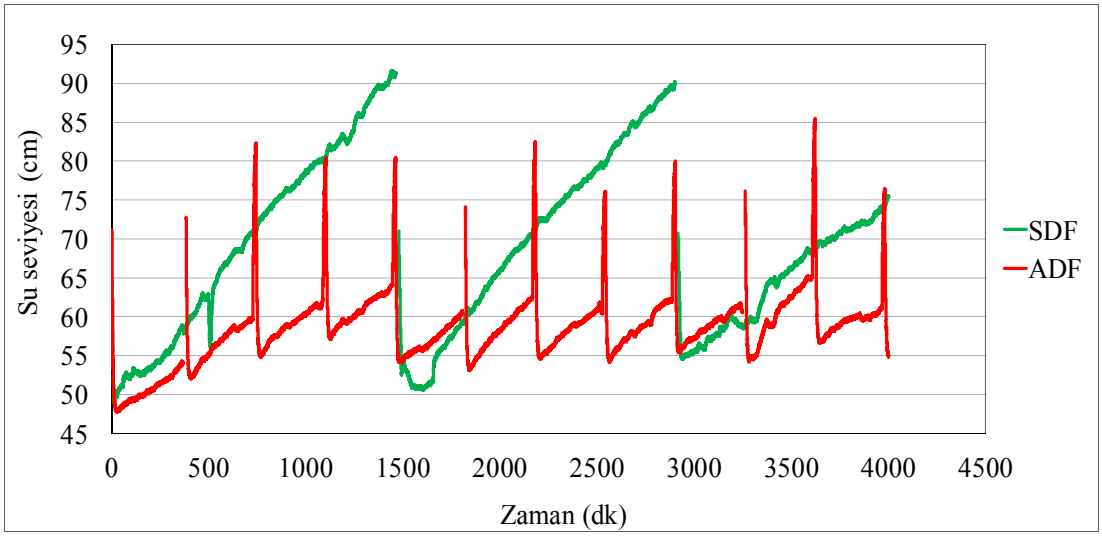
Şekil A.4. Deney 4'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 10.01 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



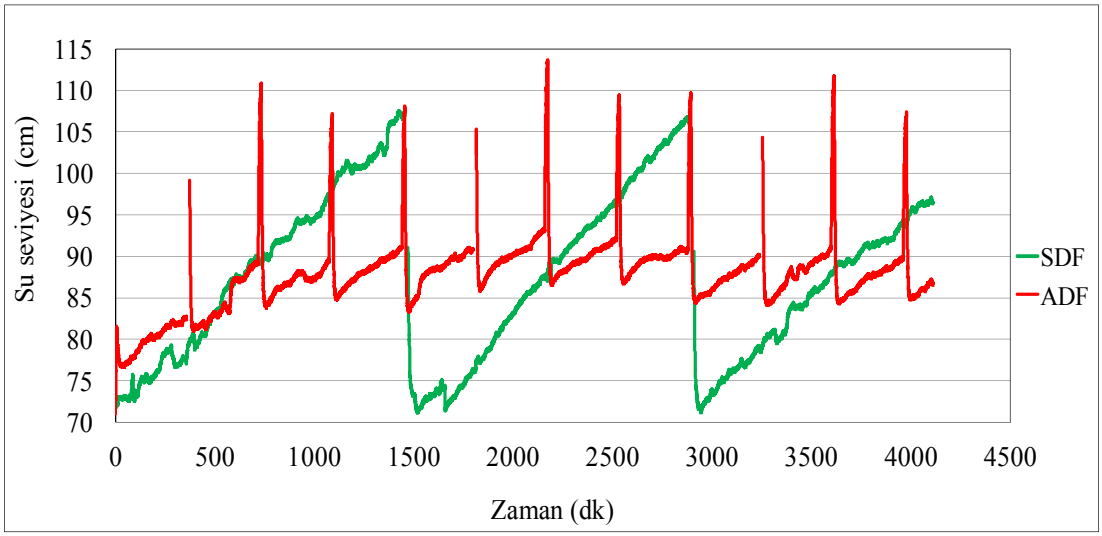
Şekil A.5. Deney 5'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 10.67 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).



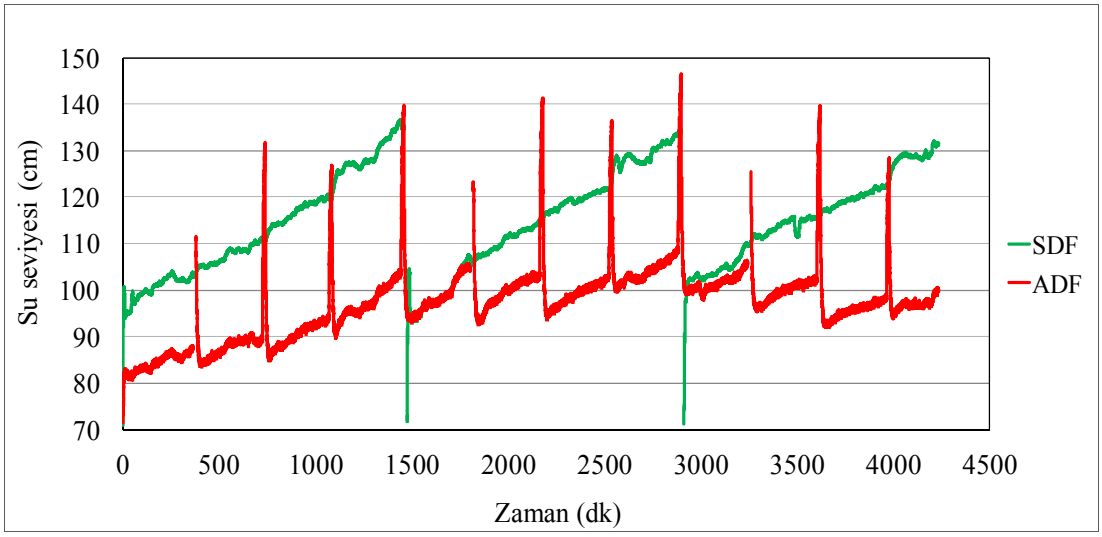
Şekil A.6. Deney 6'da filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.99 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



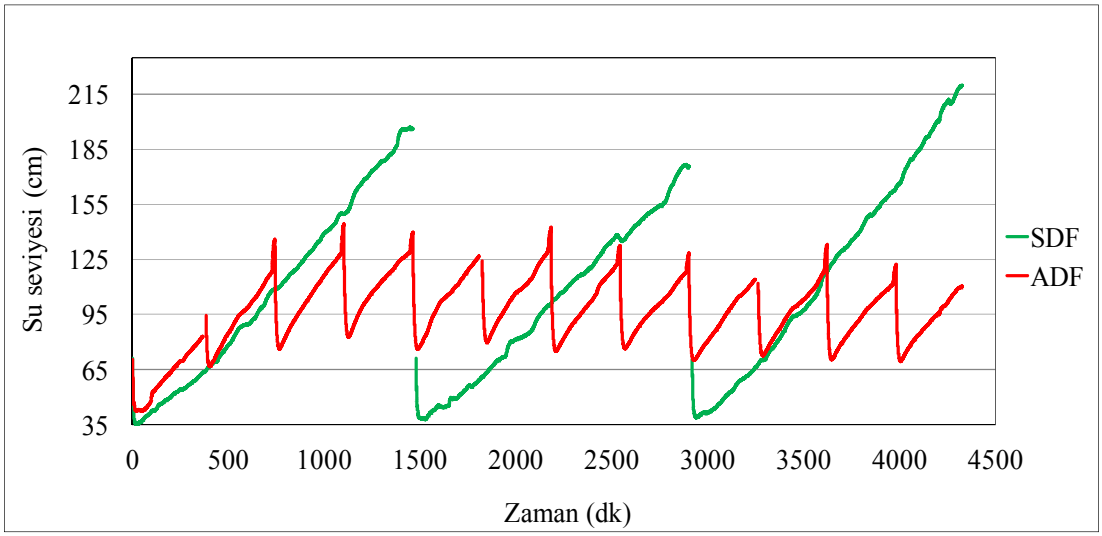
Şekil A.7. Deney 7'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 10.02 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



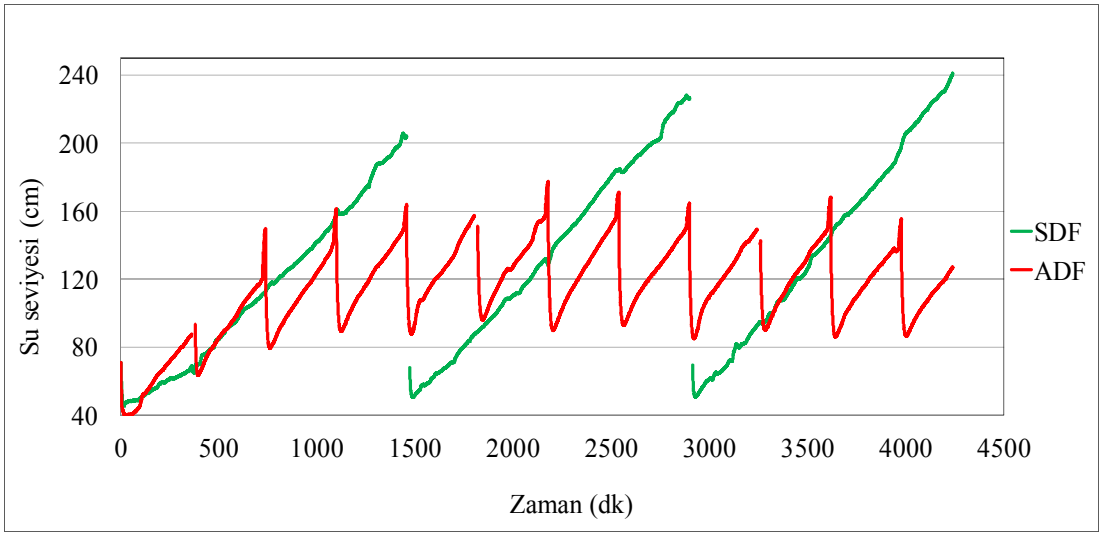
Şekil A.8. Deney 8'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.93 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



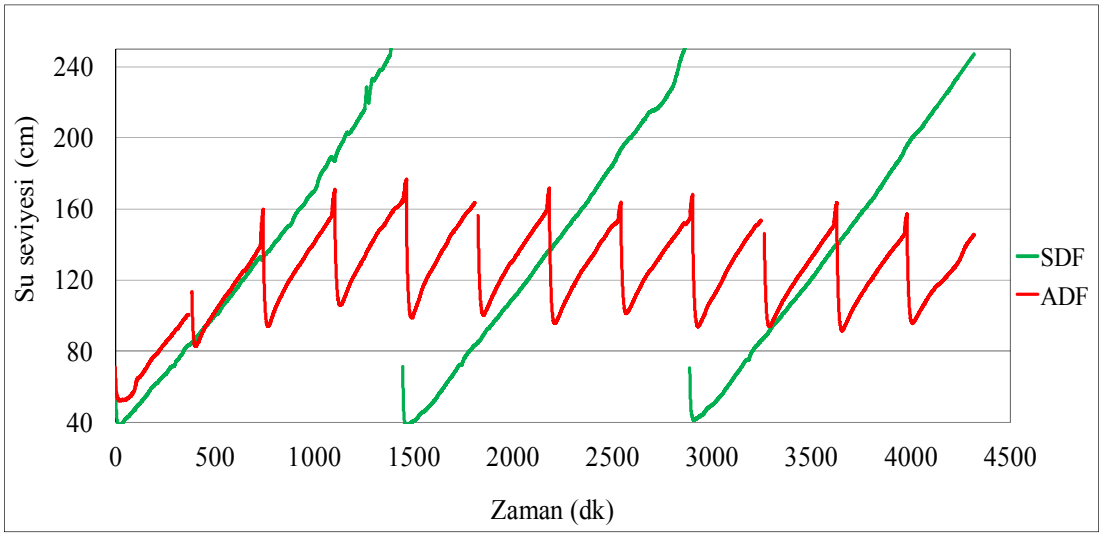
Şekil A.9. Deney 9'da filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.6 m/sa).



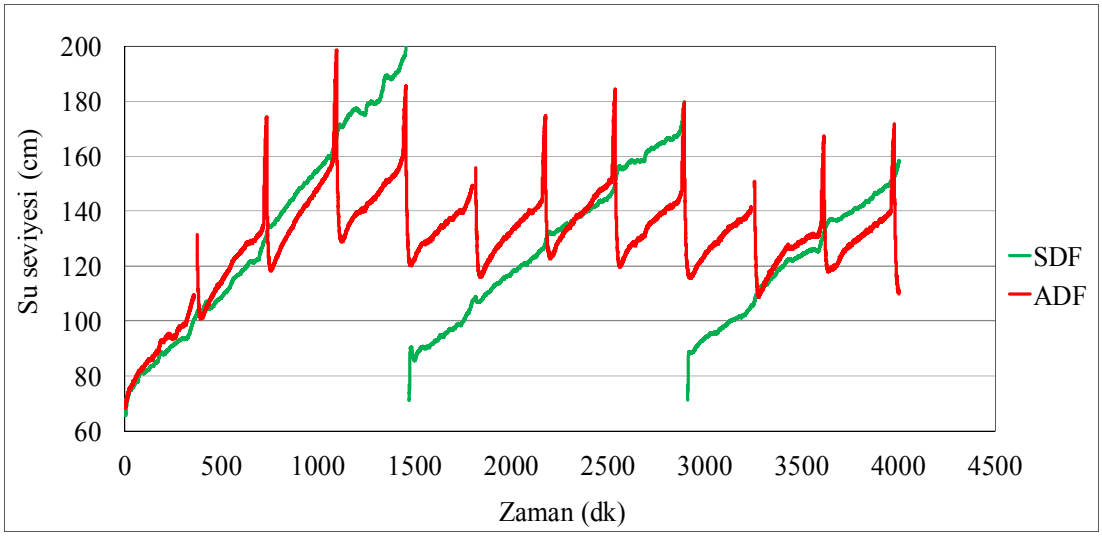
Şekil A.10. Deney 10'da filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa).



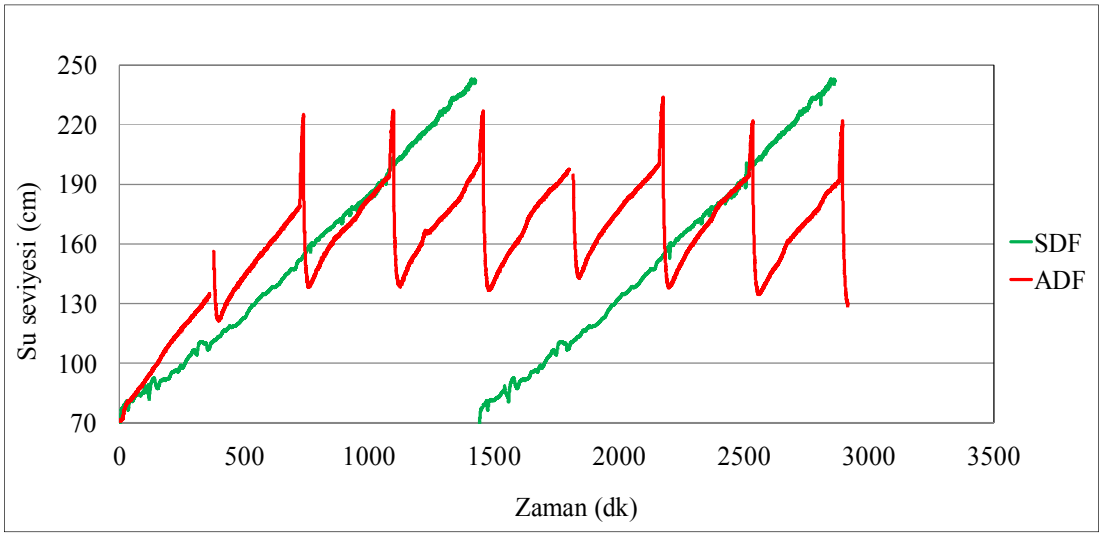
Şekil A.11. Deney 11'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.85 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



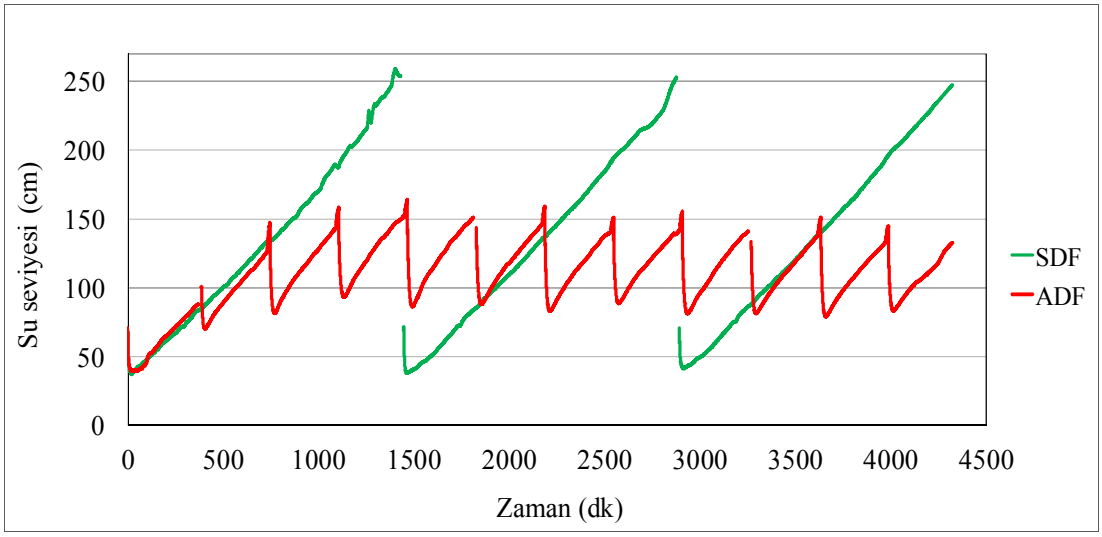
Şekil A.12. Deney 12'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 10 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



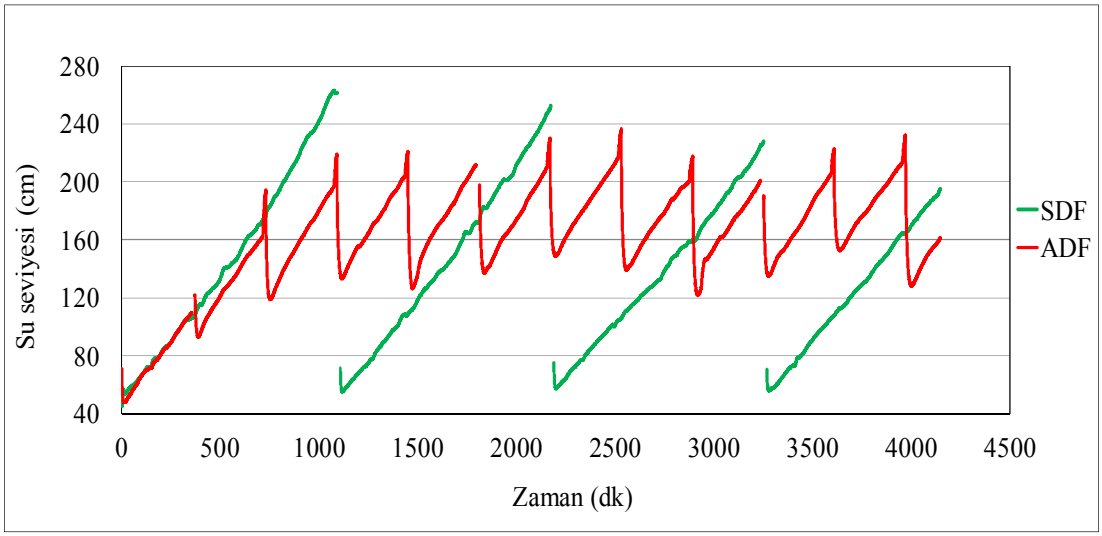
Şekil A.13. Deney 13'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.95 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



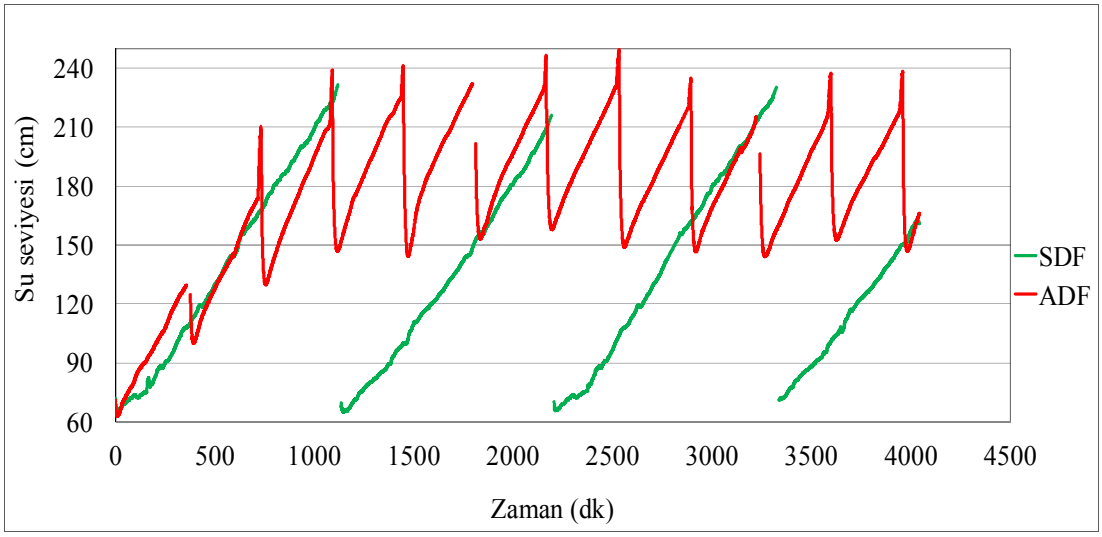
Şekil A.14. Deney 14'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.46 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.4 m/sa).



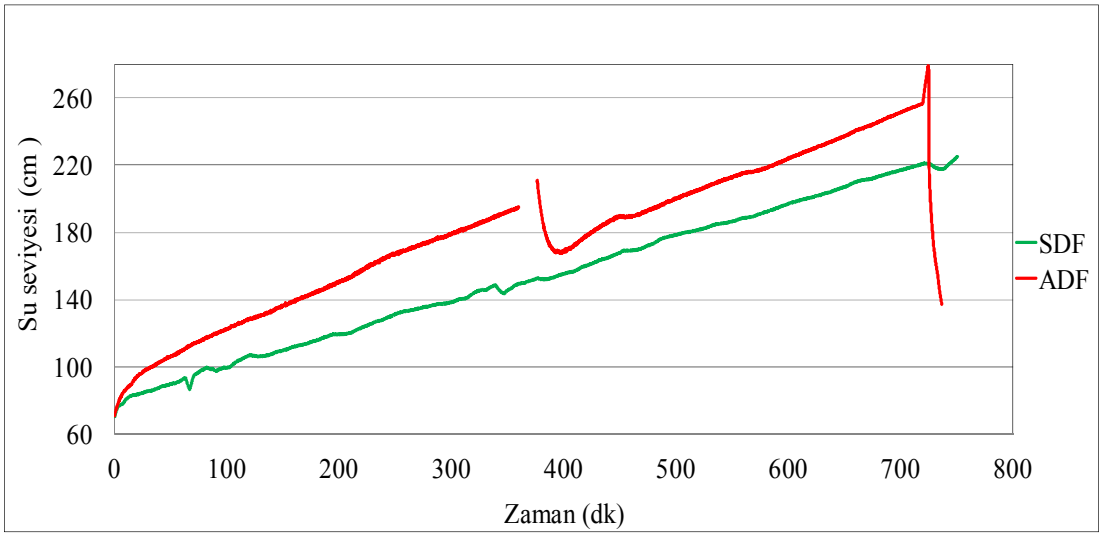
Şekil A.15. Deney 15'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.90 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



Şekil A.16. Deney 16'da filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.87 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).

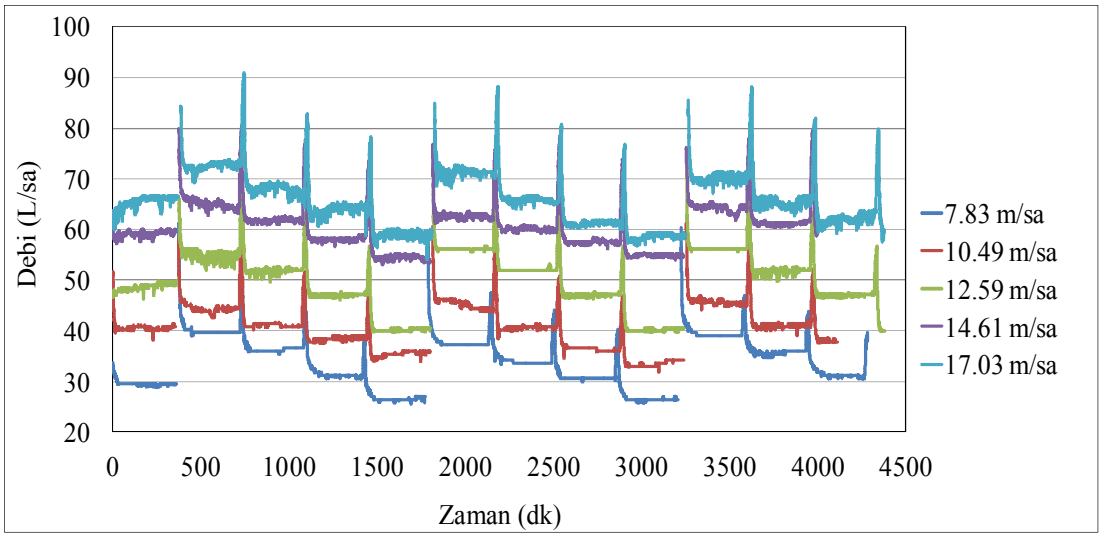


Şekil A.17. Deney 17'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).

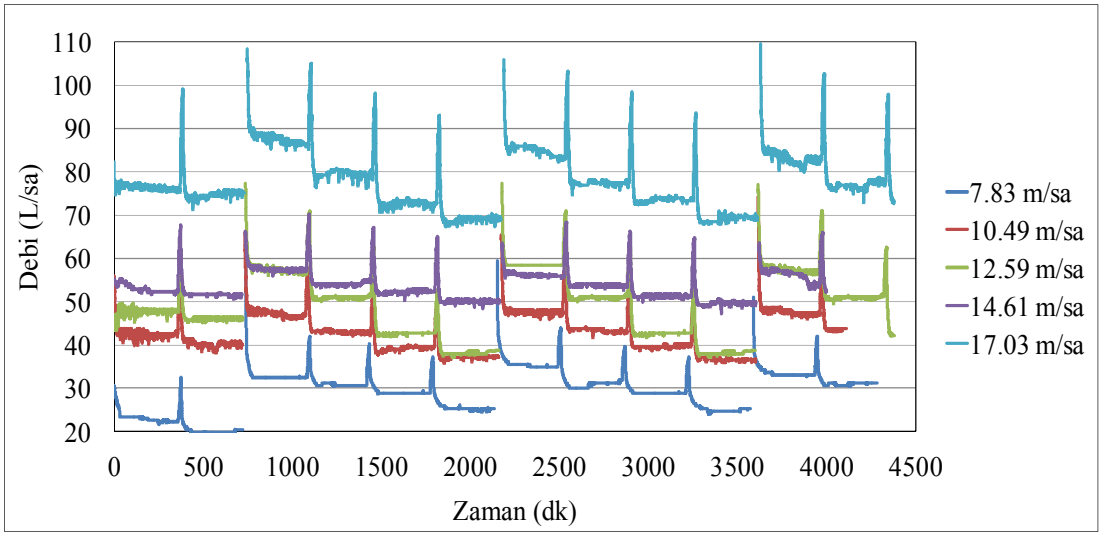


Şekil A.18. Deney 18'de filtrasyon süresince farklı filtre sistemleri için su seviyesinin değişimi (ham su bulanıklığı: 9.30 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).

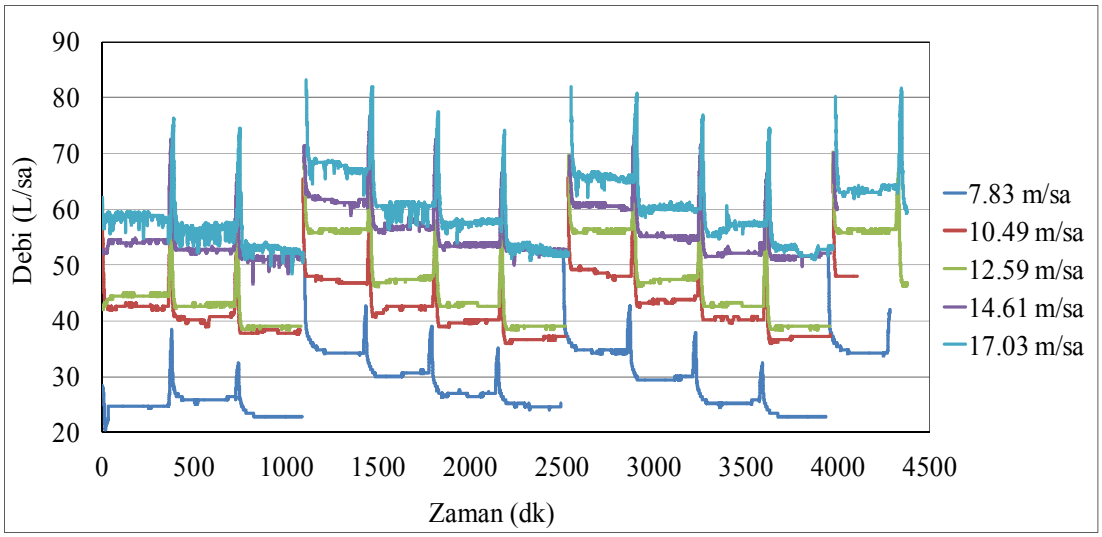
EK-B. Filtrasyon süresince azalan debili filtrelerin her birinde farklı ortalama filtrasyon hızlarında debi ölçümlerini gösteren grafikler



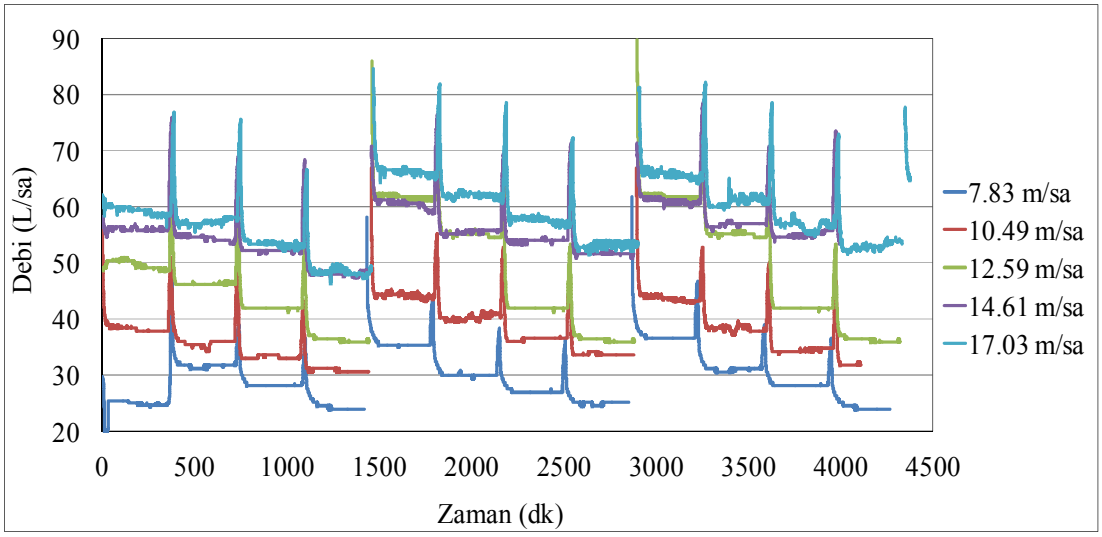
Şekil B.1. ADF 1'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L).



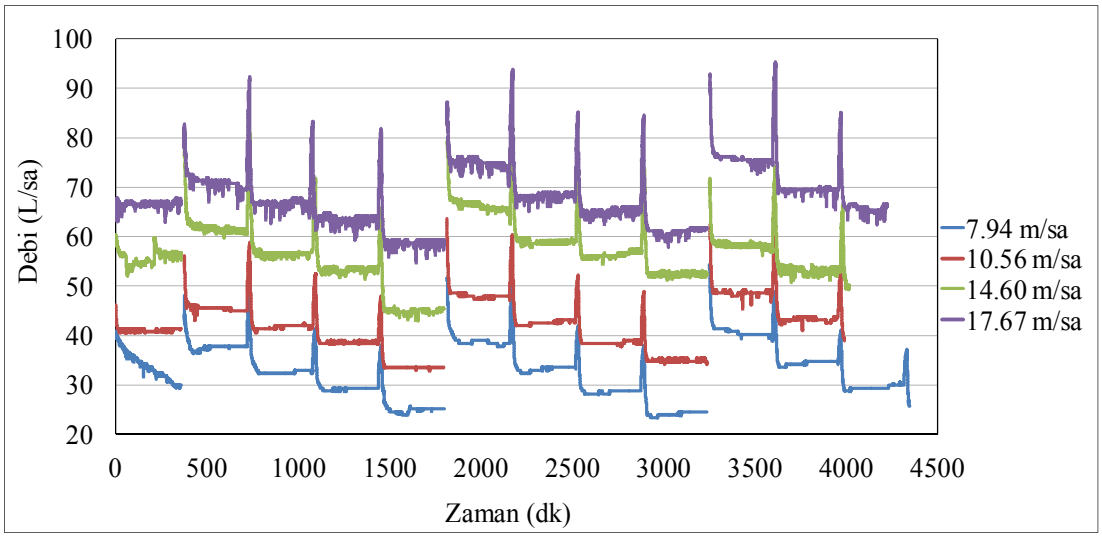
Şekil B.2. ADF 2'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L).



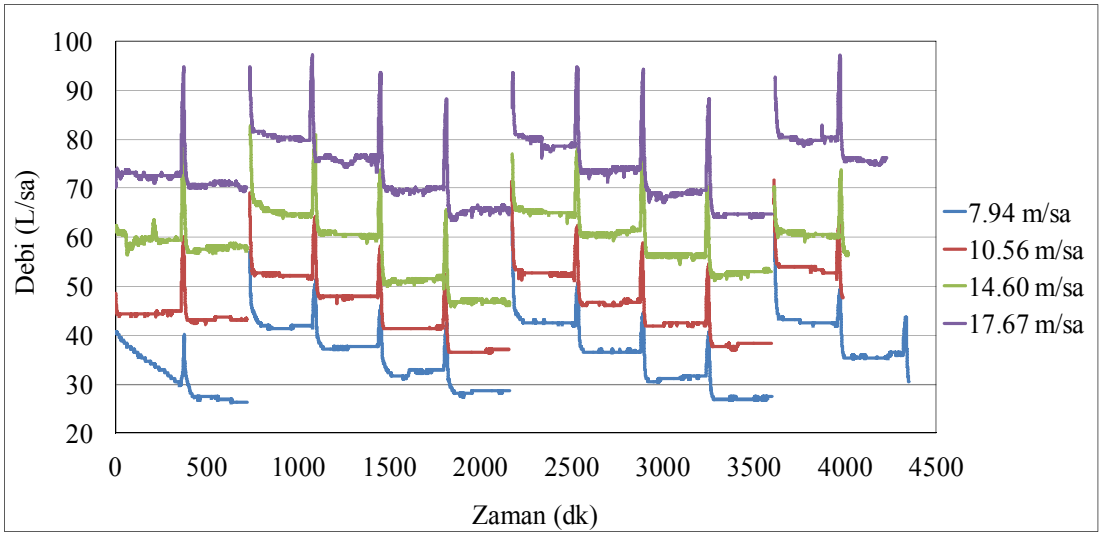
Şekil B.3. ADF 3'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L).



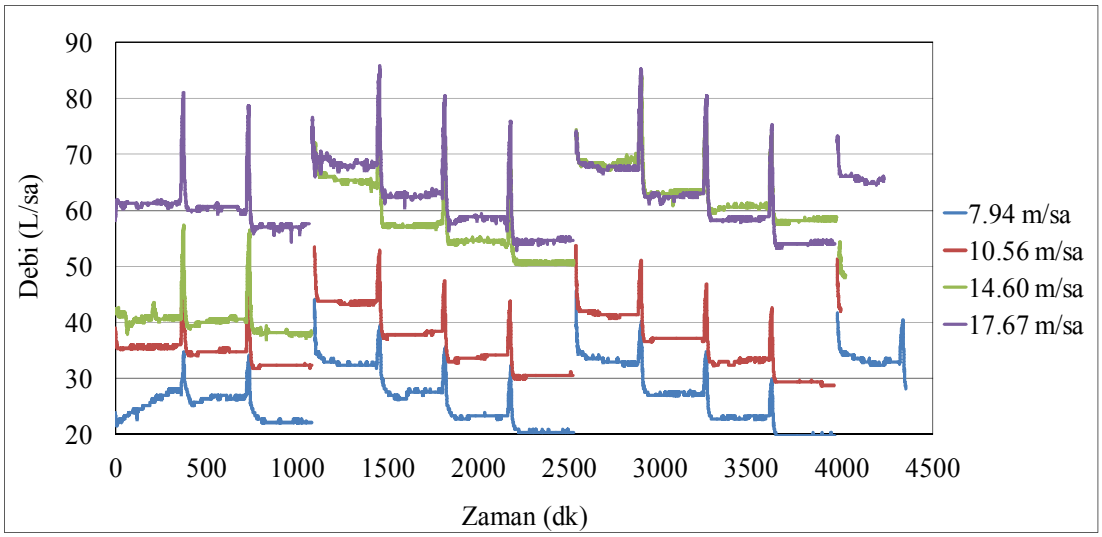
Şekil B.4. ADF 4'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L).



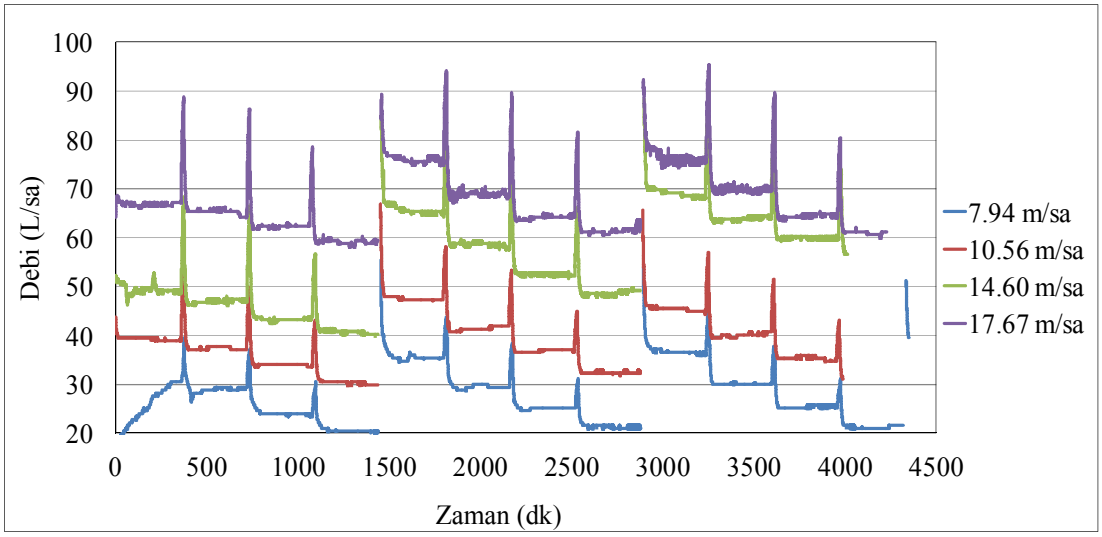
Şekil B.5. ADF 1'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L).



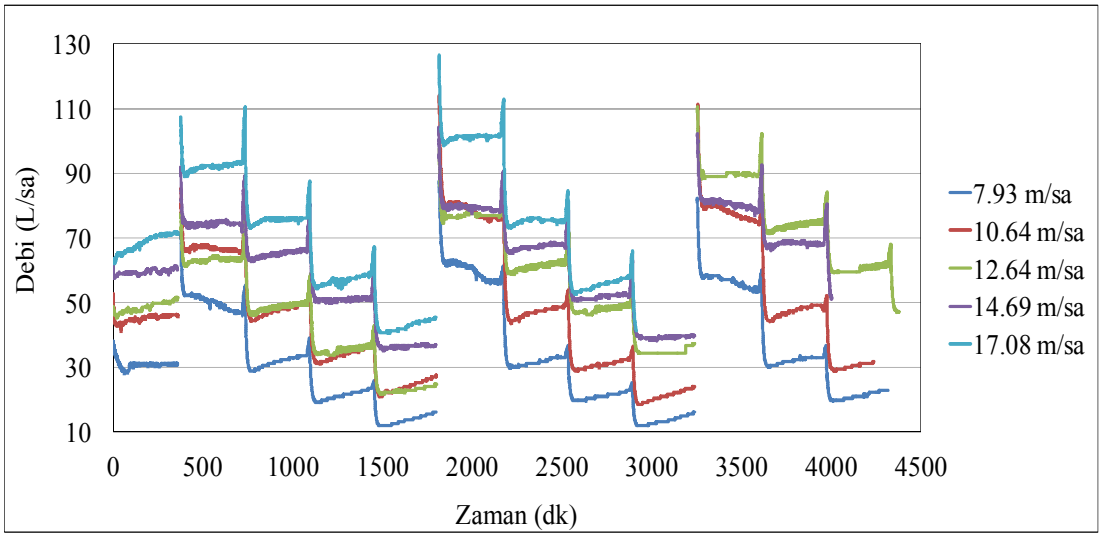
Şekil B.6. ADF 2'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L).



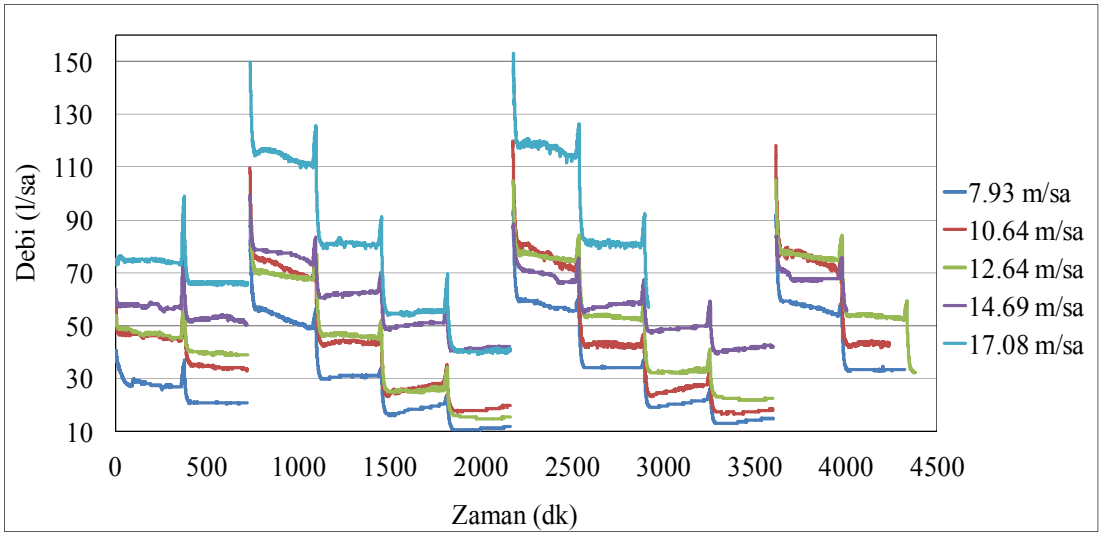
Şekil B.7. ADF 3'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L).



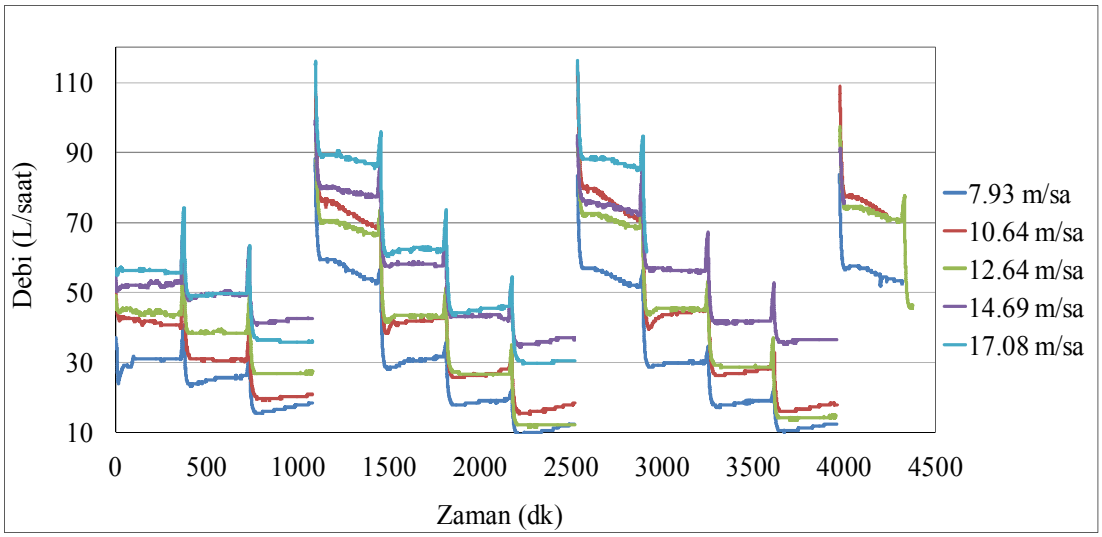
Şekil B.8. ADF 4'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L).



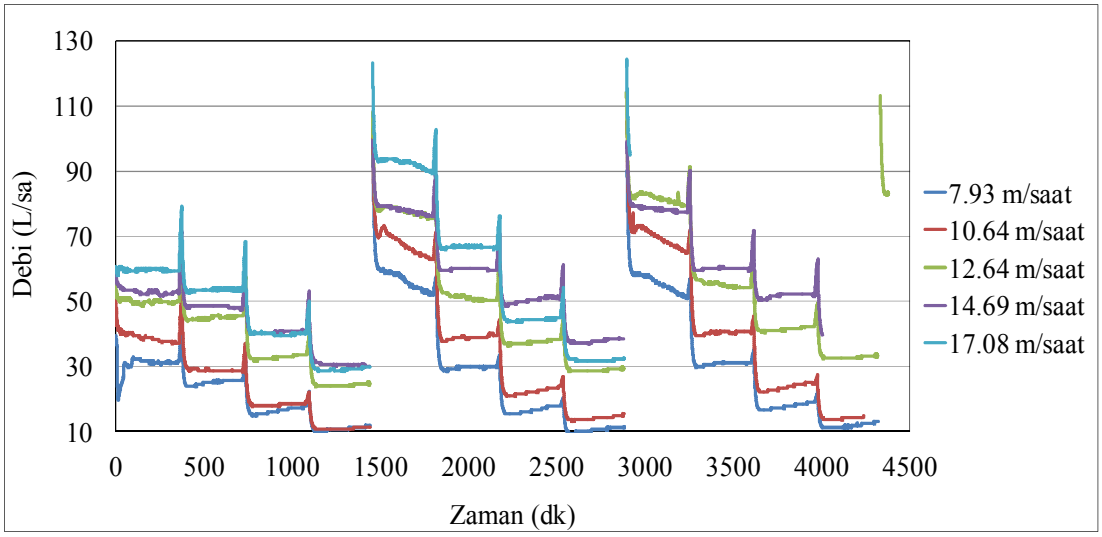
Şekil B.9. ADF 1'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L).



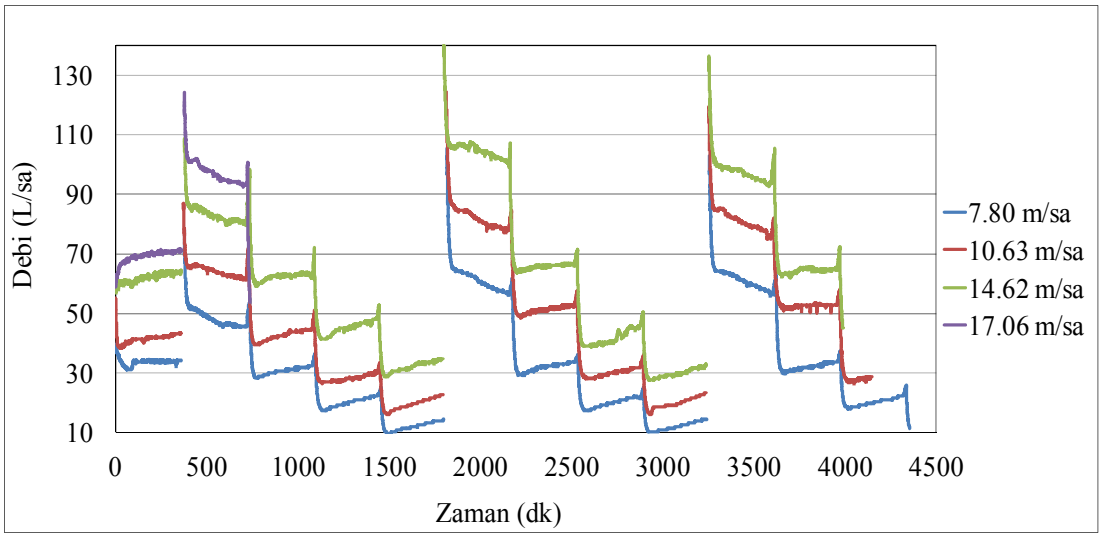
Şekil B.10. ADF 2'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L).



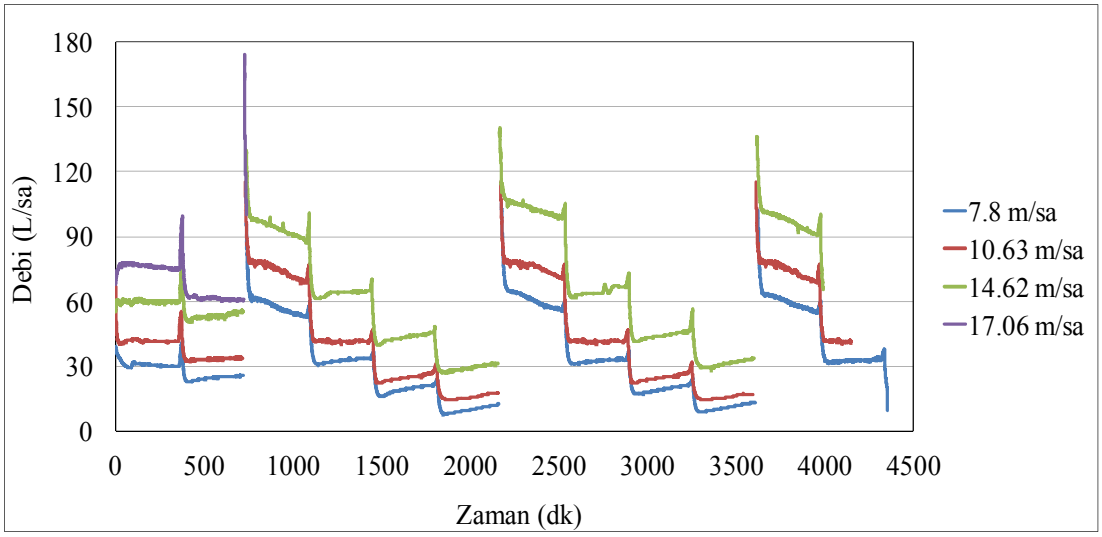
Şekil B.11. ADF 3'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L).



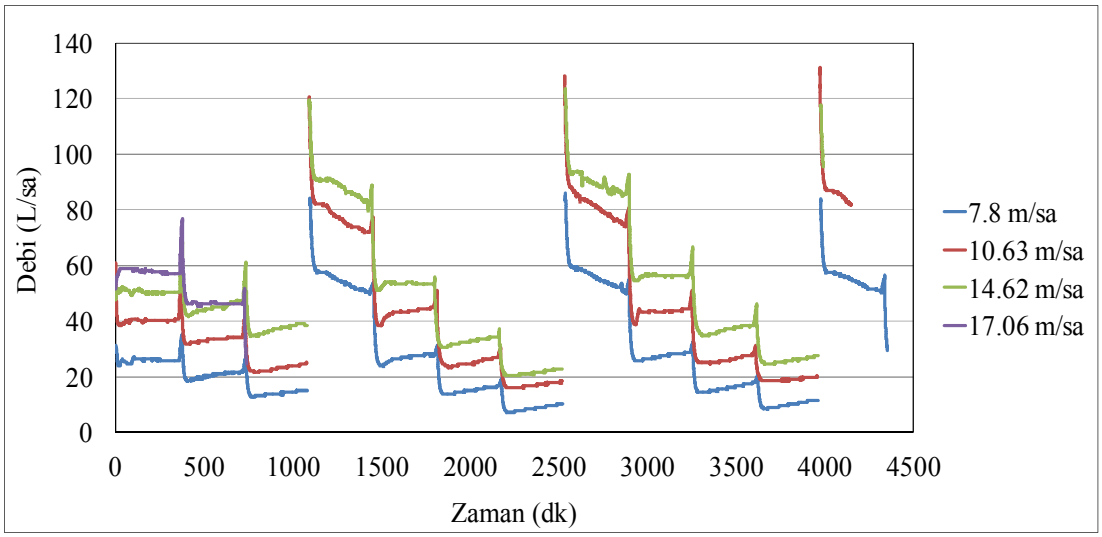
Şekil B.12. ADF 4'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L).



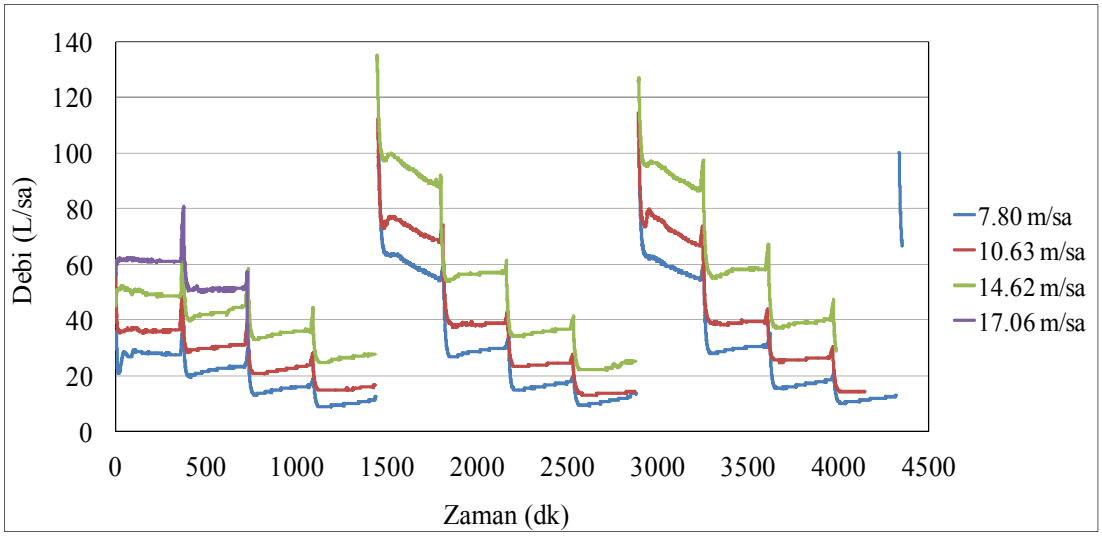
Şekil B.13. ADF 1'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L).



Şekil B.14. ADF 2'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L).

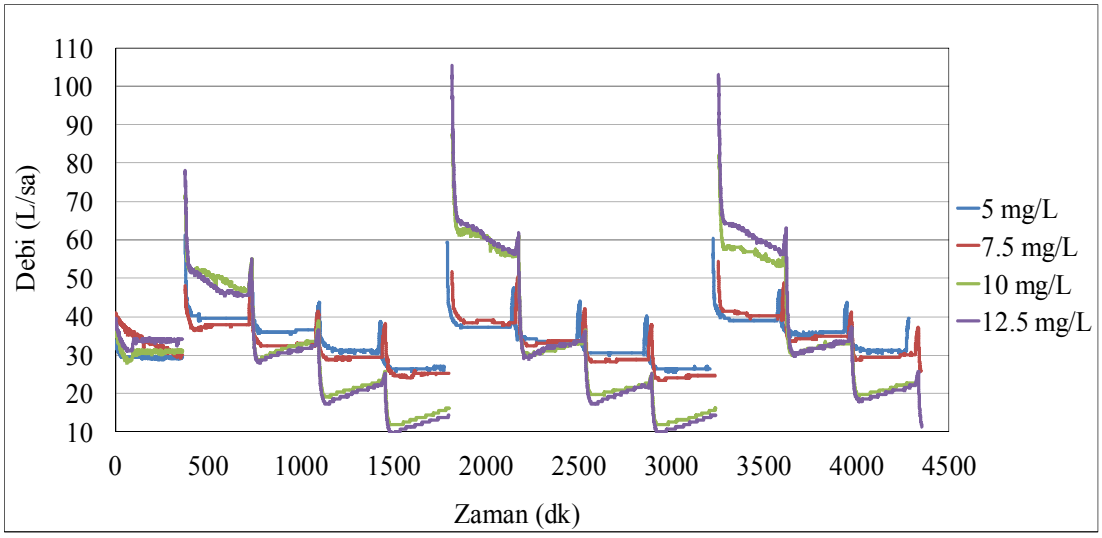


Şekil B.15. ADF 3'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L).

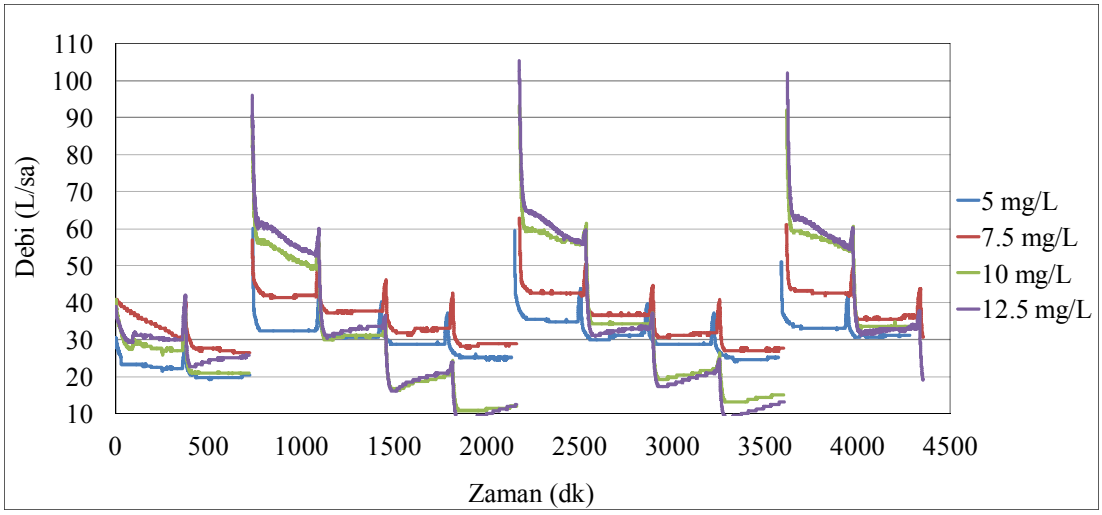


Şekil B.16. ADF 4'de filtrasyon süresince ortalama filtrasyon hızının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L).

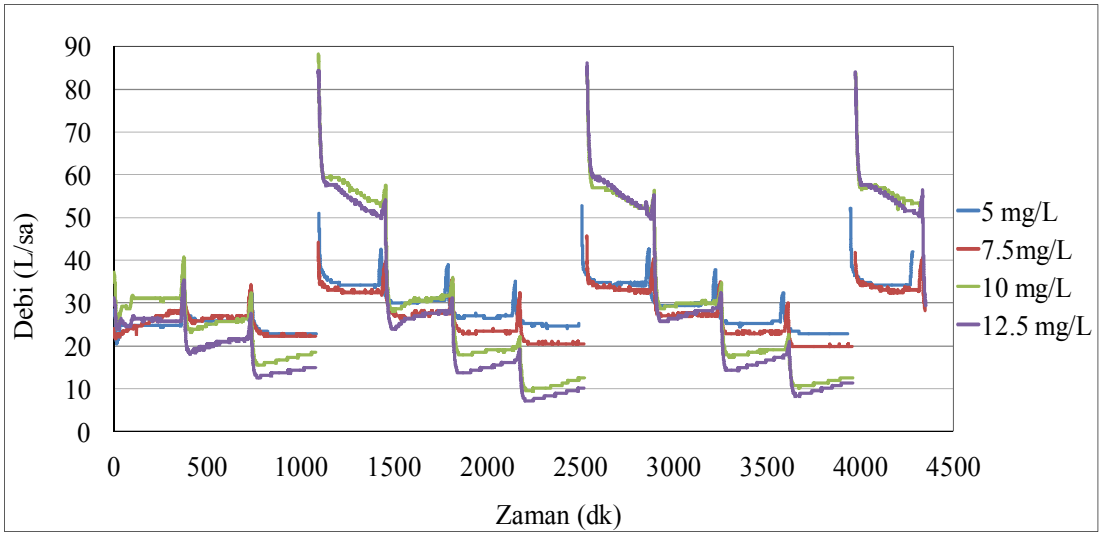
EK-C. Filtrasyon süresince azalan debili filtrelerin her birinde farklı alum dozajlarında debi ölçümlerini gösteren grafikler



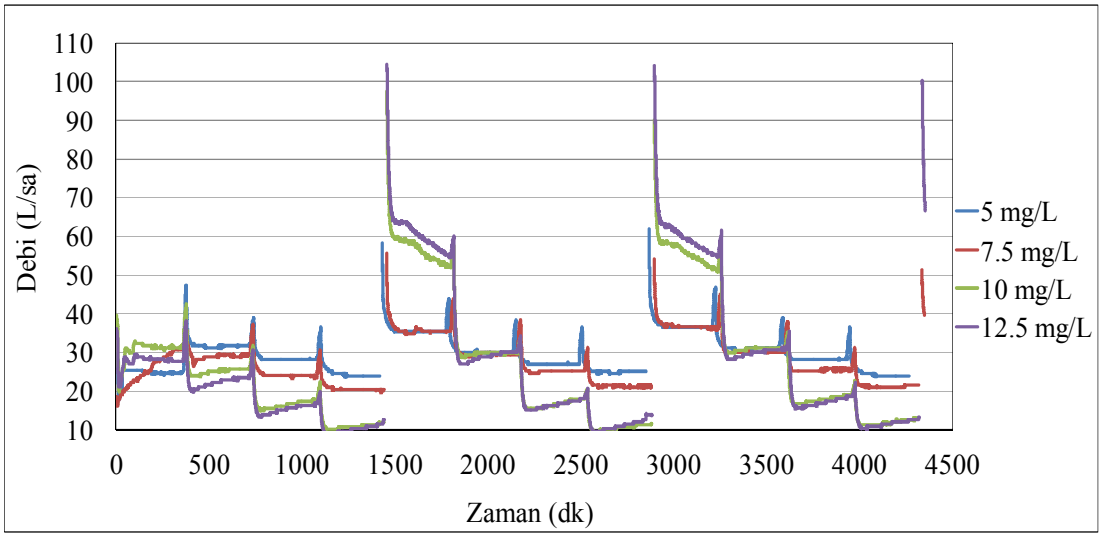
Şekil C.1. ADF 1'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L).



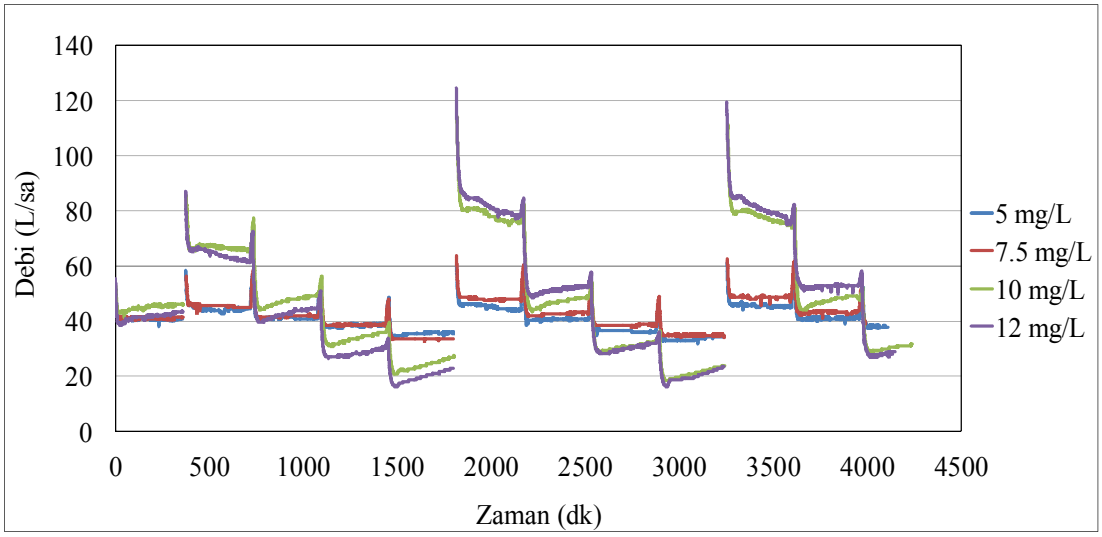
Şekil C.2. ADF 2'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L).



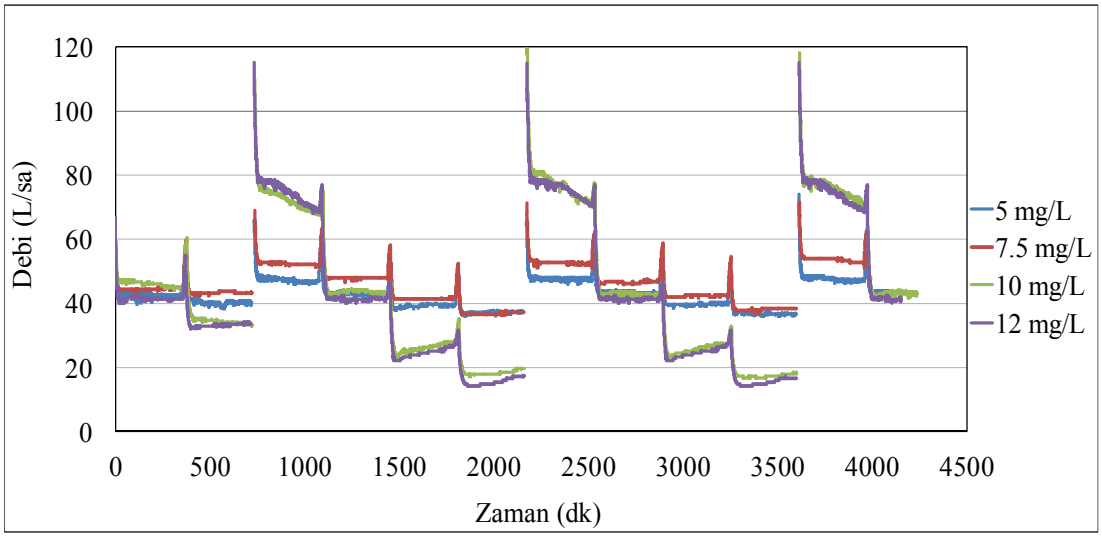
Şekil C.3. ADF 3'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L).



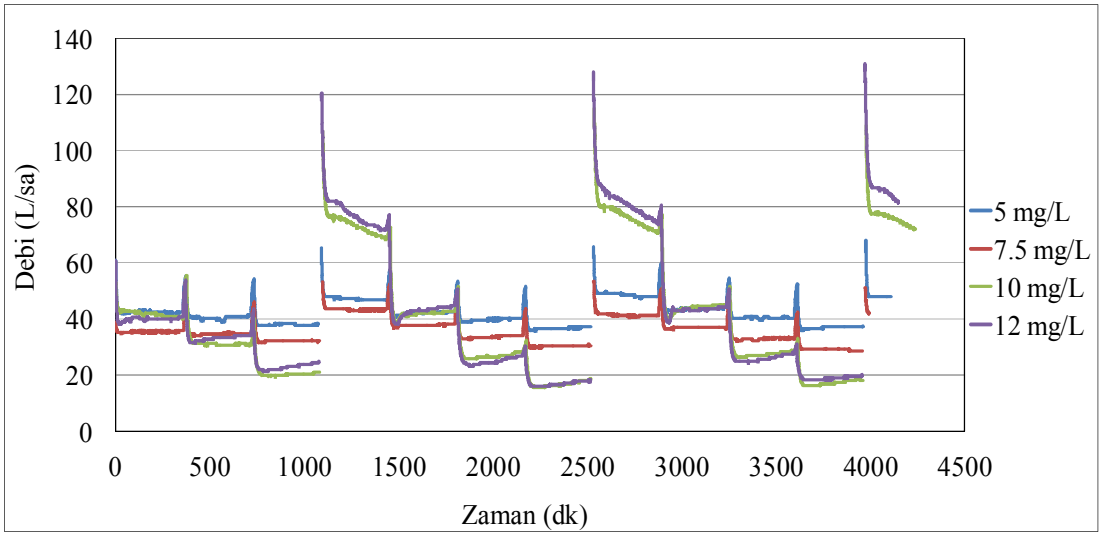
Şekil C.4. ADF 4'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 5 mg/L).



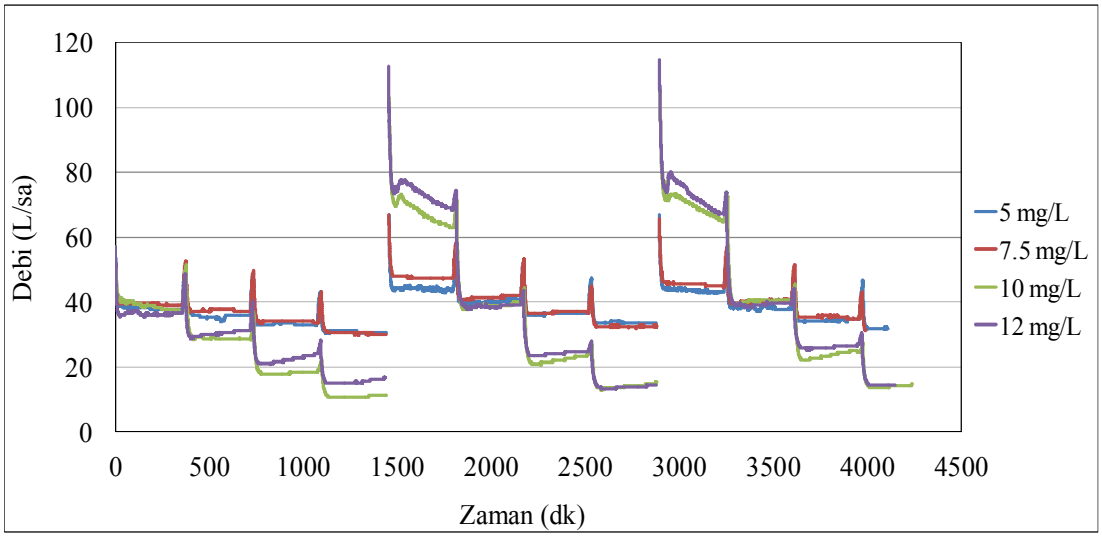
Şekil C.5. ADF 1'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L).



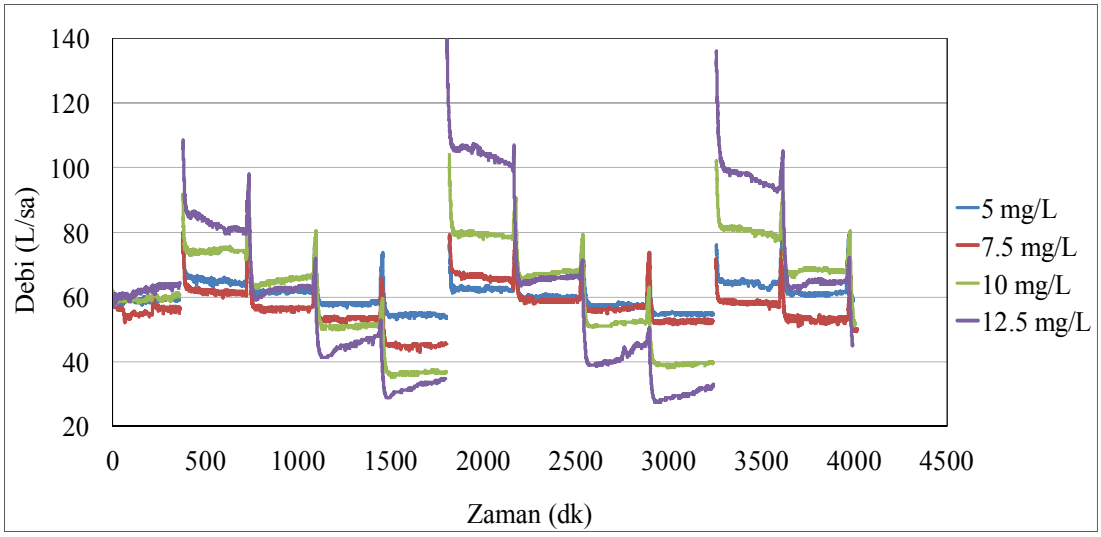
Şekil C.6. ADF 2'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L).



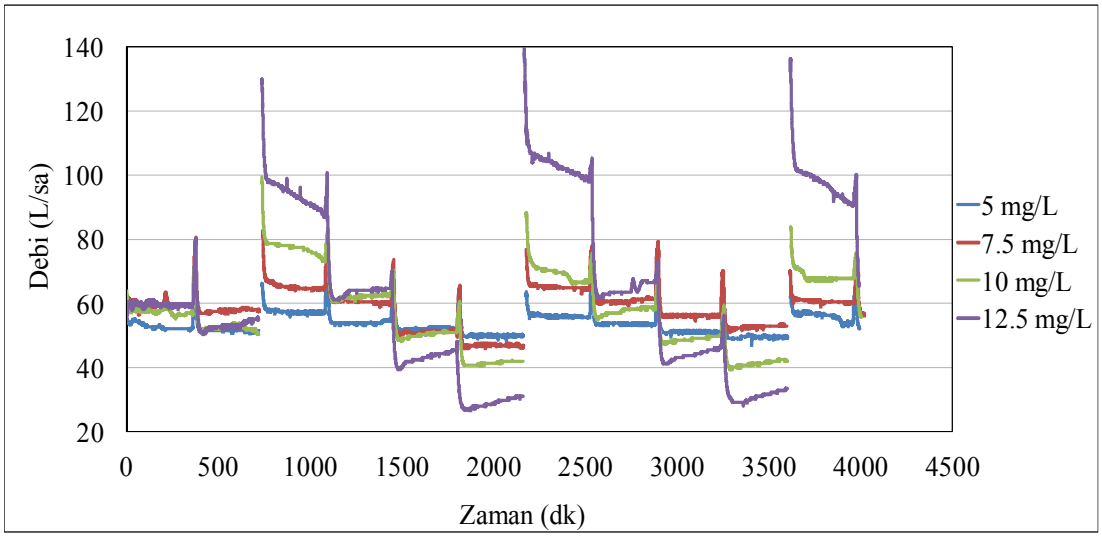
Şekil C.7. ADF 3'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L).



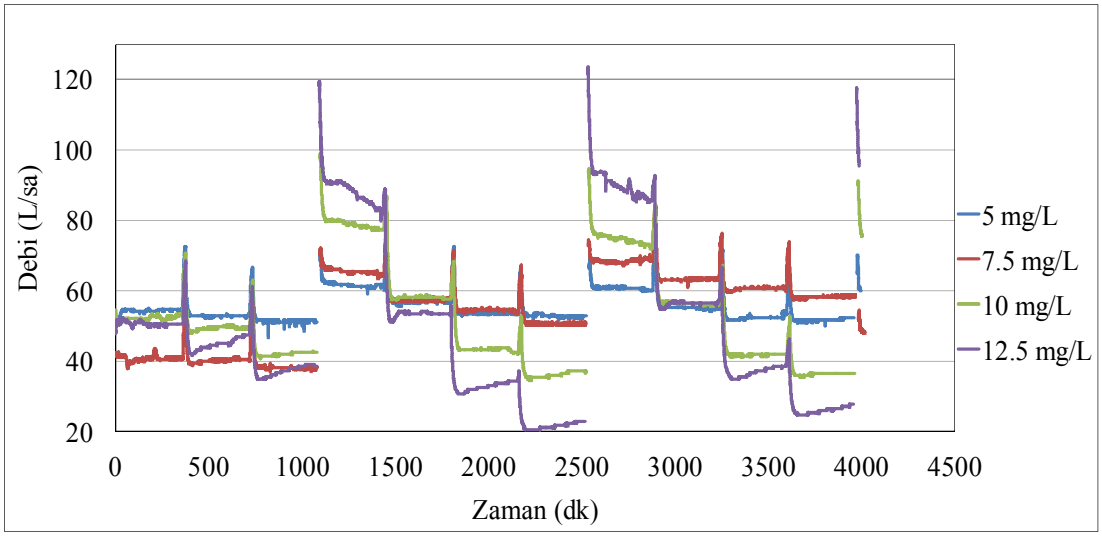
Şekil C.8. ADF 4'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 7.5 mg/L).



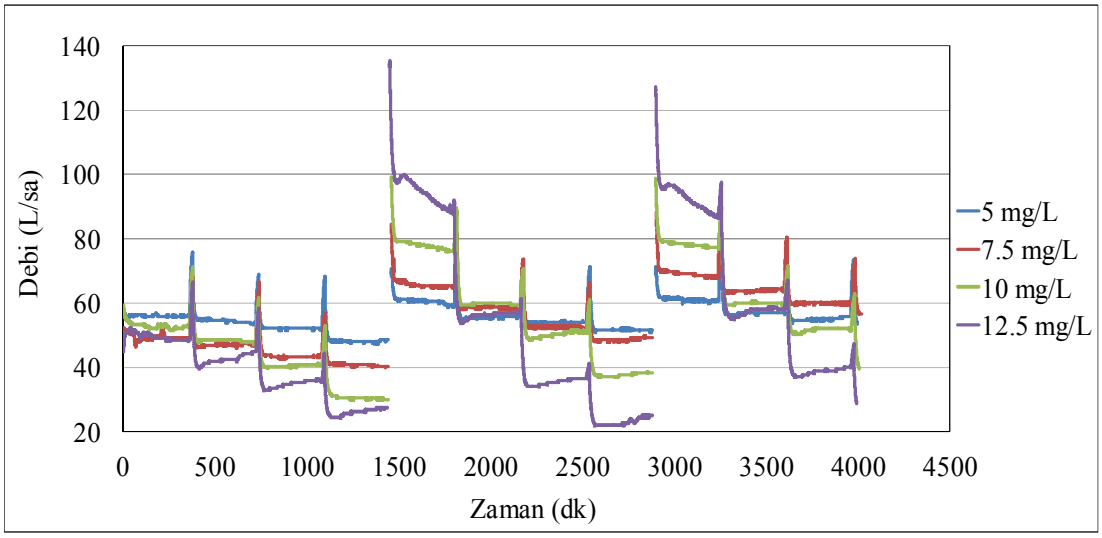
Şekil C.9. ADF 1'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L).



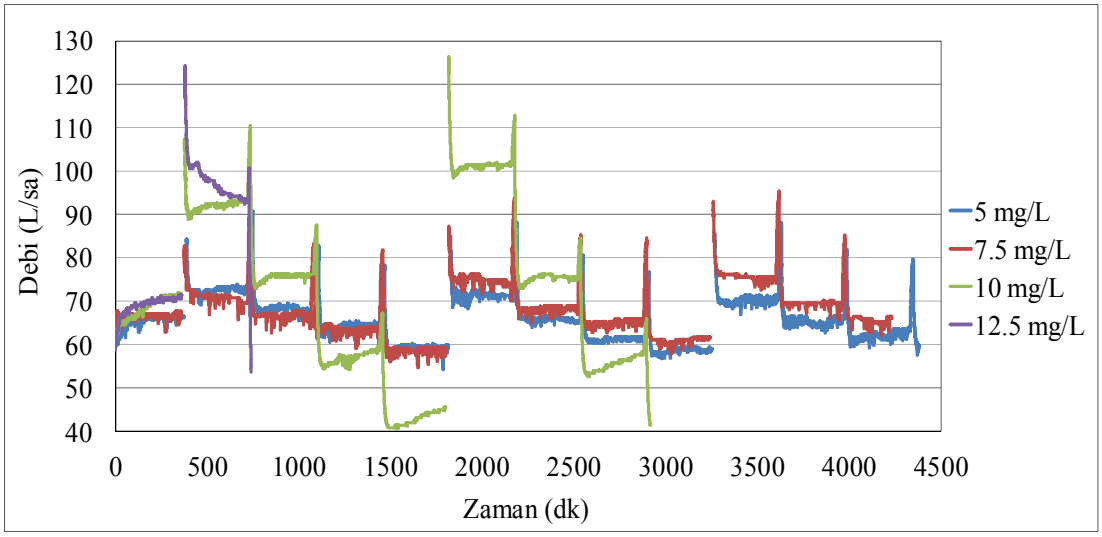
Şekil C.10. ADF 2'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L).



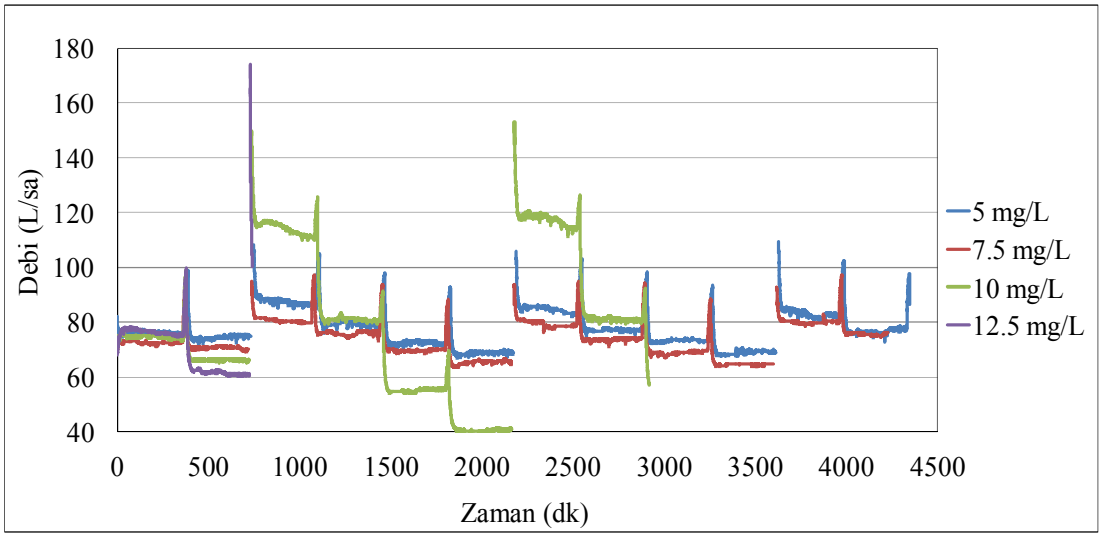
Şekil C.11. ADF 3'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L).



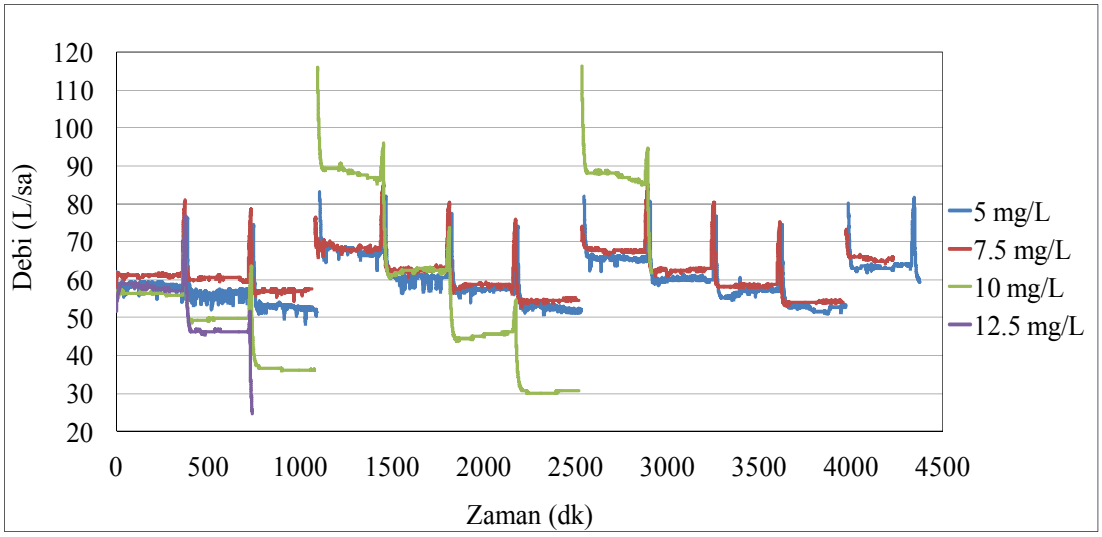
Şekil C.12. ADF 4'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 10 mg/L).



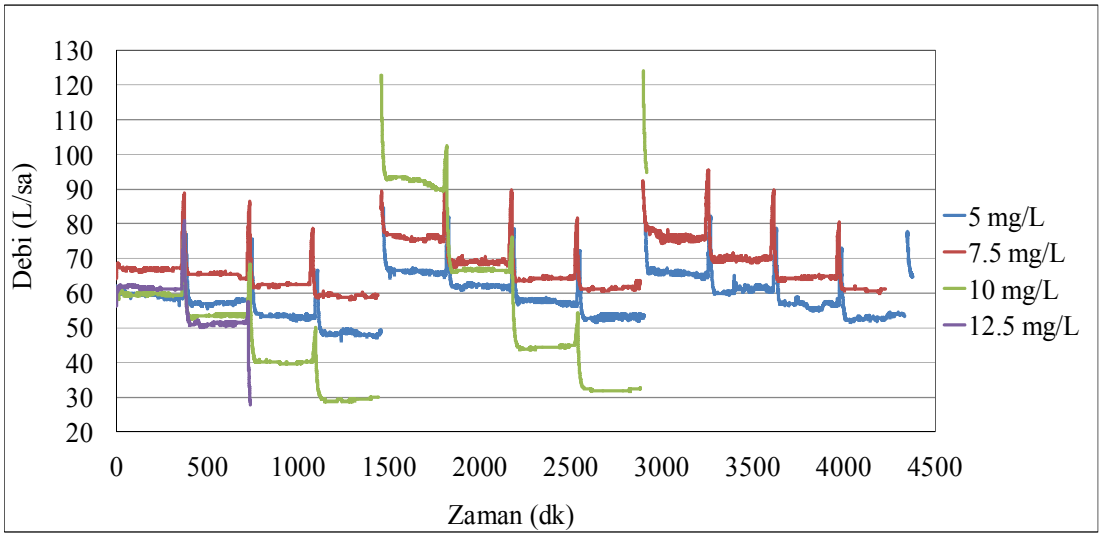
Şekil C.13. ADF 1'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L).



Şekil C.14. ADF 2'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L).

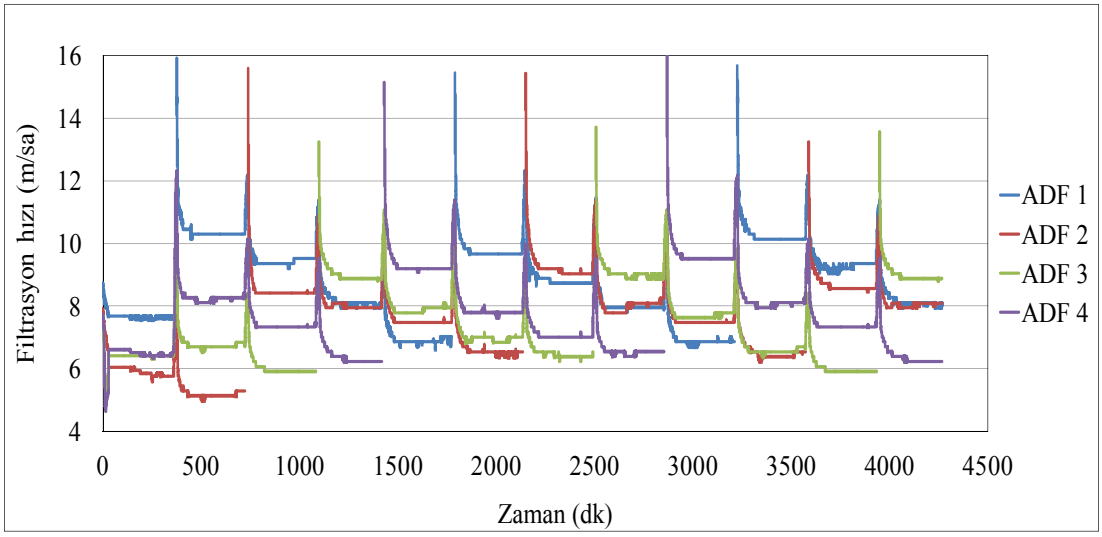


Şekil C.15. ADF 3'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L).

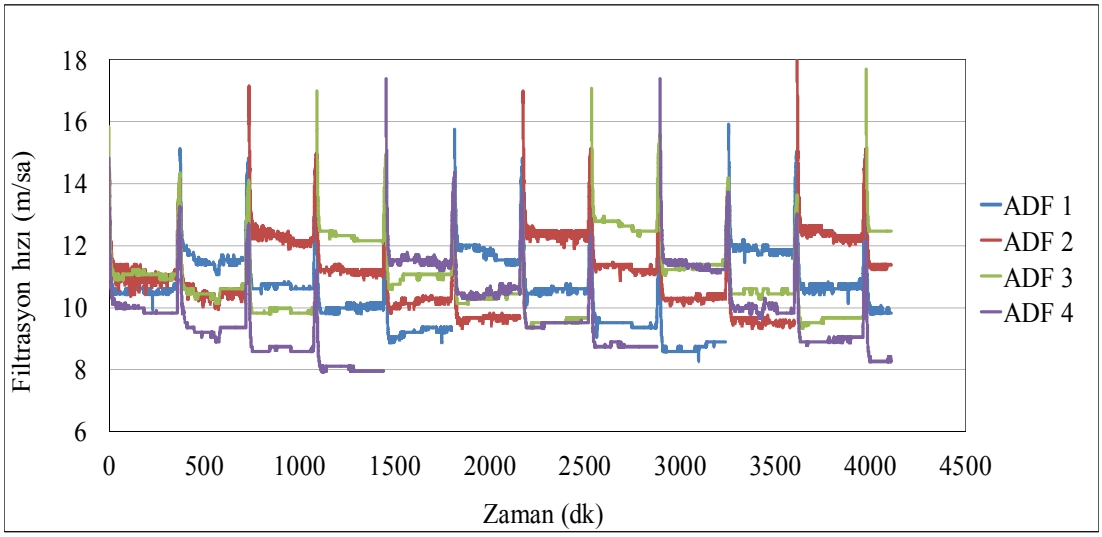


Şekil C.16. ADF 4'de filtrasyon süresince alum dozajının debi değişimine etkisi (alum dozajı: 12.5 mg/L).

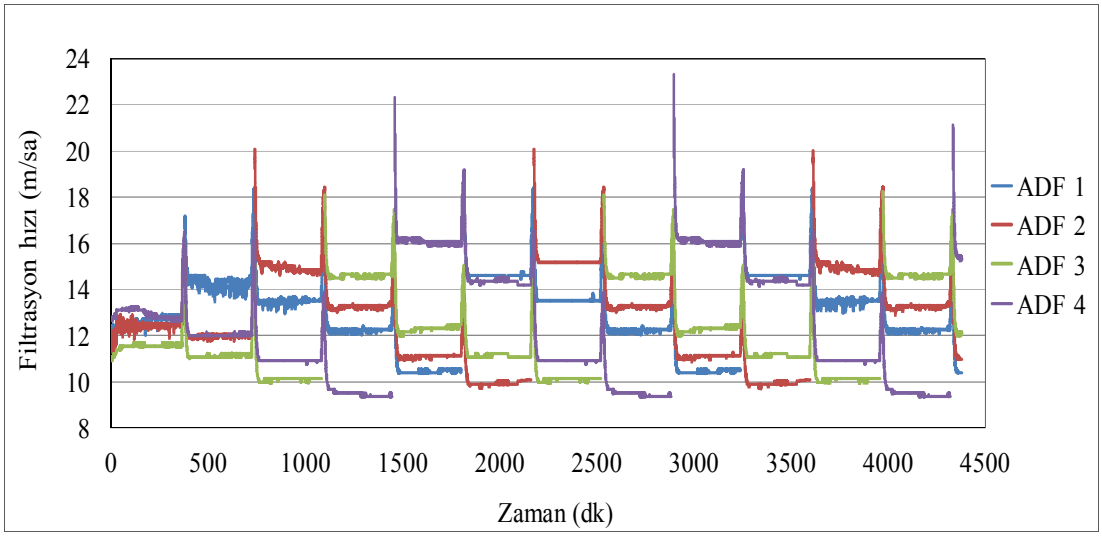
EK-D. Filtrasyon süresince deneylerin her birinde AD filtrelerinin hız değişimini gösteren grafikler



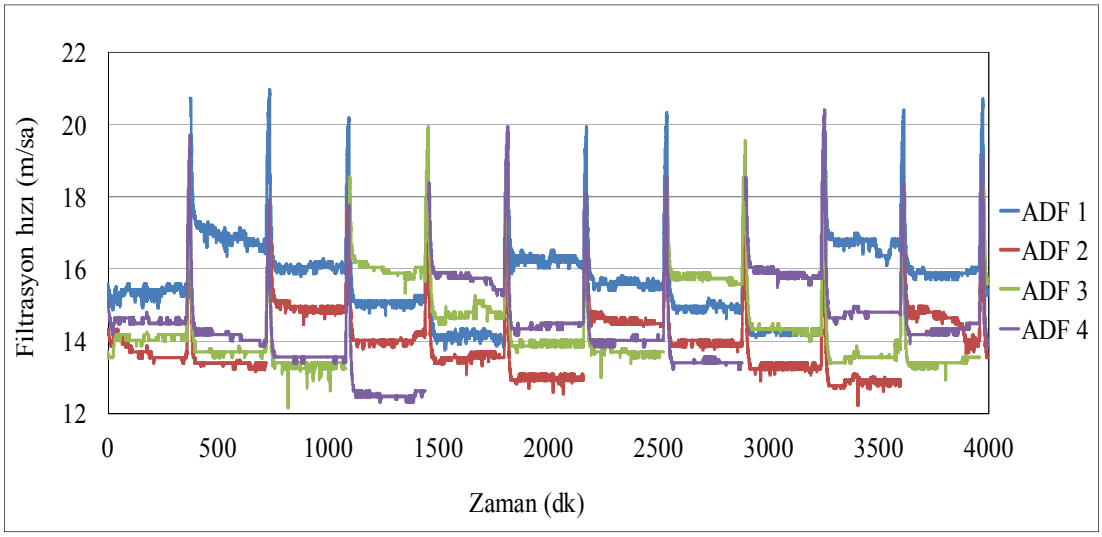
Şekil D.1. Deney 1'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.92 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



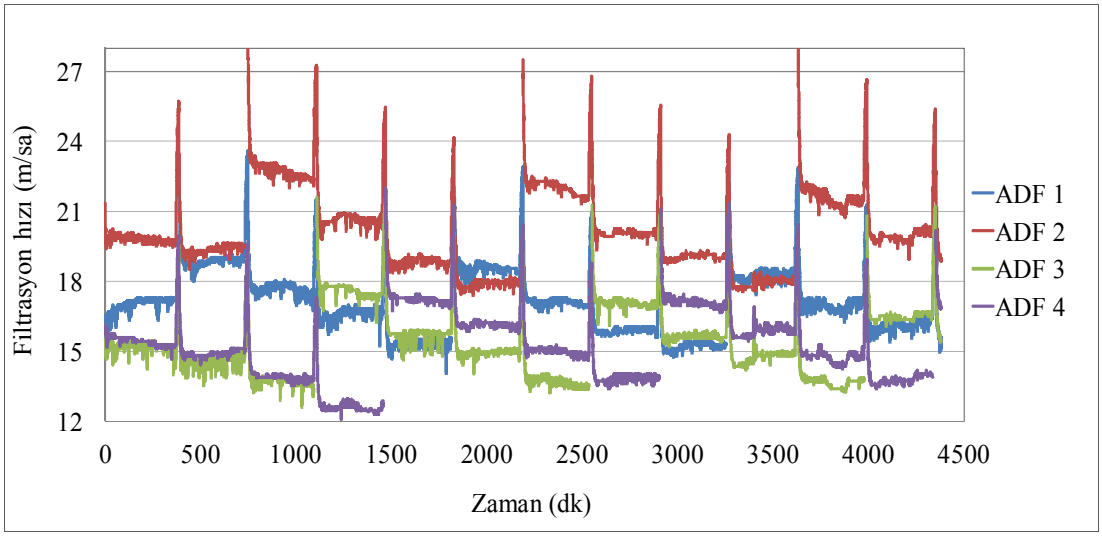
Şekil D.2. Deney 2'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



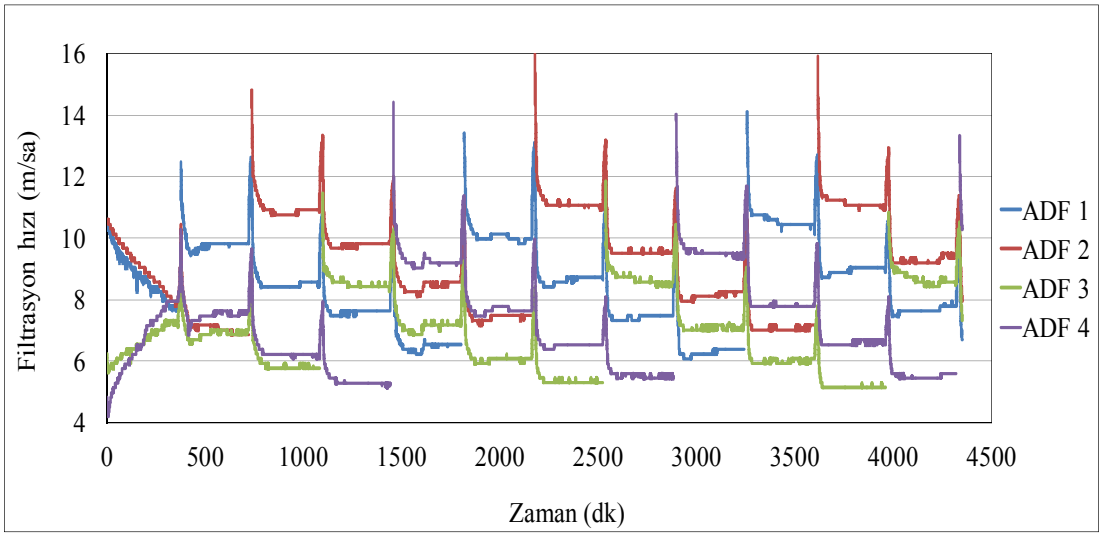
Şekil D.3. Deney 3'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



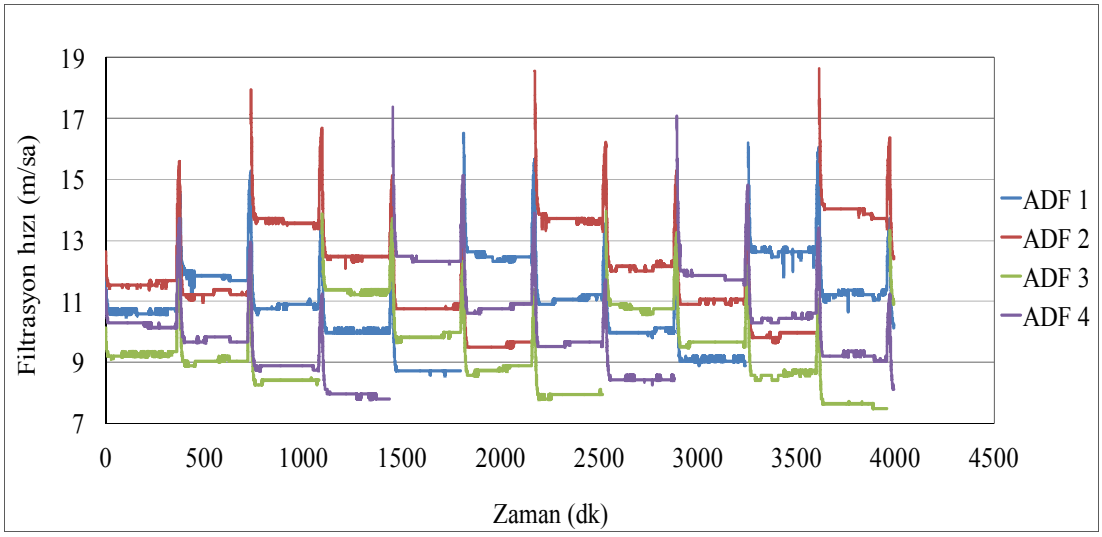
Şekil D.4. Deney 4'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 10.01 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



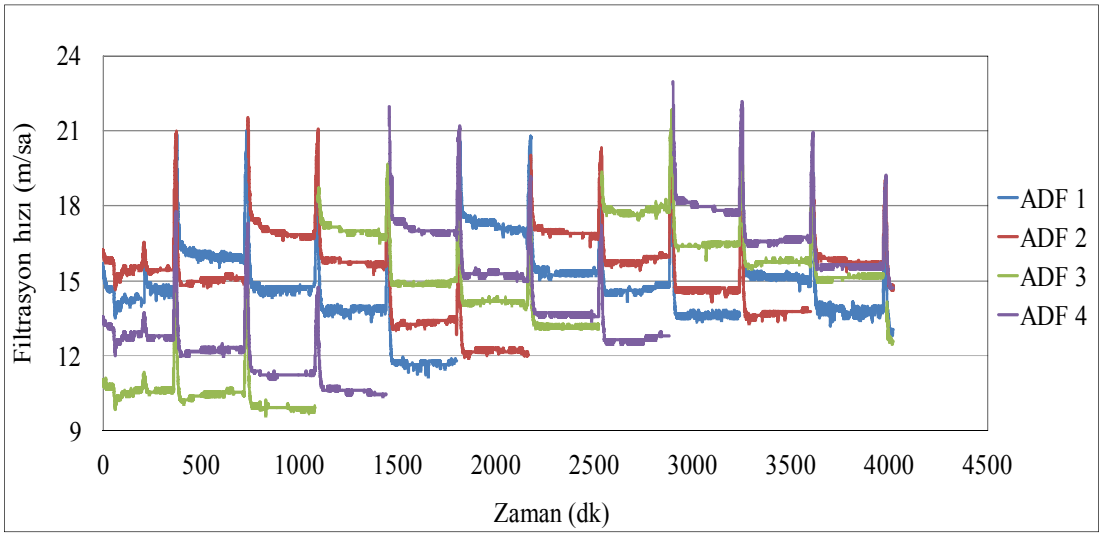
Şekil D.5. Deney 5'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 10.67 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).



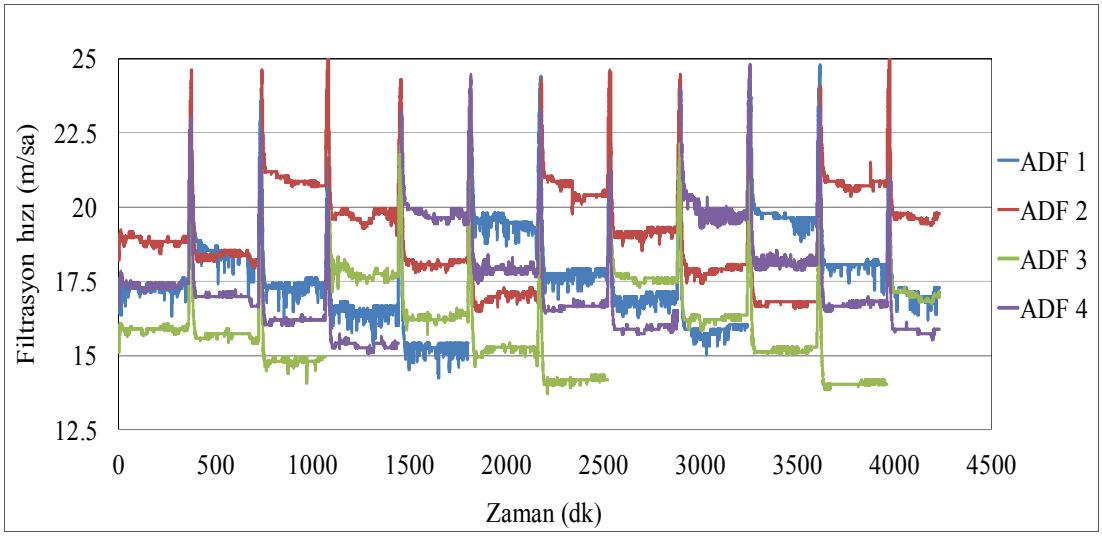
Şekil D.6. Deney 6'da filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.99 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



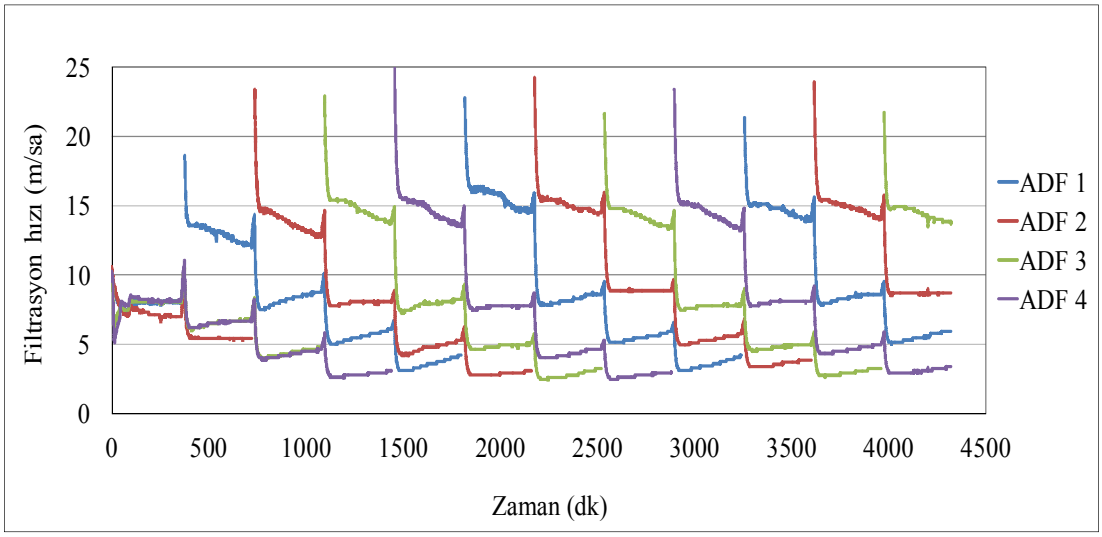
Şekil D.7. Deney 7'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 10.02 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



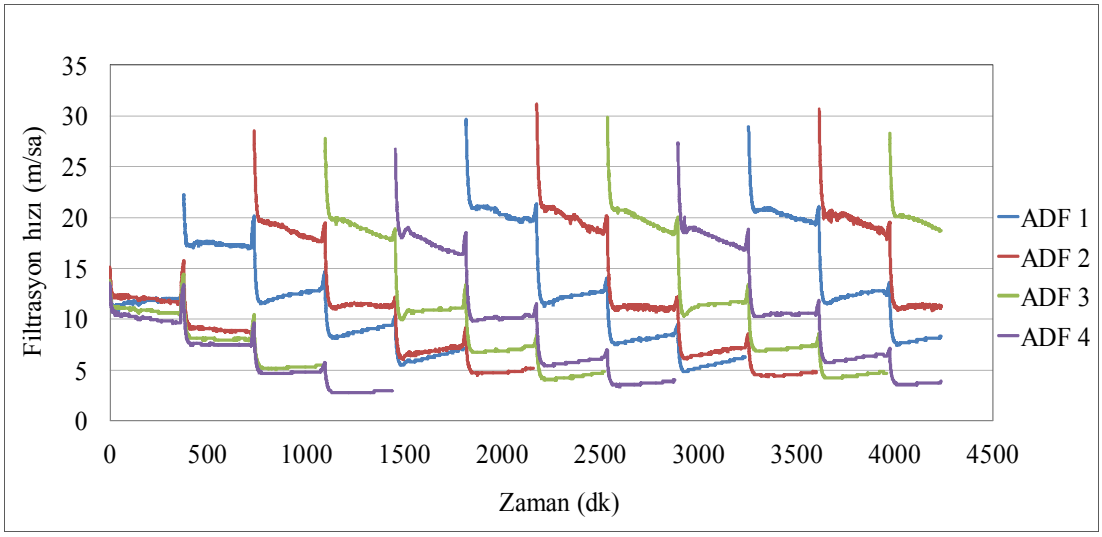
Şekil D.8. Deney 8'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.93 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



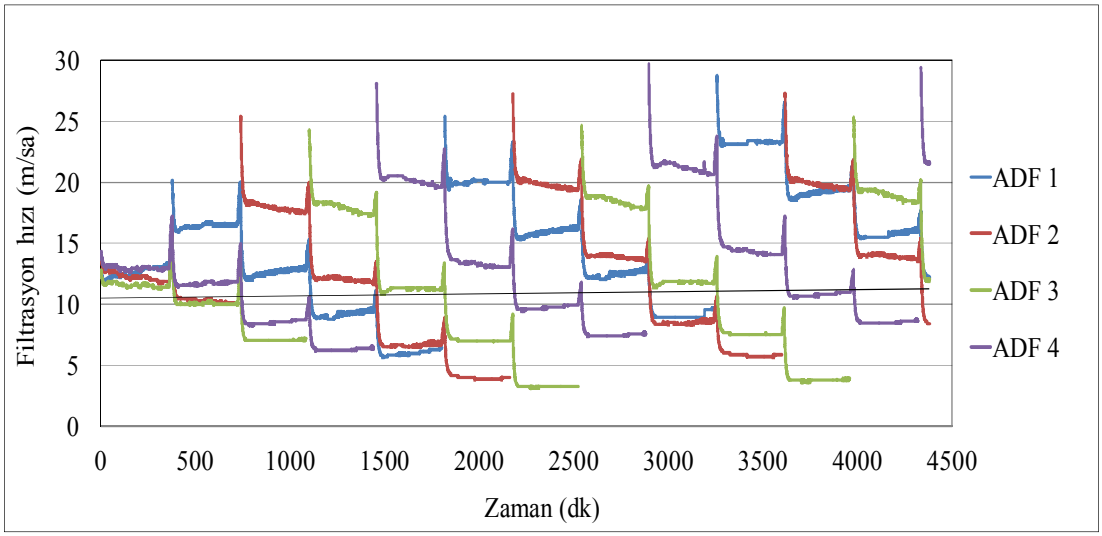
Şekil D.9. Deney 9'da filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.6 m/sa).



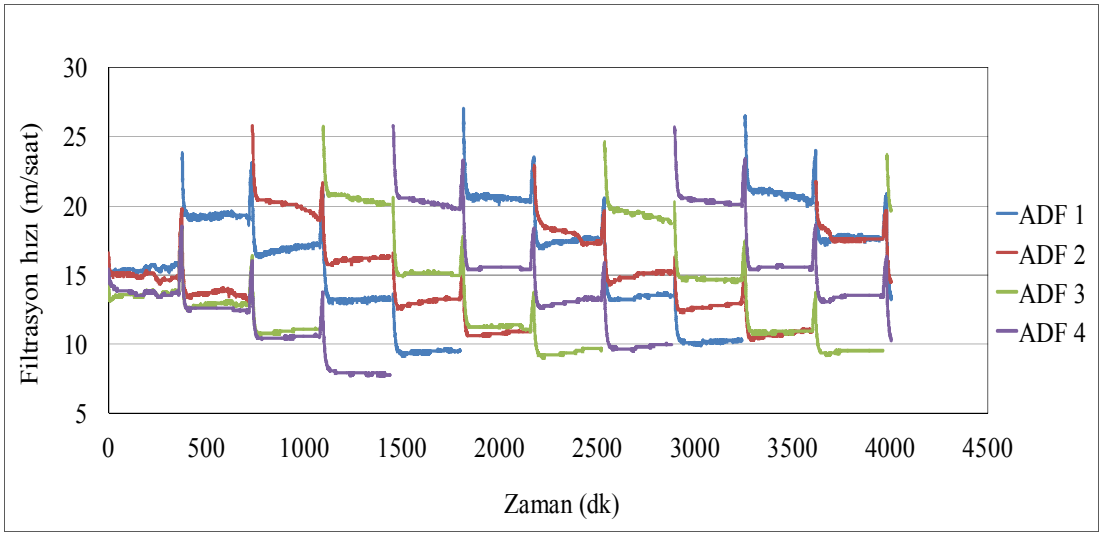
Şekil D.10. Deney 10'da filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa).



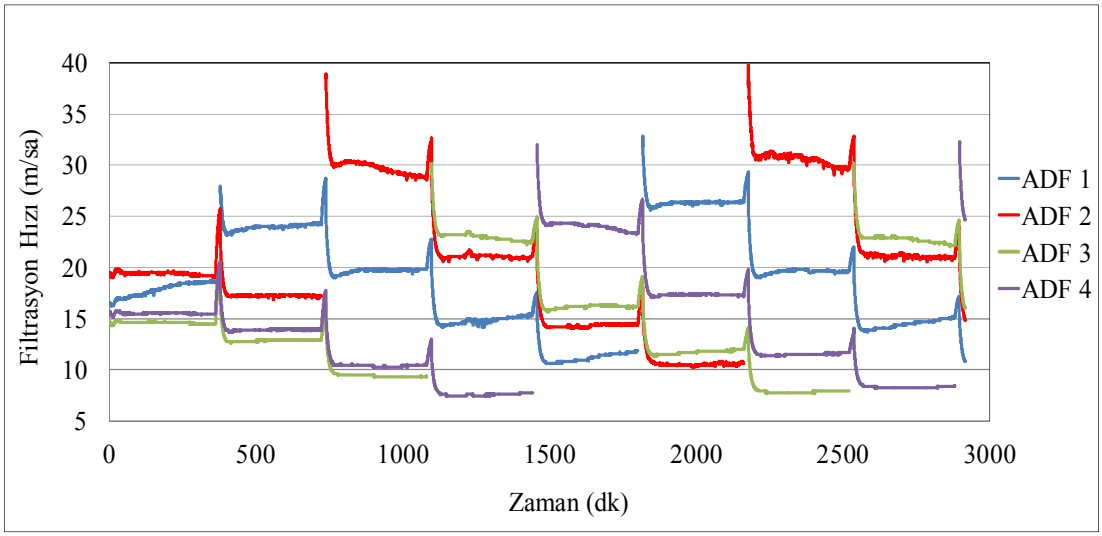
Şekil D.11. Deney 11'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.85 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



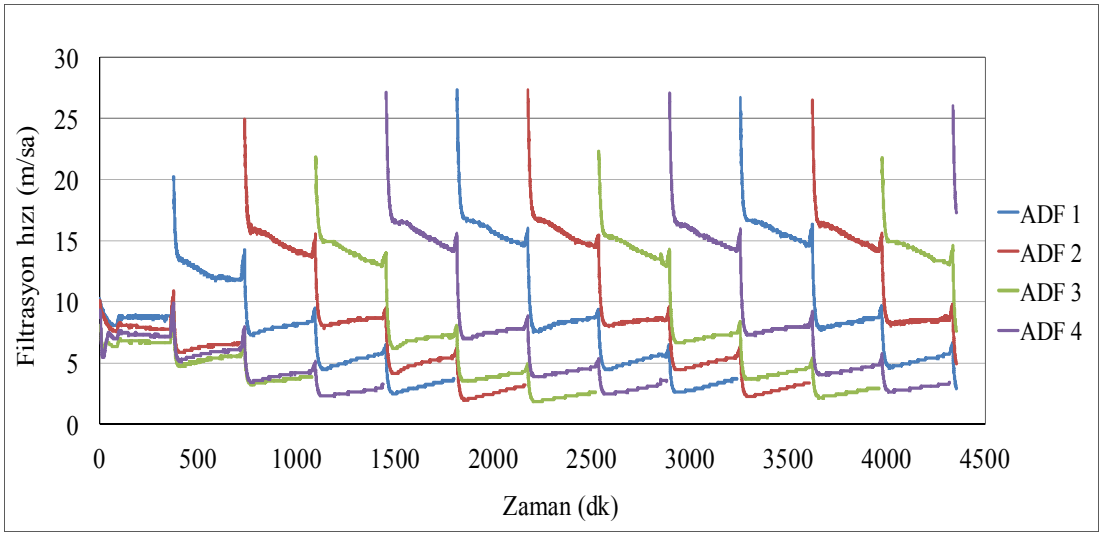
Şekil D.12. Deney 12'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 10 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



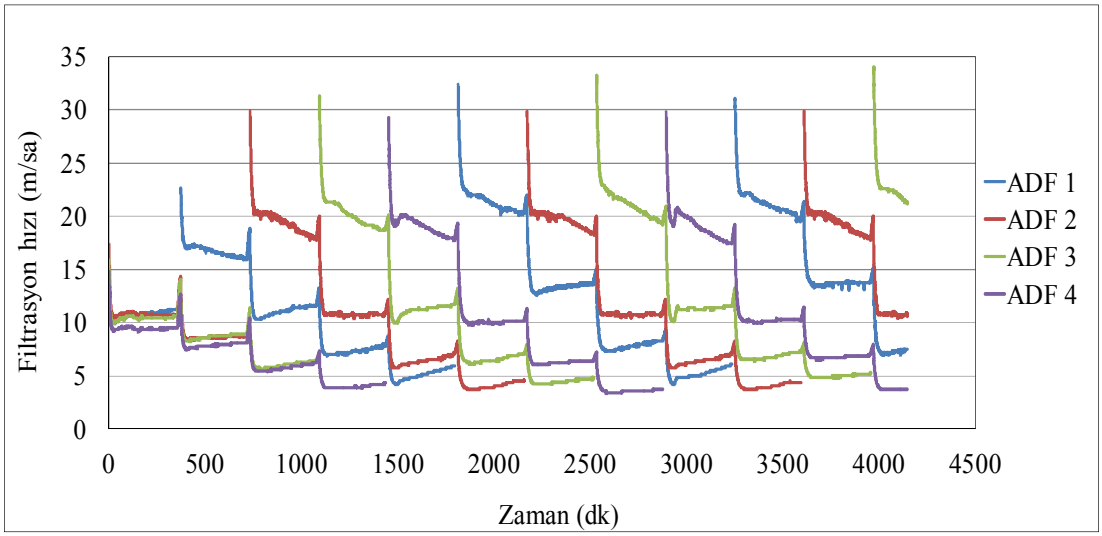
Şekil D.13. Deney 13'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.95 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



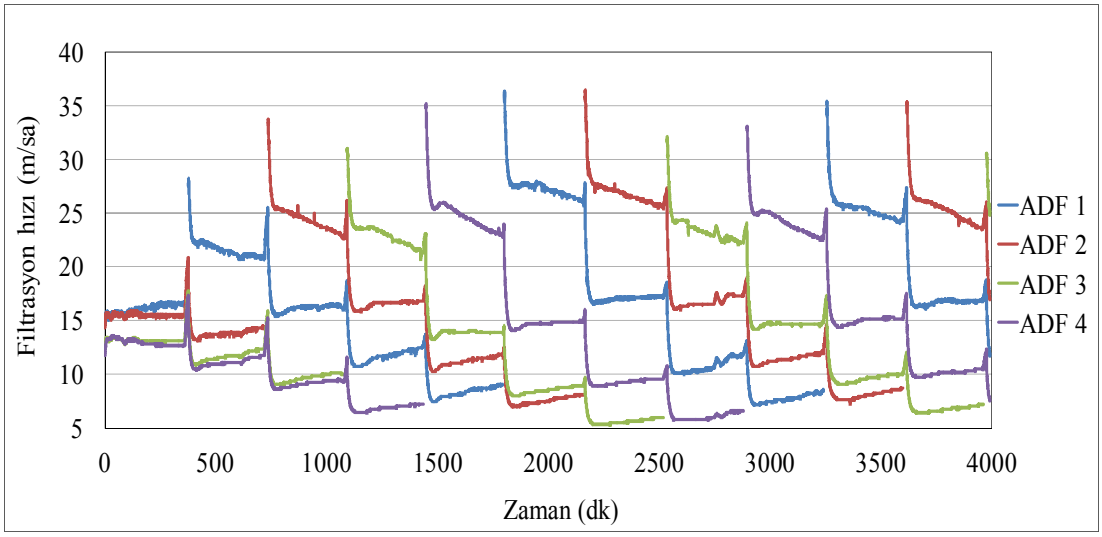
Şekil D.14. Deney 14'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.46 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.4 m/sa).



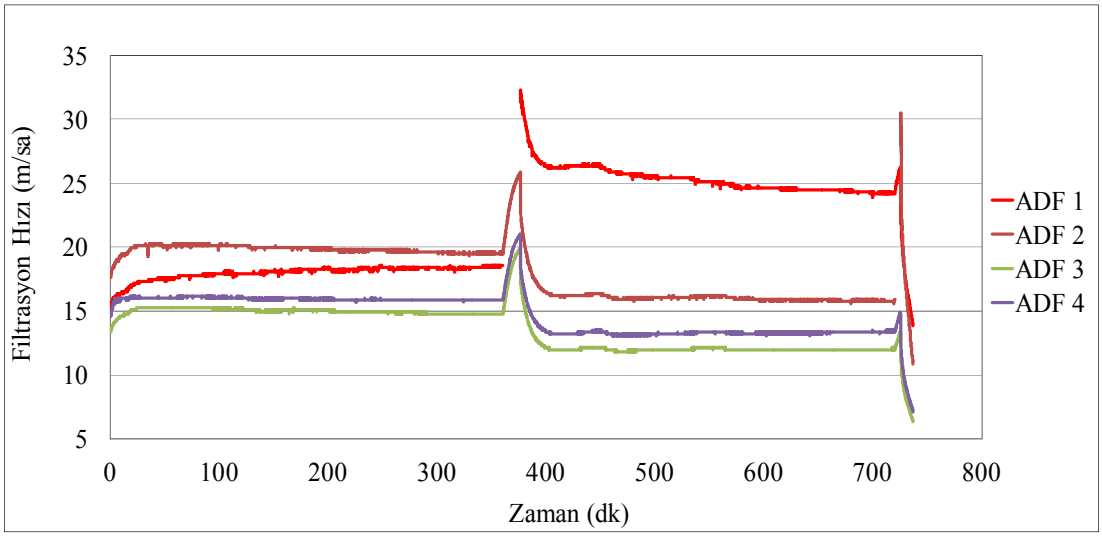
Şekil D.15. Deney 15'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.90 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



Şekil D.16. Deney 16'da filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.87 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).

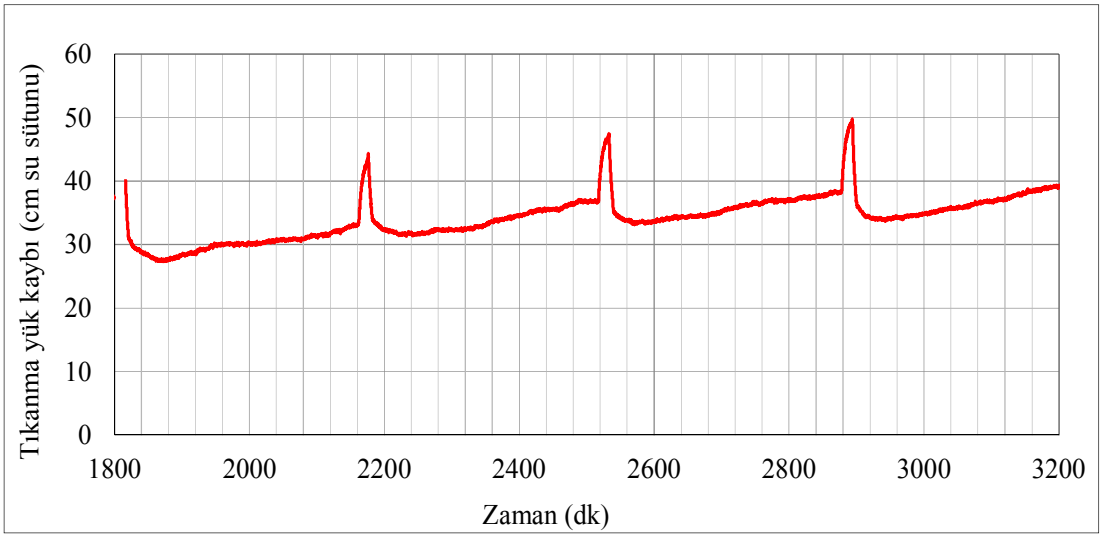


Şekil D.17. Deney 17'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).

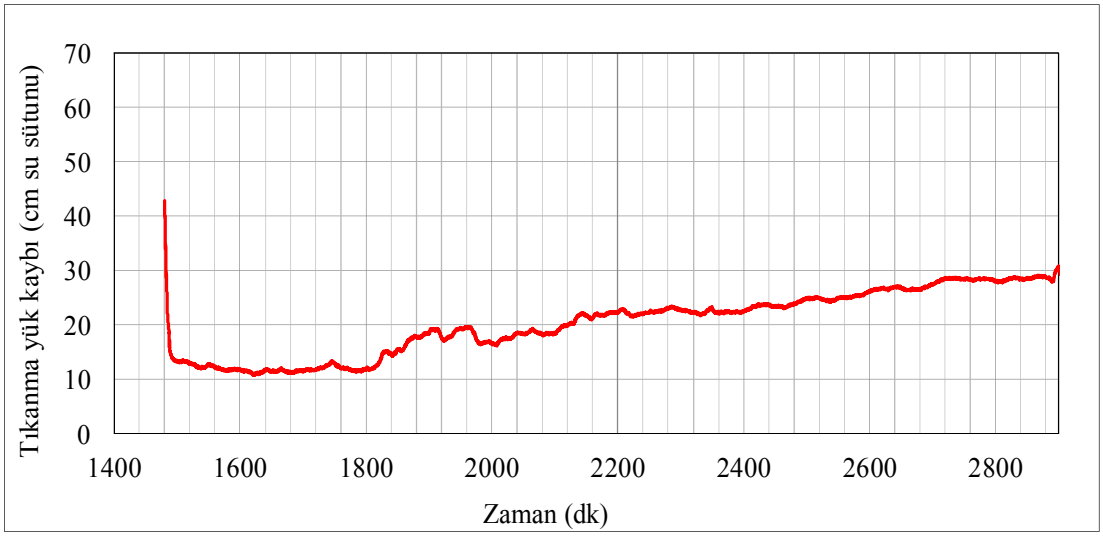


Şekil D.18. Deney 18'de filtrasyon süresince her bir AD filtresi için filtrasyon hızının değişimi (ham su bulanıklığı: 9.30 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).

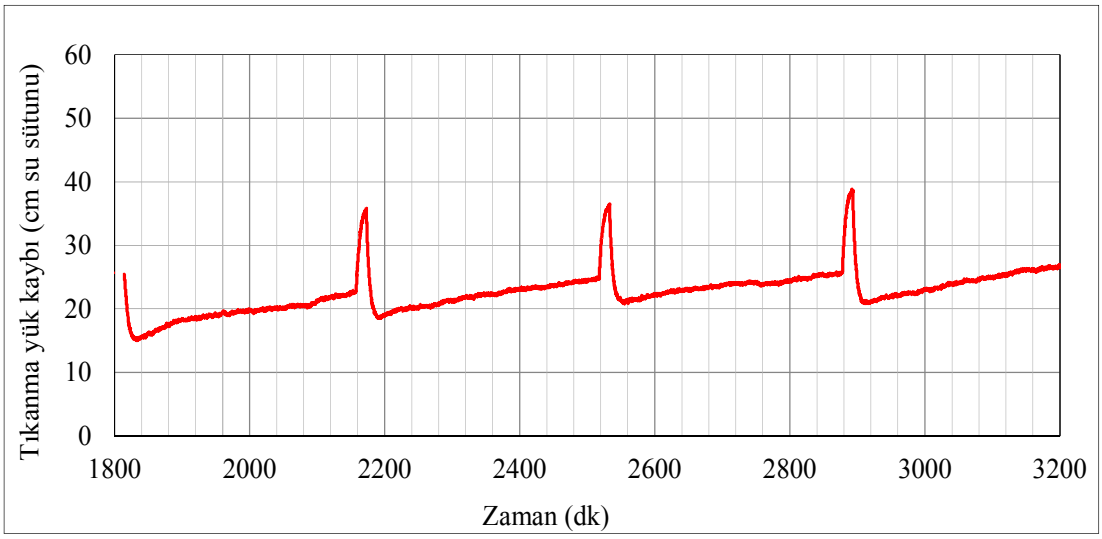
EK-E. SDF ve ADF sistemlerinde tıkanma yük kayıplarının zamana karşı gelişimini gösteren grafikler



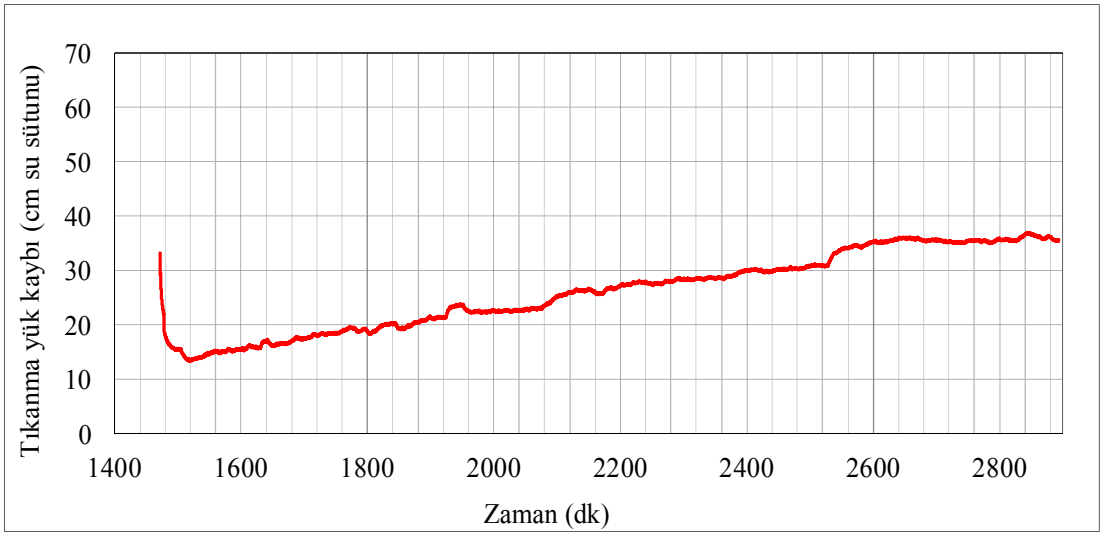
Şekil E.1. Deney 1'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.92 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



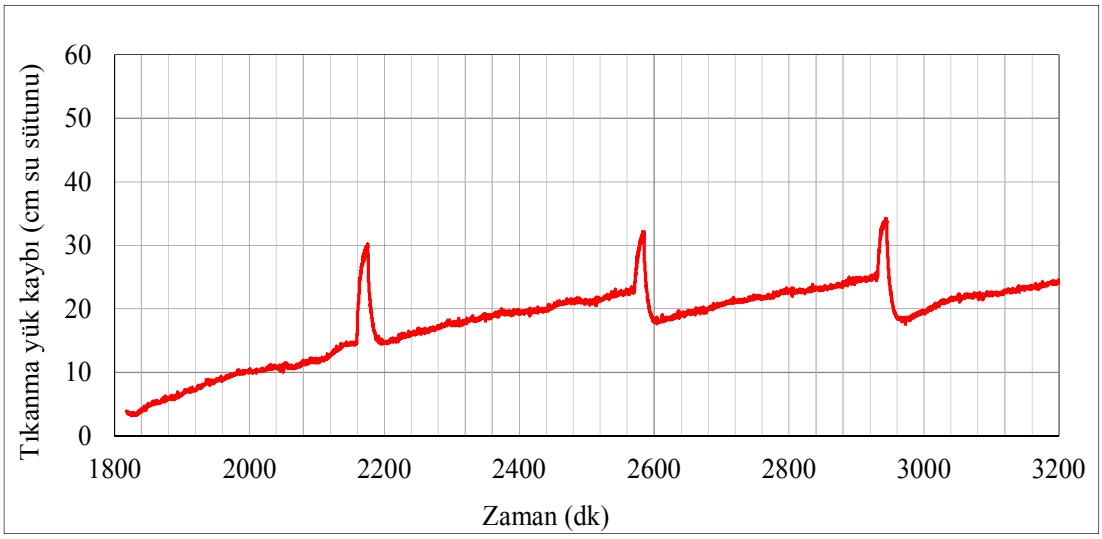
Şekil E.2. Deney 1'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.92 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



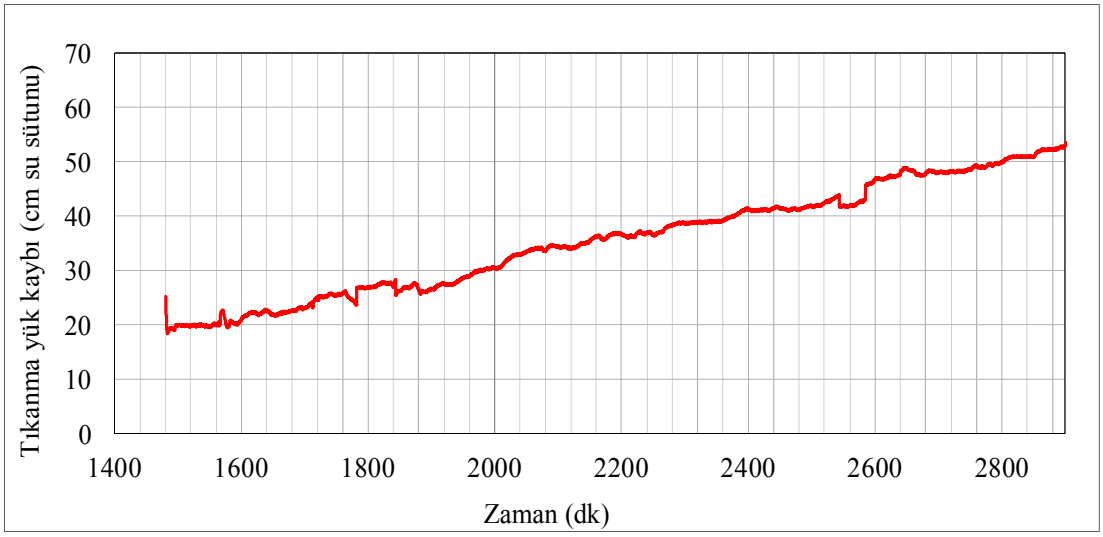
Şekil E.3. Deney 2'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



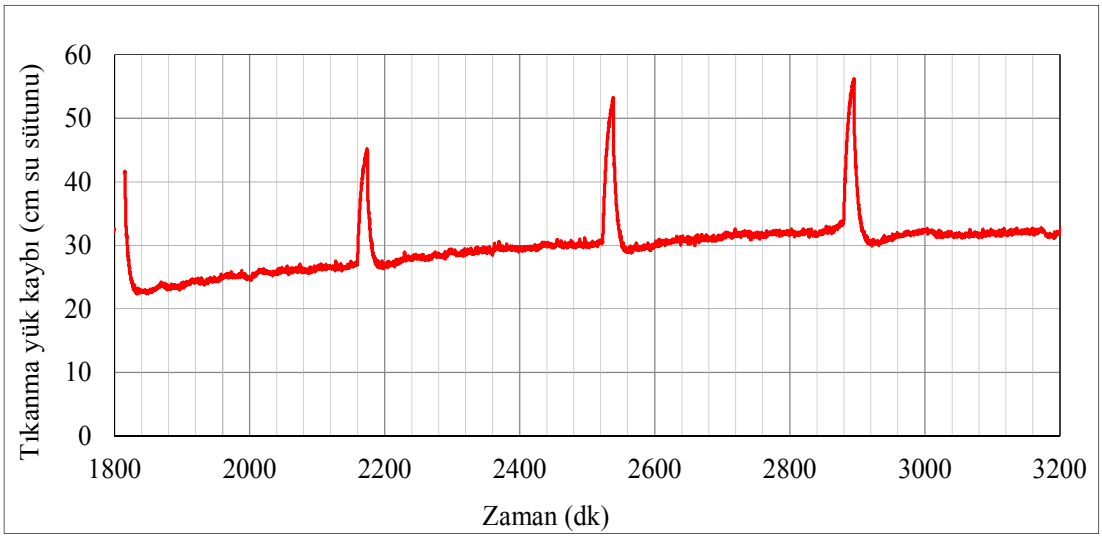
Şekil E.4. Deney 2'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



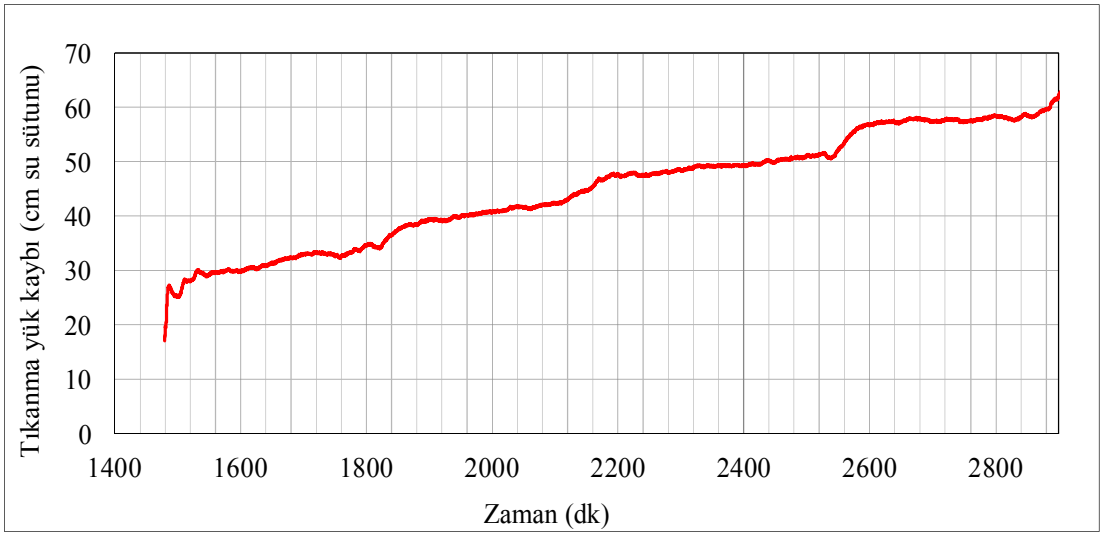
Şekil E.5. Deney 3'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



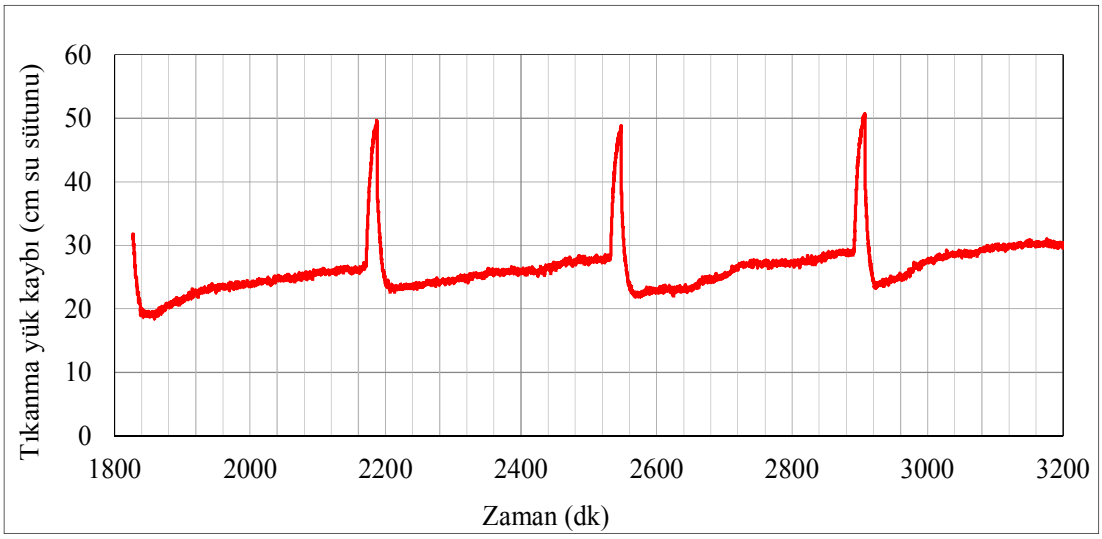
Şekil E.6. Deney 3'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



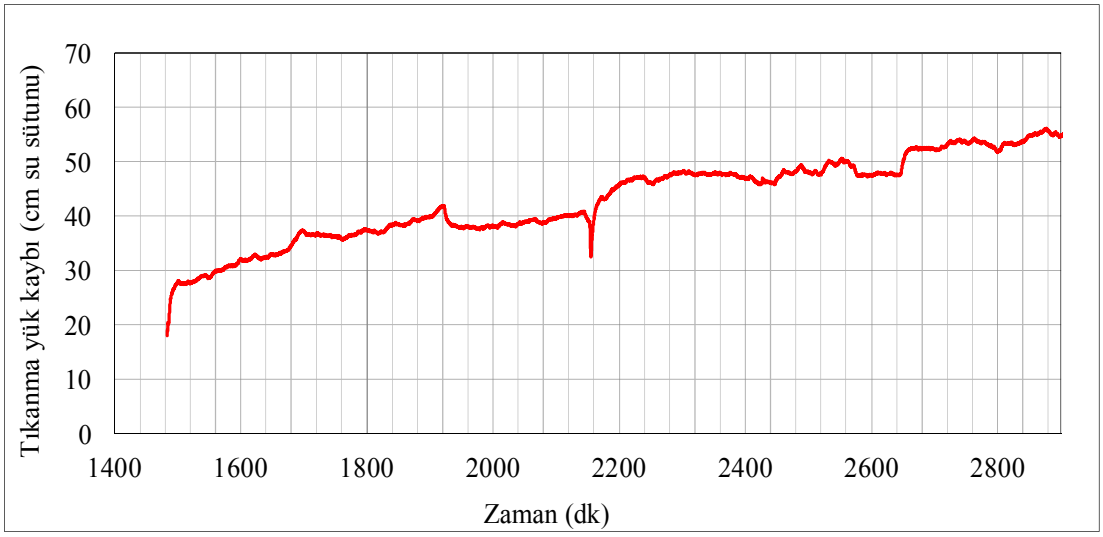
Şekil E.7. Deney 4'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.01 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



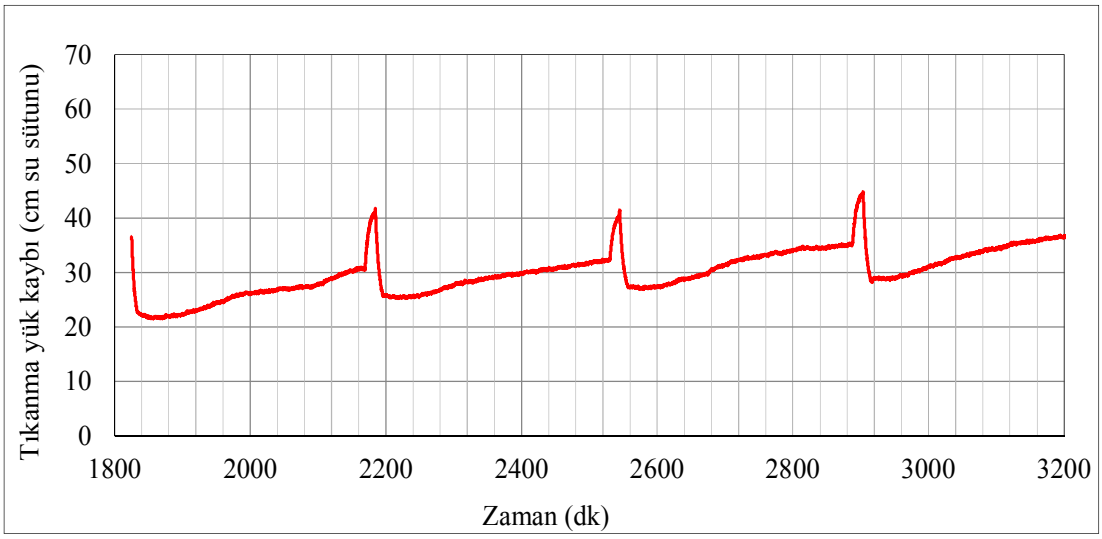
Şekil E.8. Deney 4'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.01 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



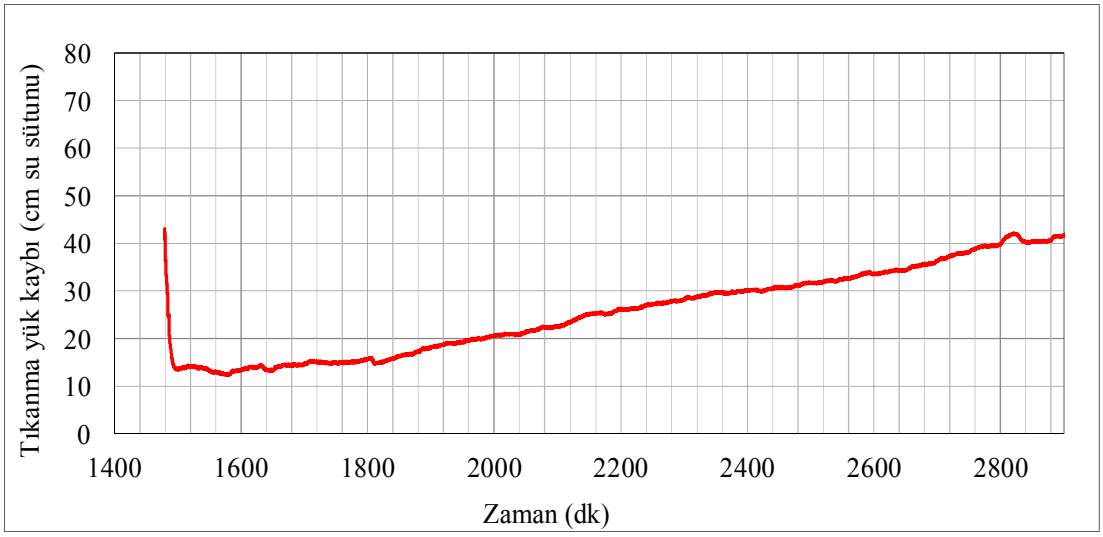
Şekil E.9. Deney 5'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.67 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



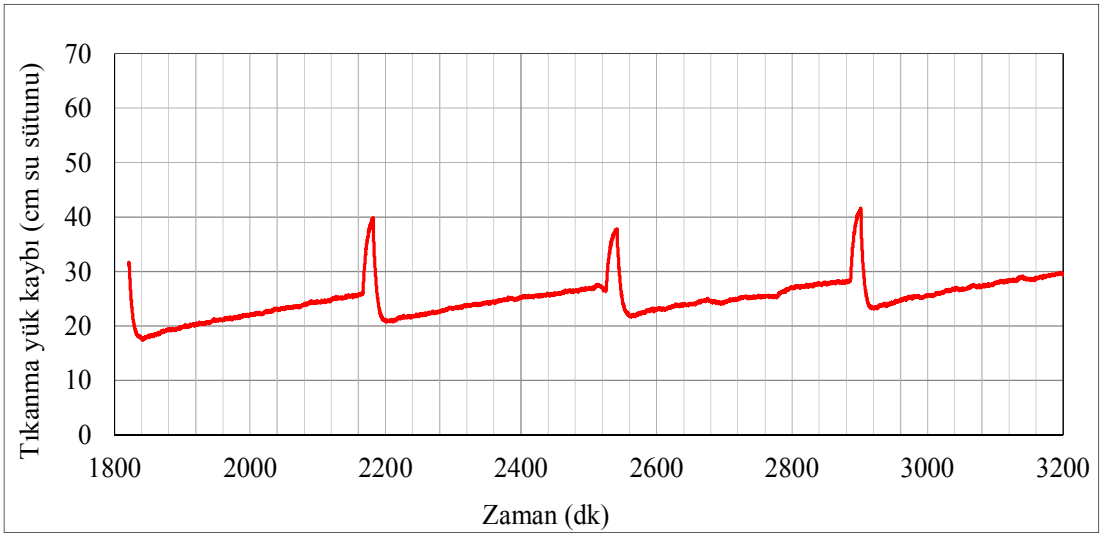
Şekil E.10. Deney 5'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.67 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



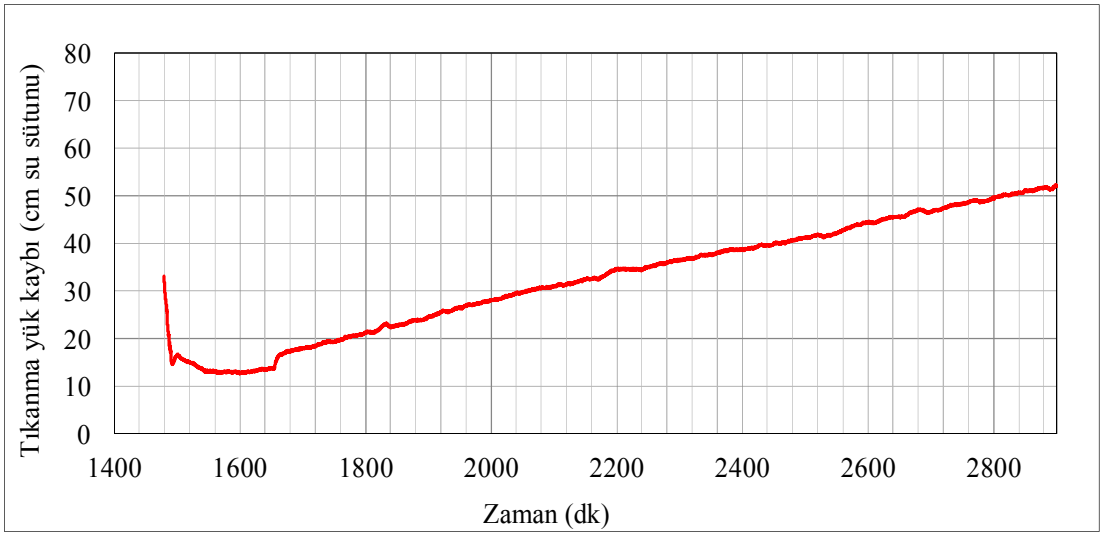
Şekil E.11. Deney 6'da bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.99 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



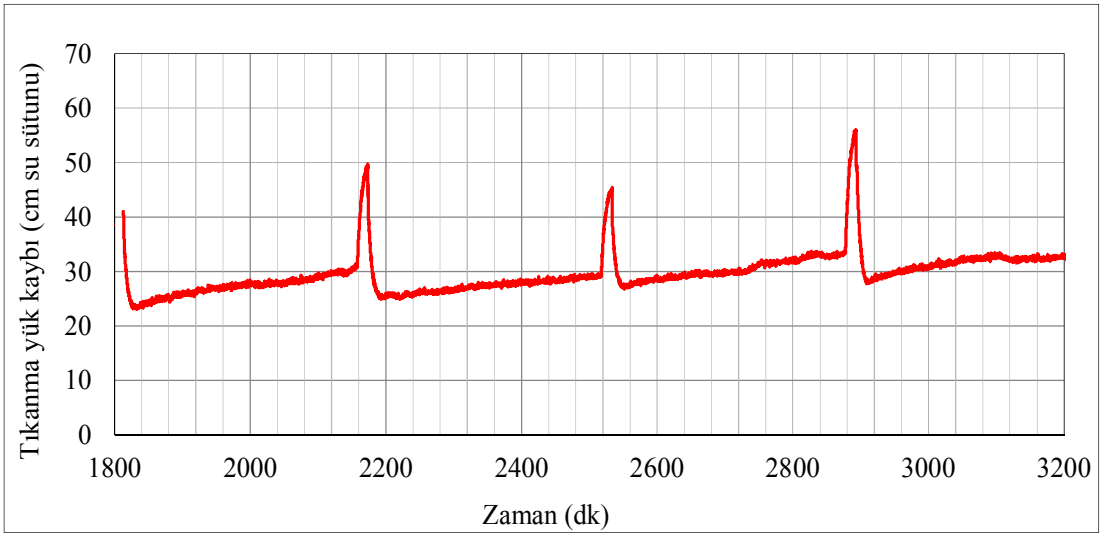
Şekil E.12. Deney 6'da SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.99 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



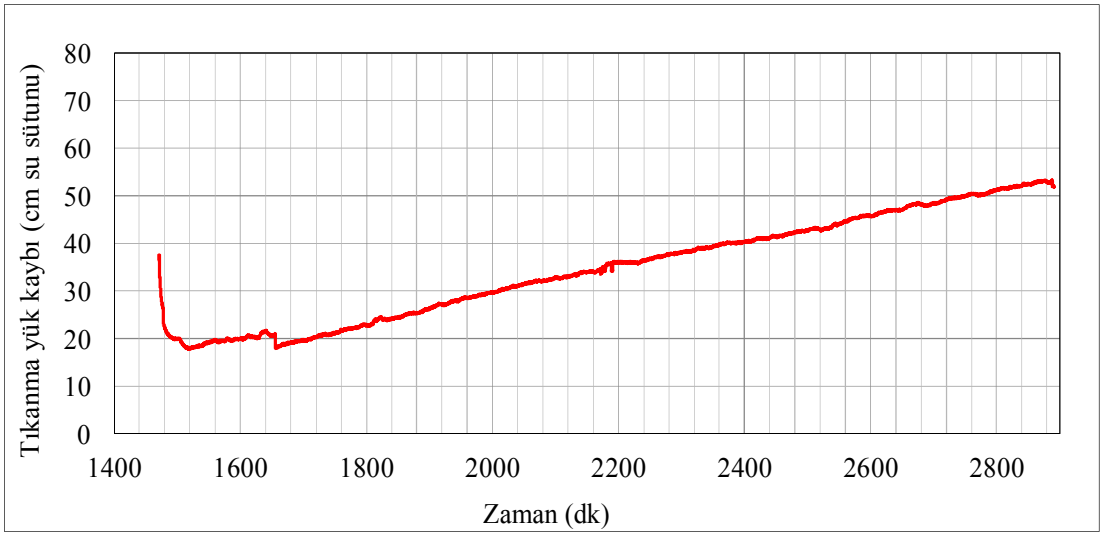
Şekil E.13. Deney 7'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.02 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



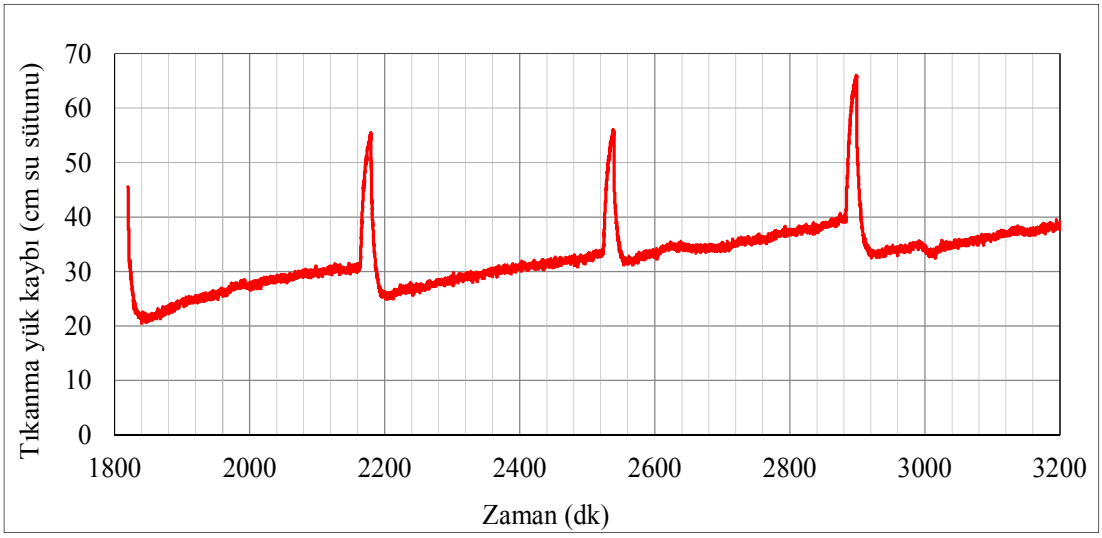
Şekil E.14. Deney 7'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.02 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



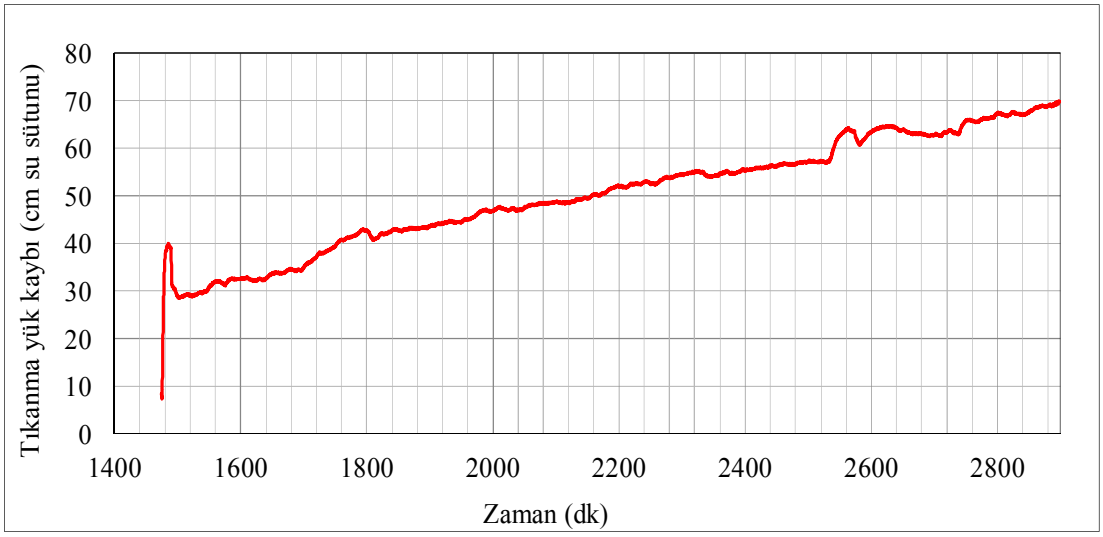
Şekil E.15. Deney 8'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.93 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



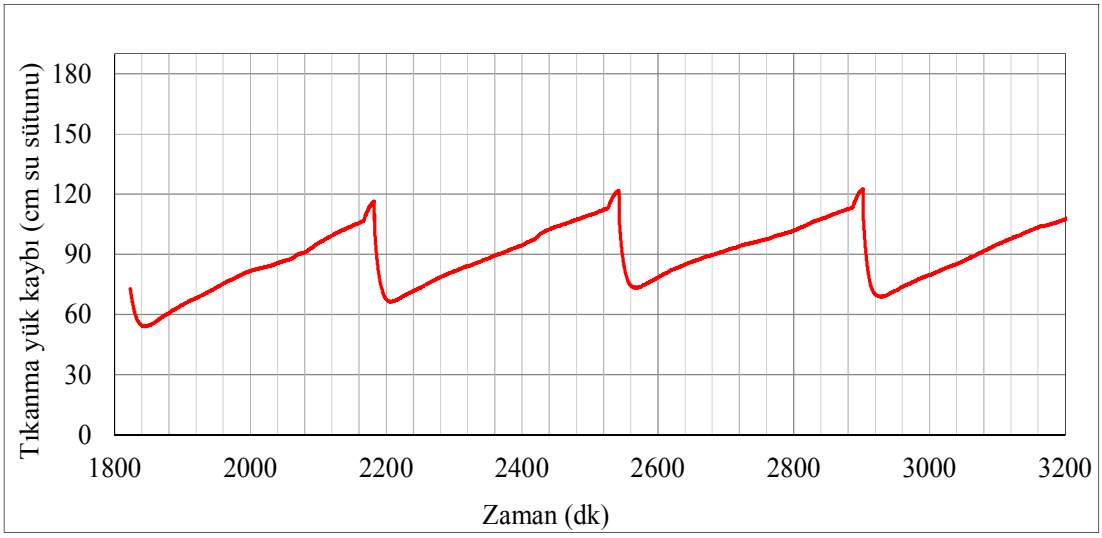
Şekil E.16. Deney 8'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.93 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



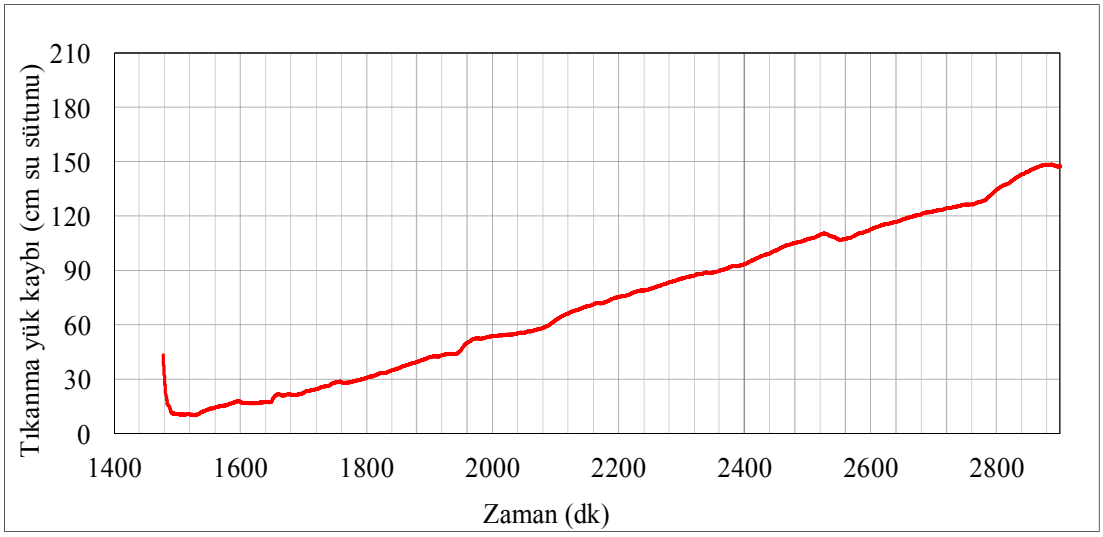
Şekil E.17. Deney 9'da bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.92 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



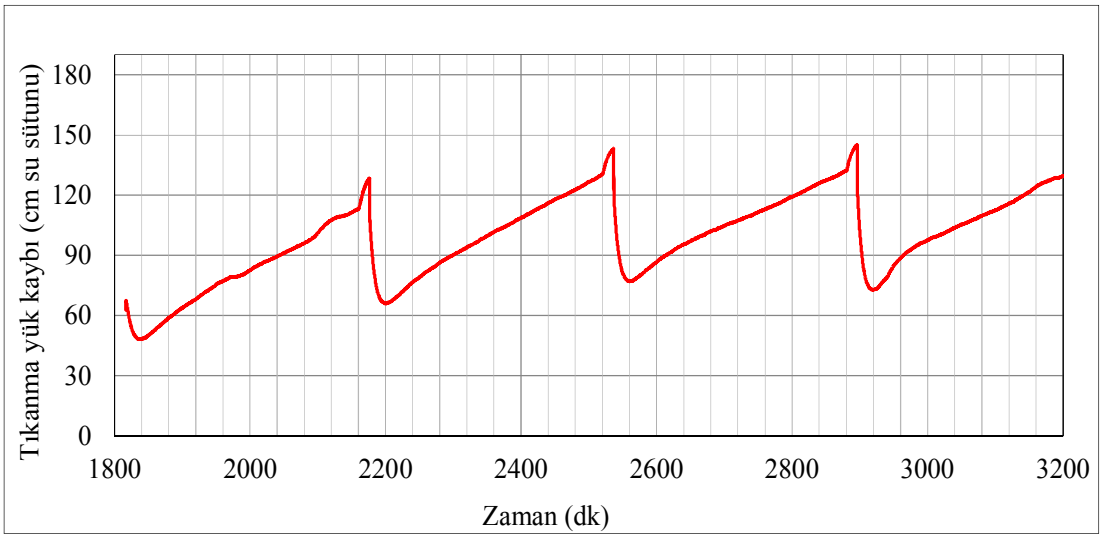
Şekil E.18. Deney 9'da SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



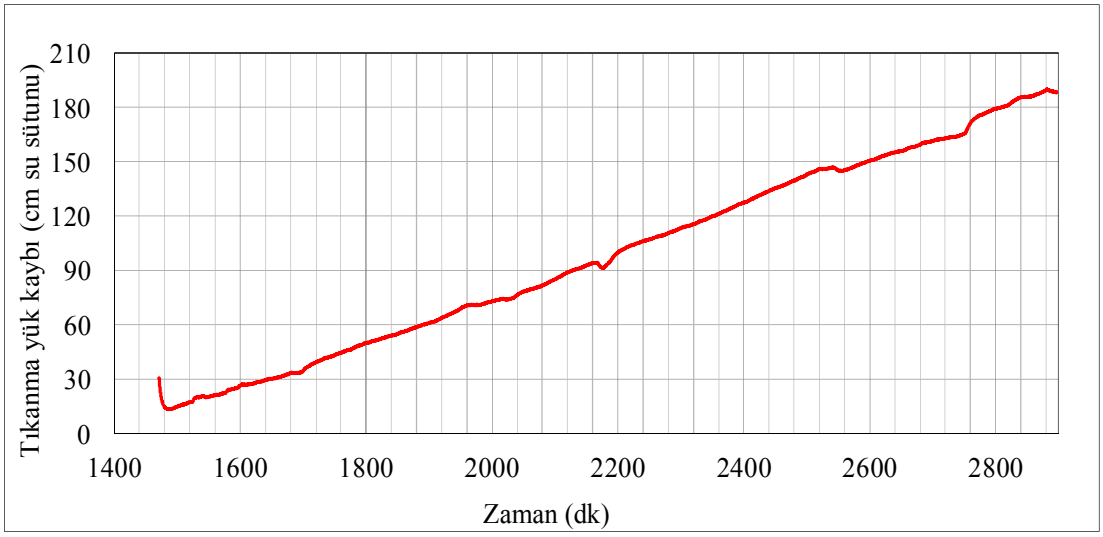
Şekil E.19. Deney 10'da bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



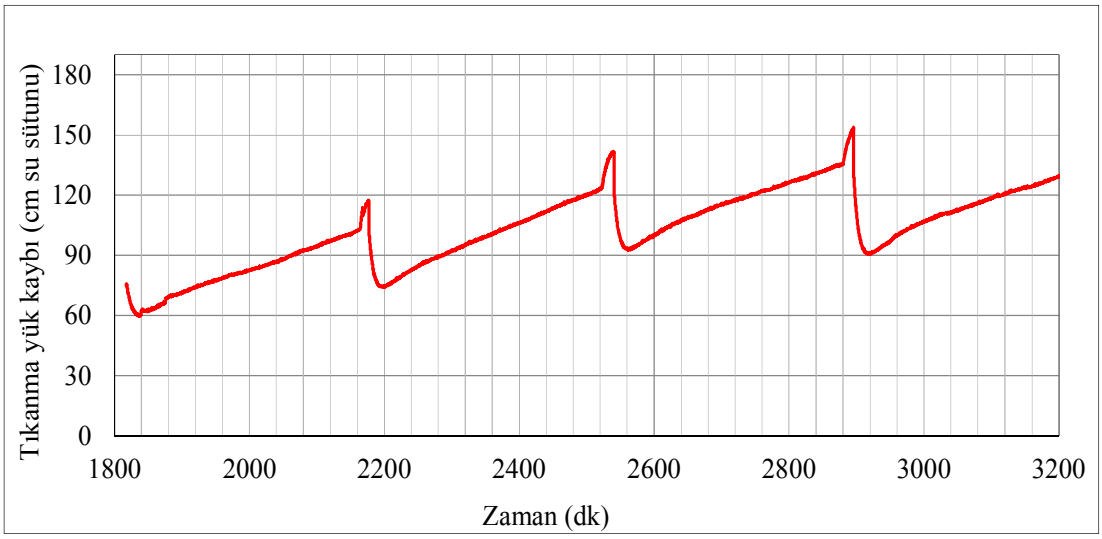
Şekil E.20. Deney 10'da SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



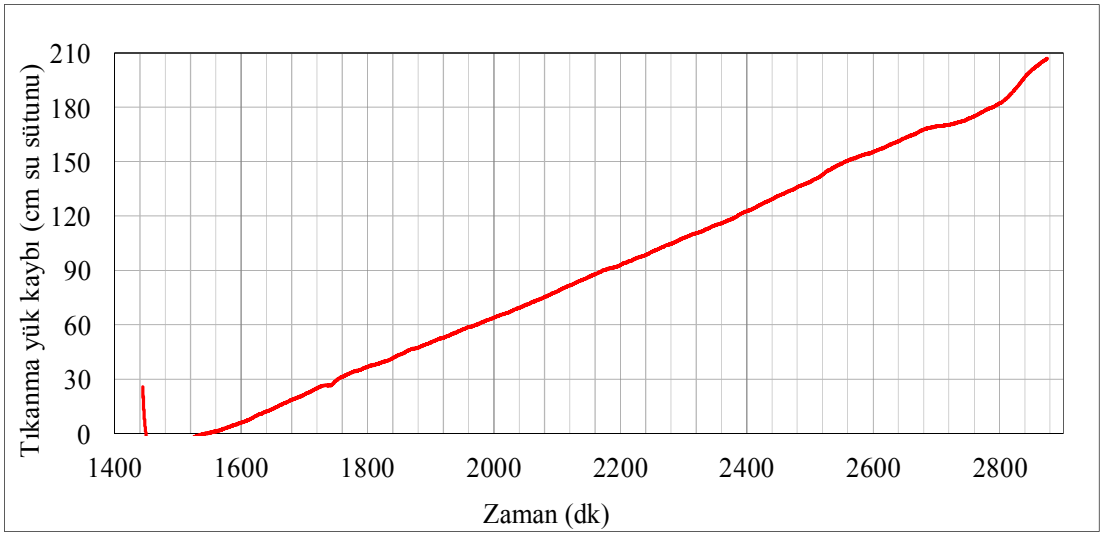
Şekil E.21. Deney 11'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.85 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



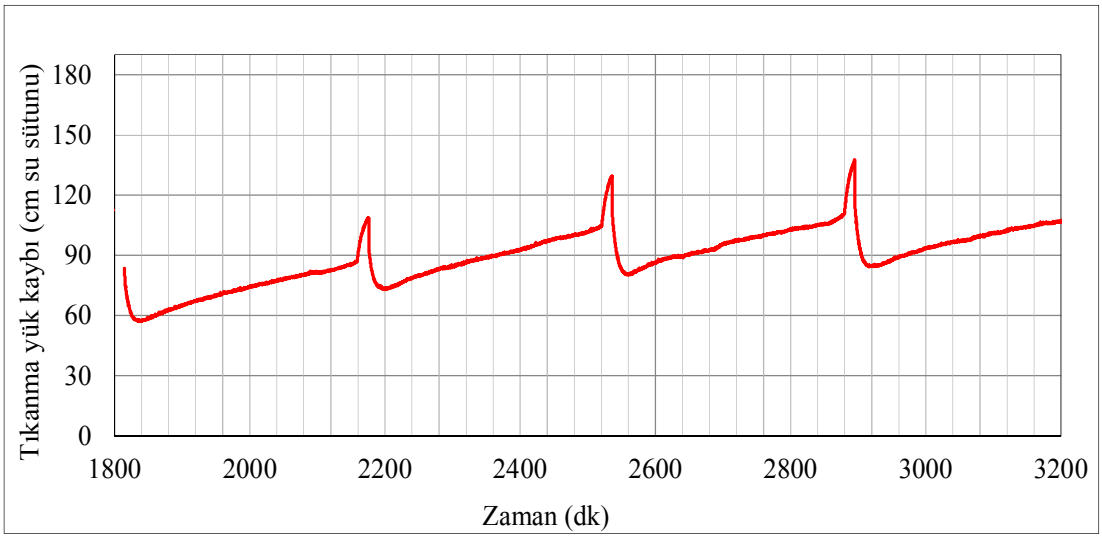
Şekil E.22. Deney 11'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.85 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



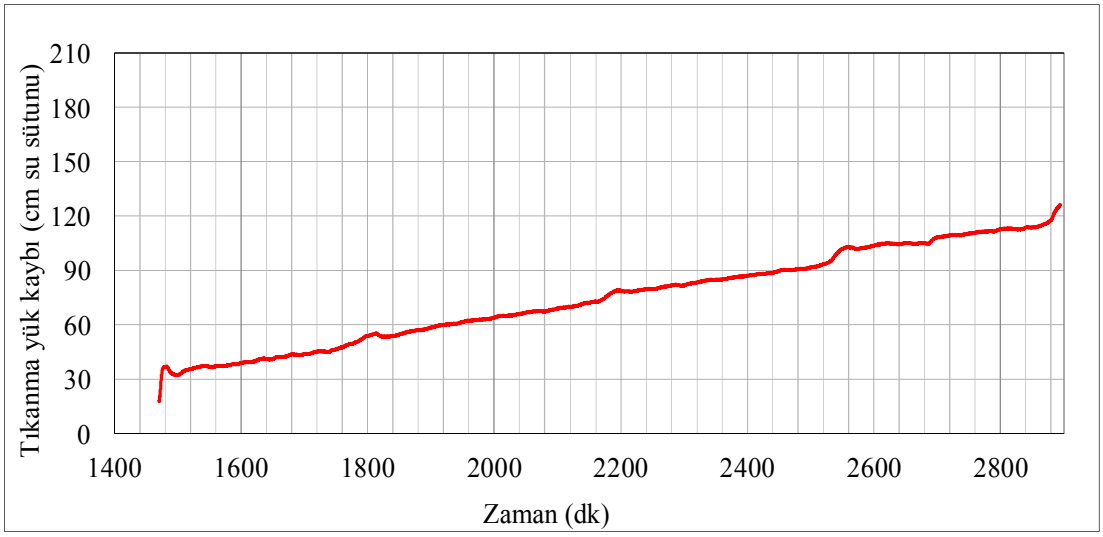
Şekil E.23. Deney 12'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



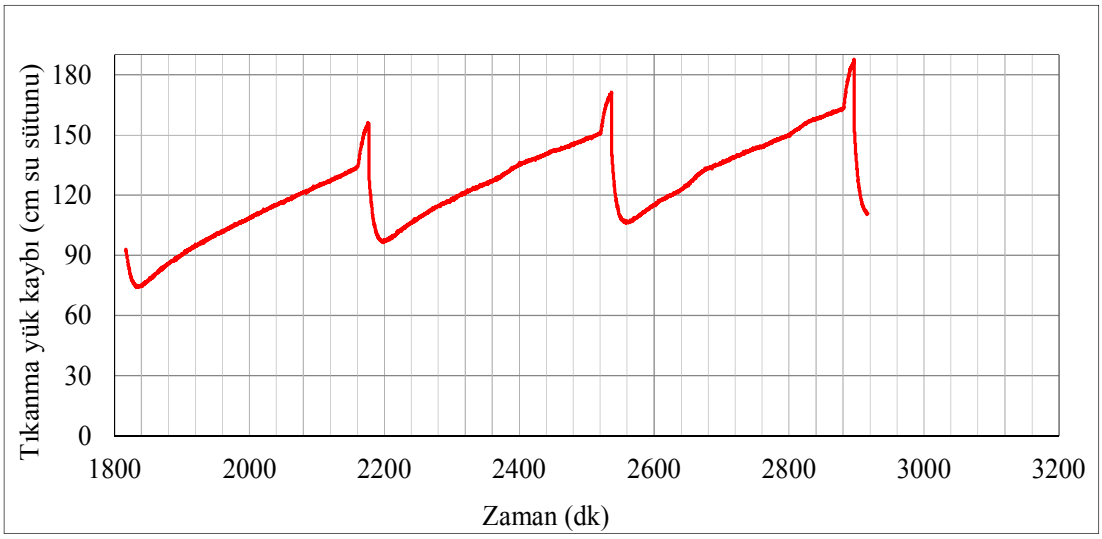
Şekil E.24. Deney 12'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 10 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



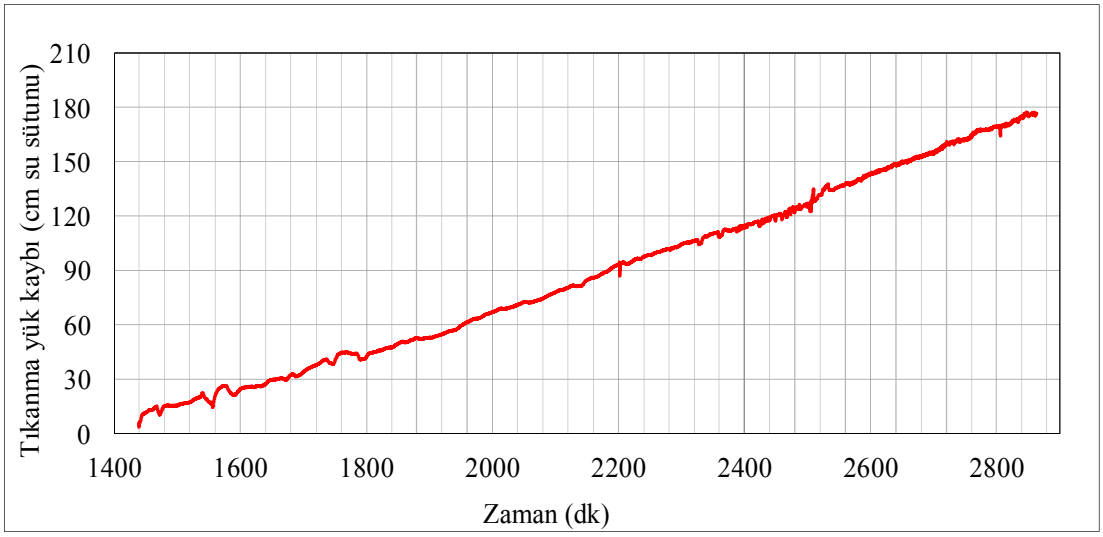
Şekil E.25. Deney 13'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.95 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



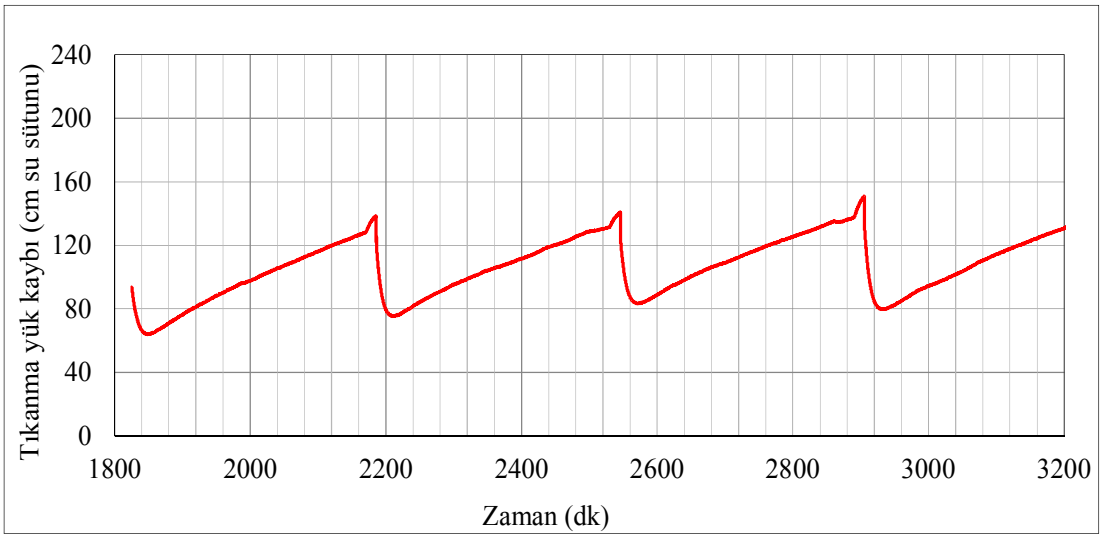
Şekil E.26. Deney 13'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.95 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



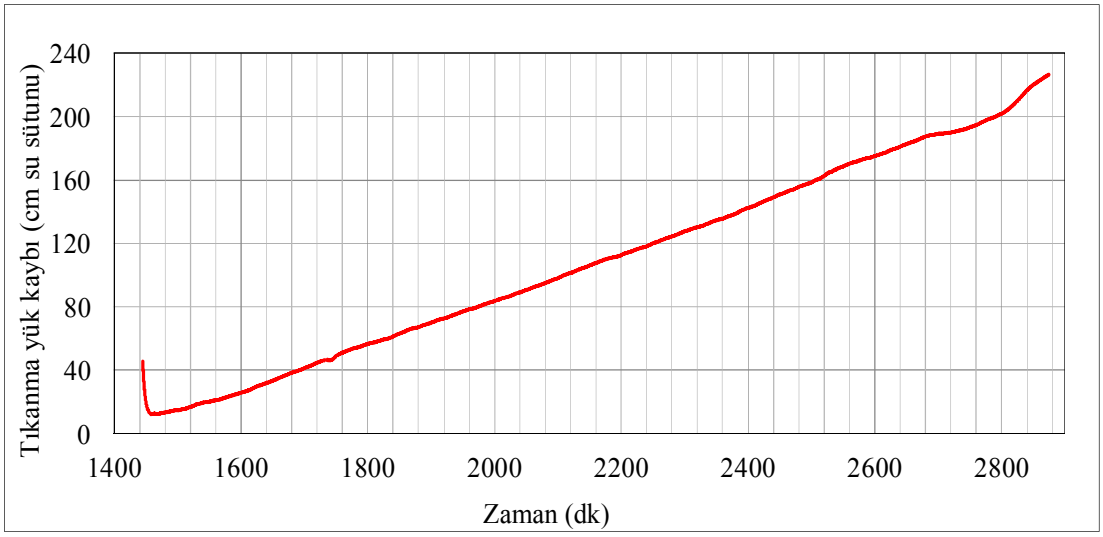
Şekil E.27. Deney 14'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.46 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.4 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



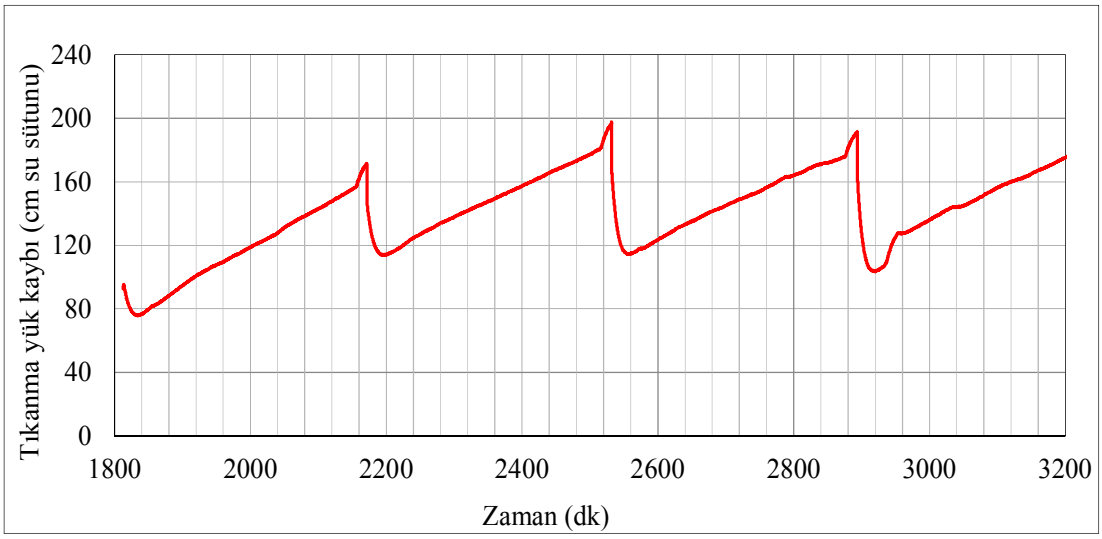
Şekil E.28. Deney 14'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.46 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.4 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



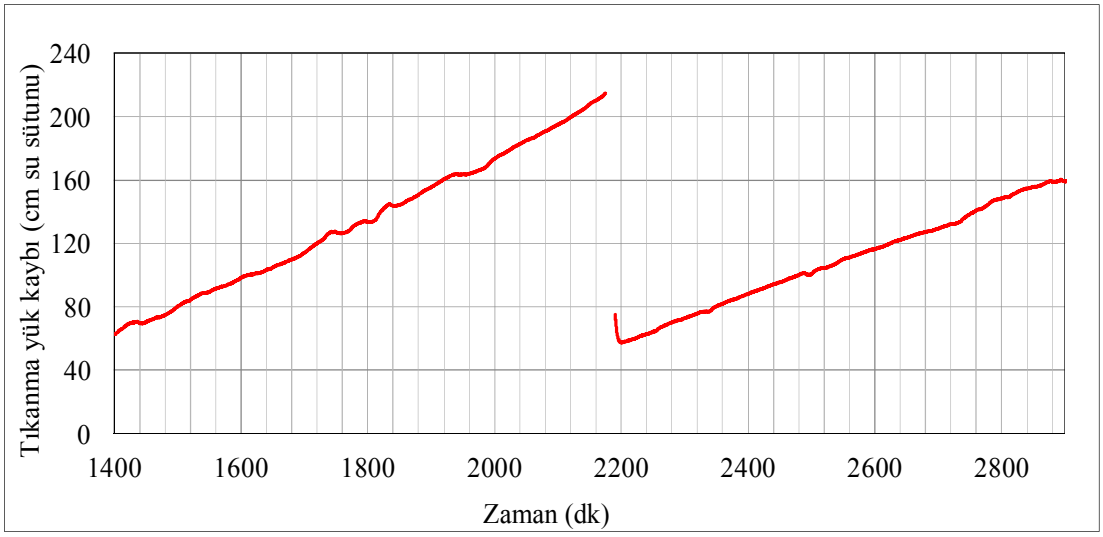
Şekil E.29. Deney 15'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.90 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



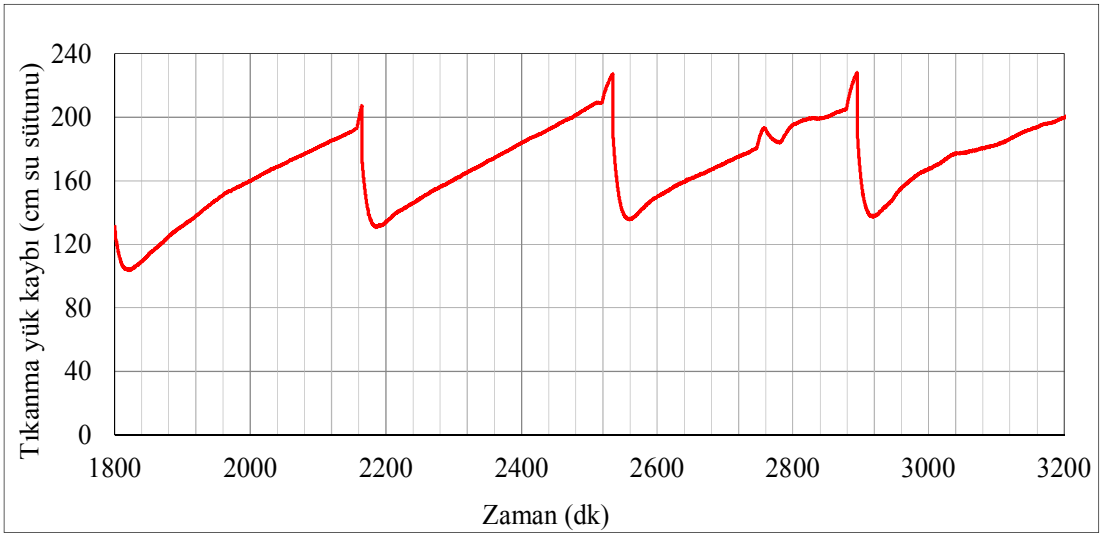
Şekil E.30. Deney 15'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.90 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).



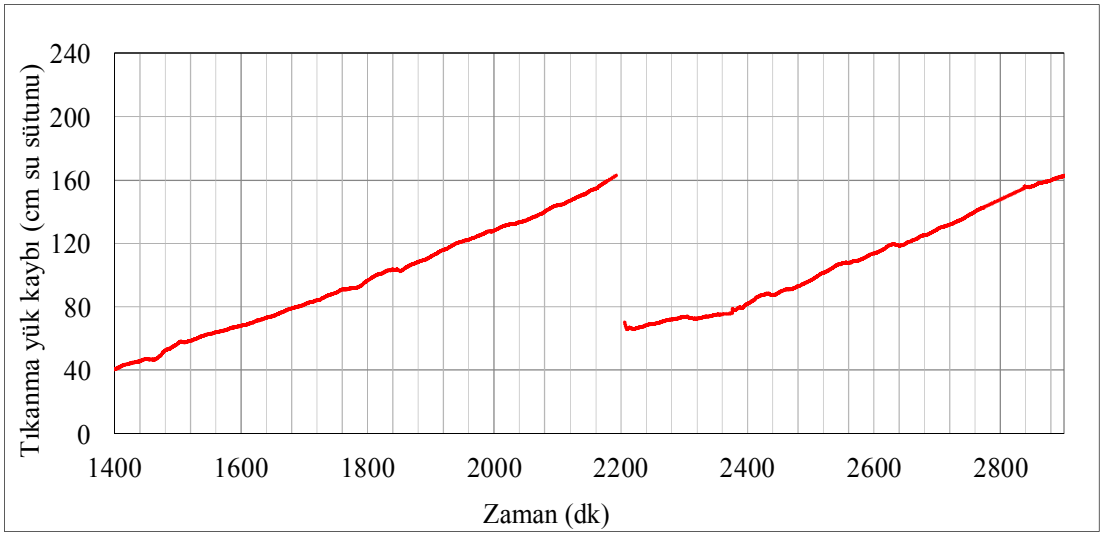
Şekil E.31. Deney 16'da bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.87 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).



Şekil E.32. Deney 16'da SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.87 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).

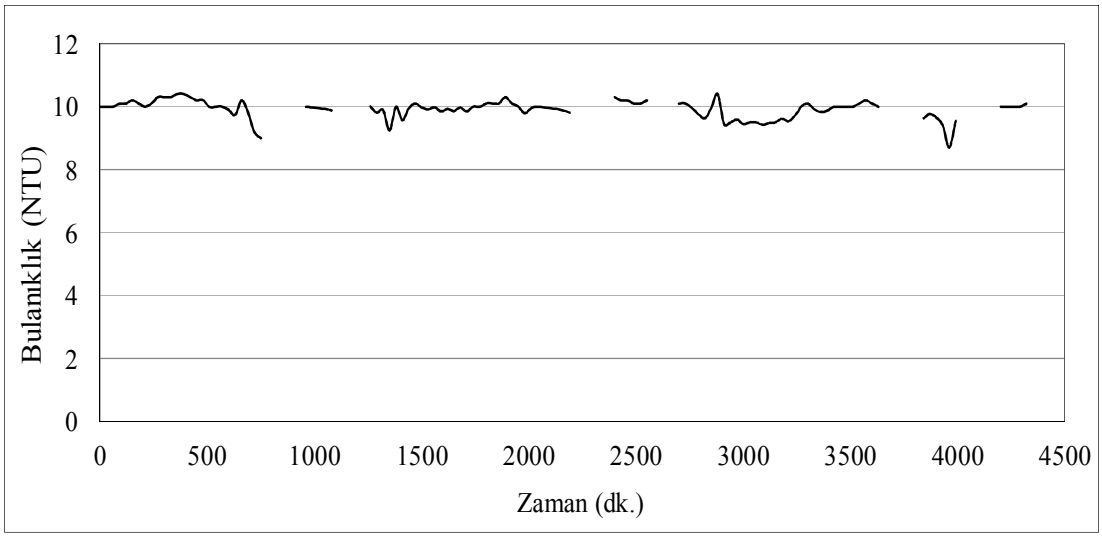


Şekil E.33. Deney 17'de bir AD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü, ADF 1).

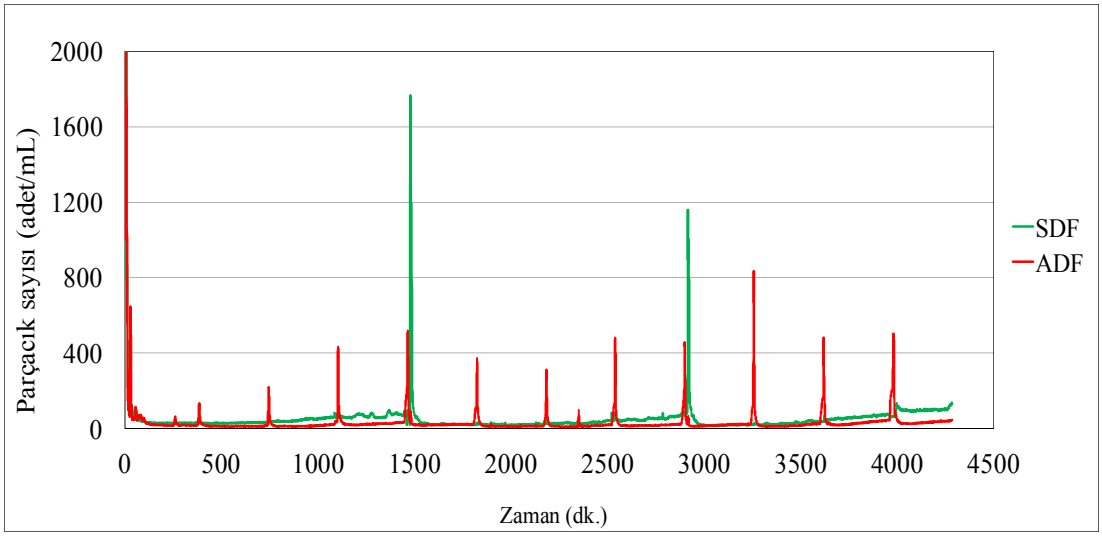


Şekil E.34. Deney 17'de SD filtresinde filtrasyon süresince meydana gelen tıkanma yük kaybı (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa, 2. Filtrasyon döngüsü).

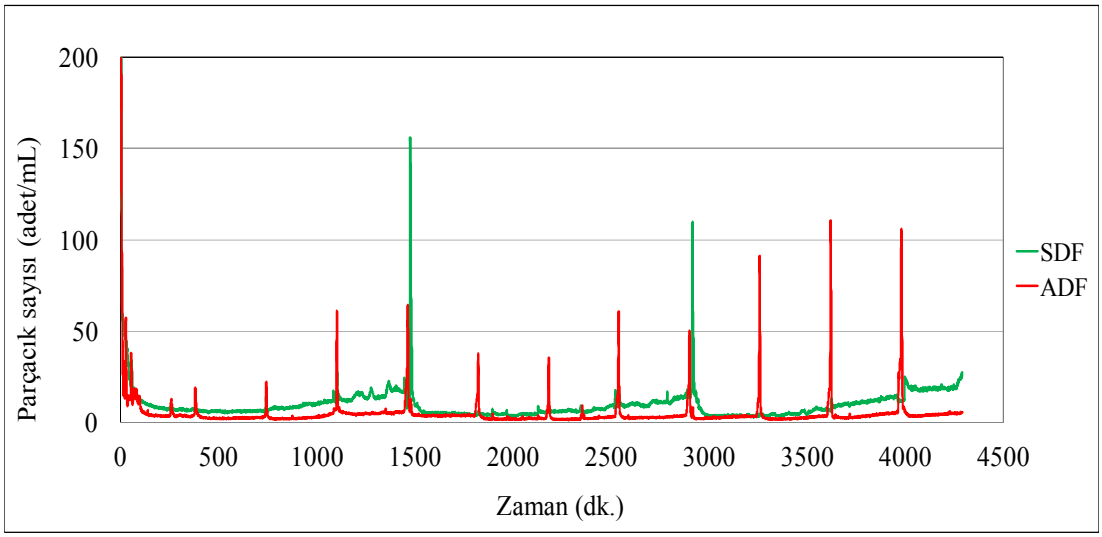
EK-F. Filtrelerde su kalitesi ölçümlerine ait ham su bulanıklığı ve çıkış suyu parçacık sayısının filtrasyon süresince değişimlerini gösteren grafikler



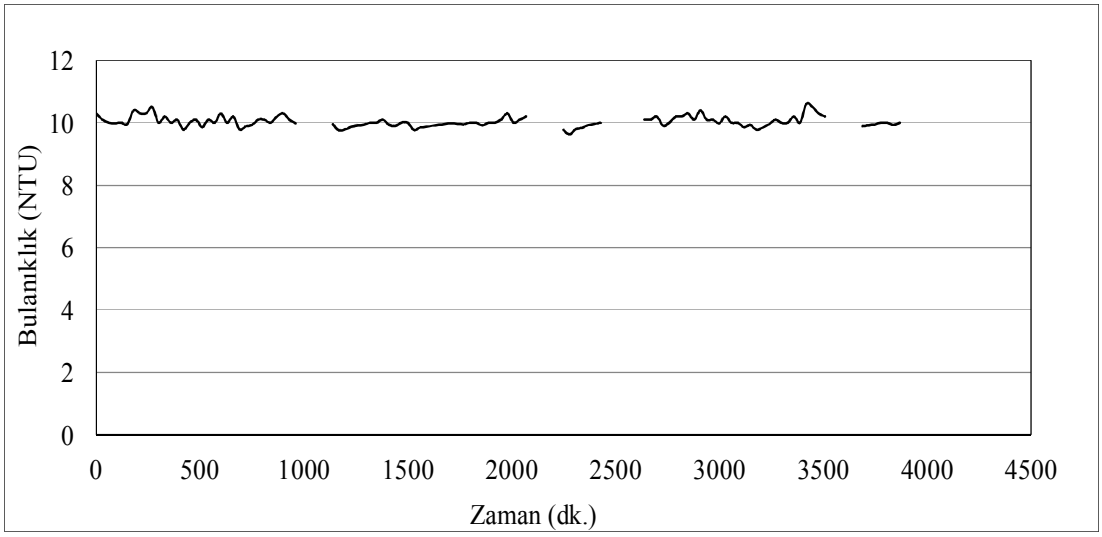
Şekil F.1. Deney 1'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



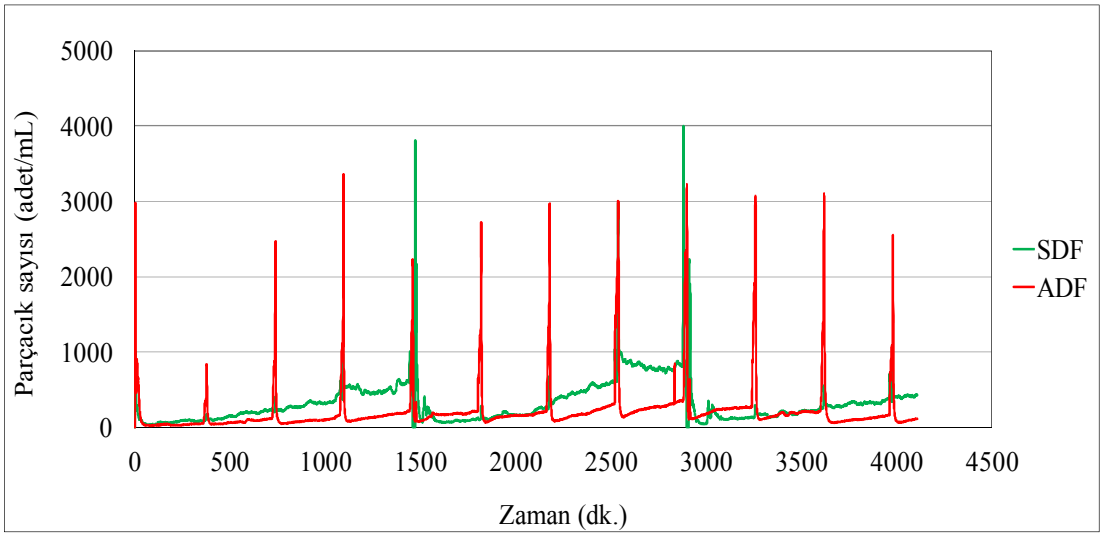
Şekil F.2. Deney 1'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.92 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



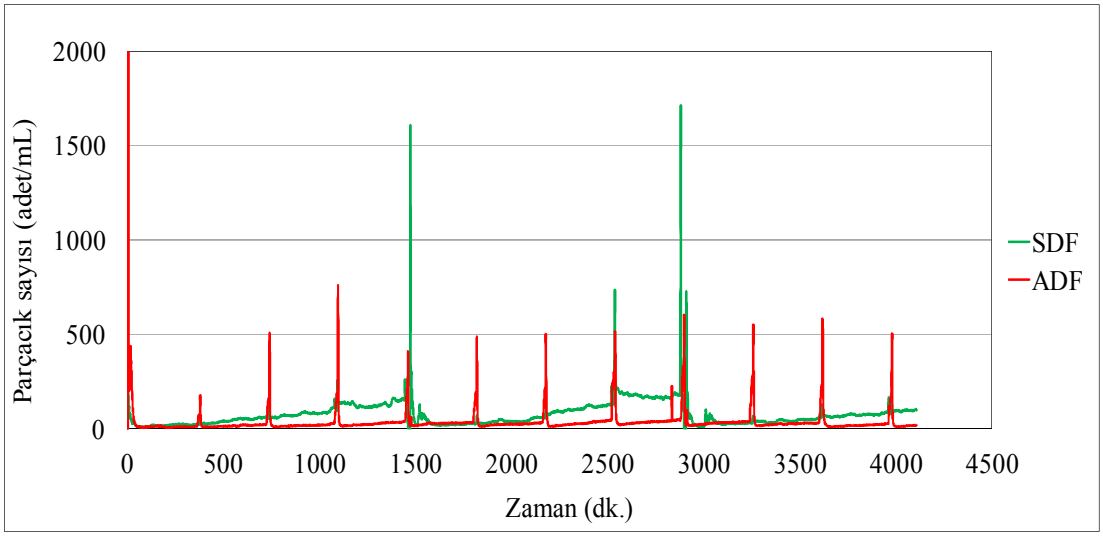
Şekil F.3. Deney 1'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.92 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



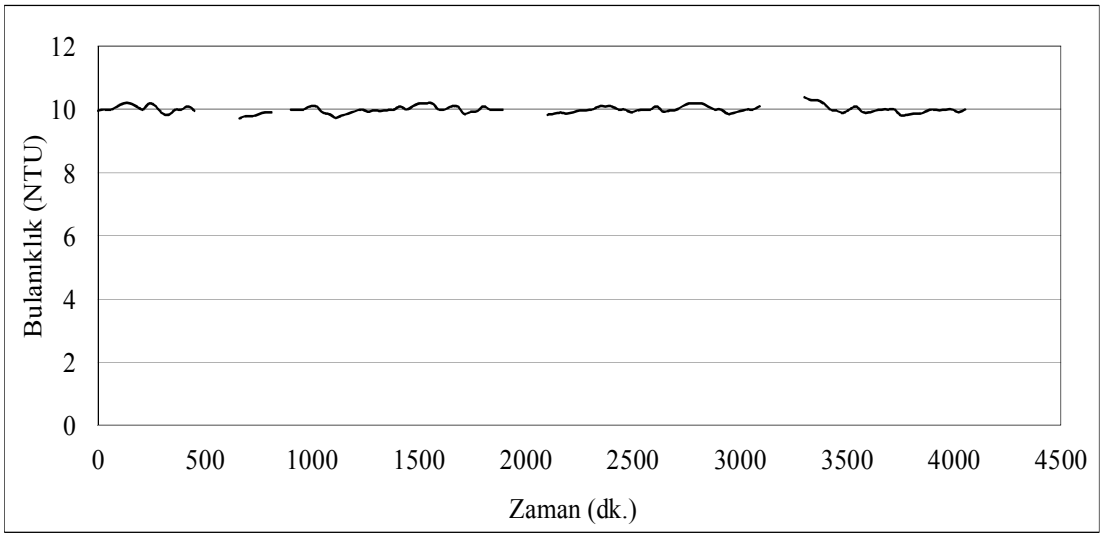
Şekil F.4. Deney 2'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



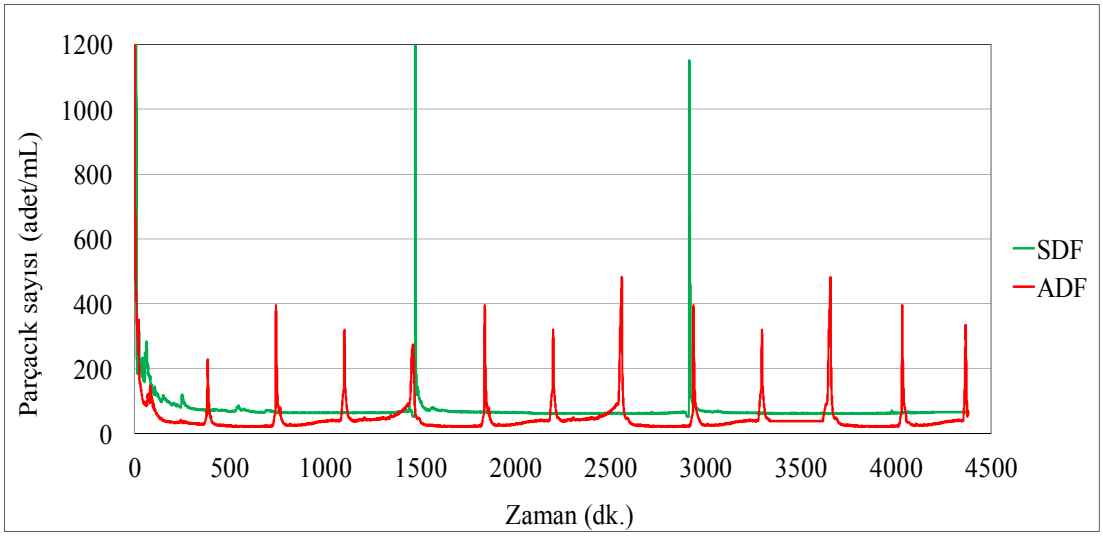
Şekil F.5. Deney 2'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



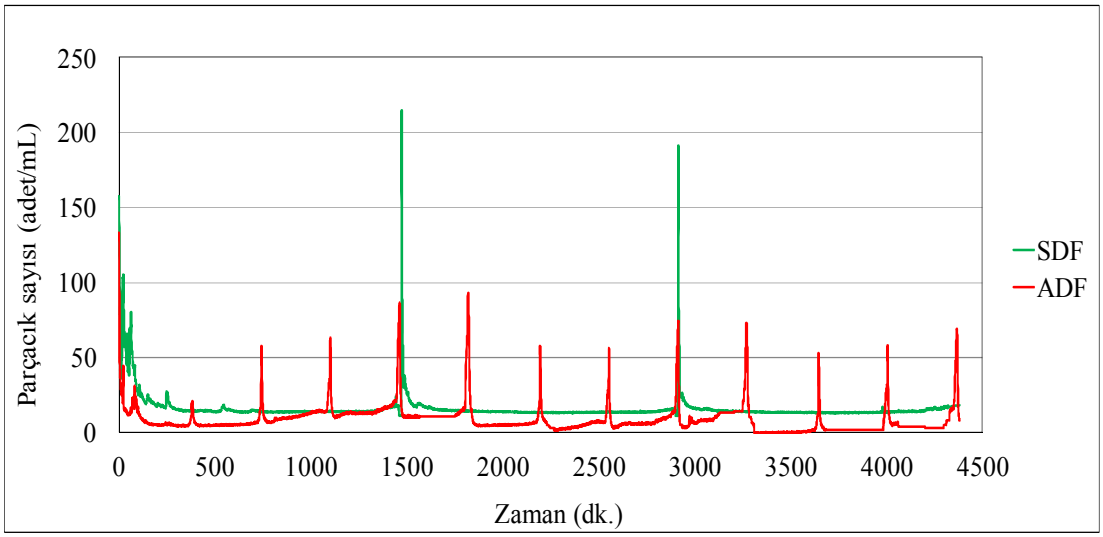
Şekil F.6. Deney 2'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



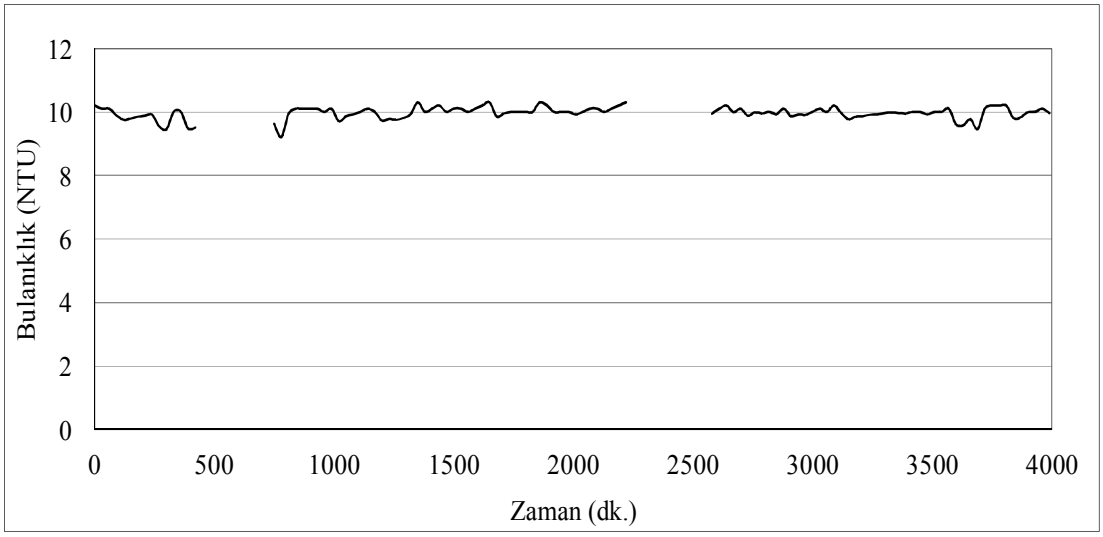
Şekil F.7. Deney 3'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



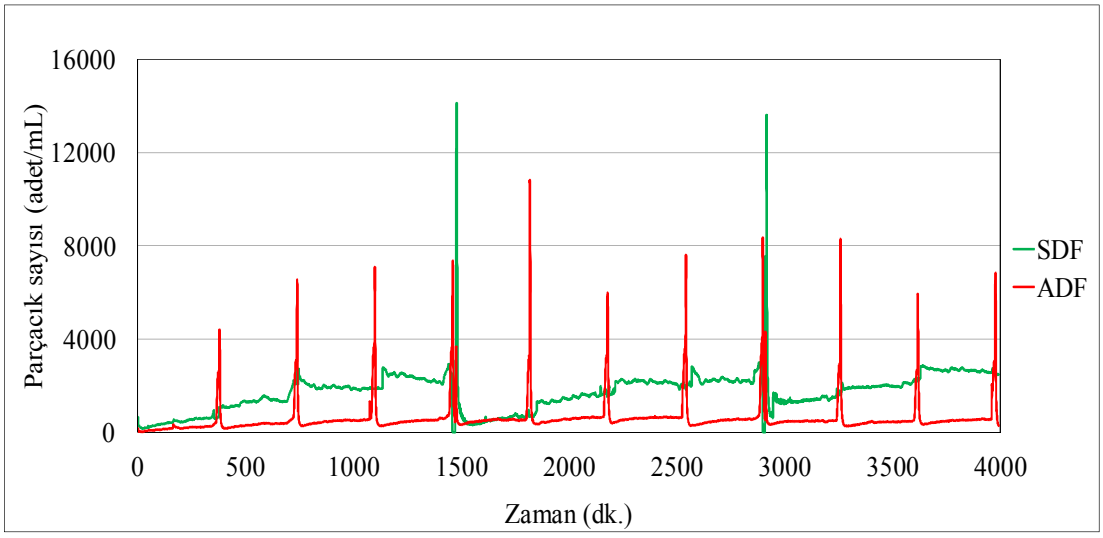
Şekil F.8. Deney 3'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



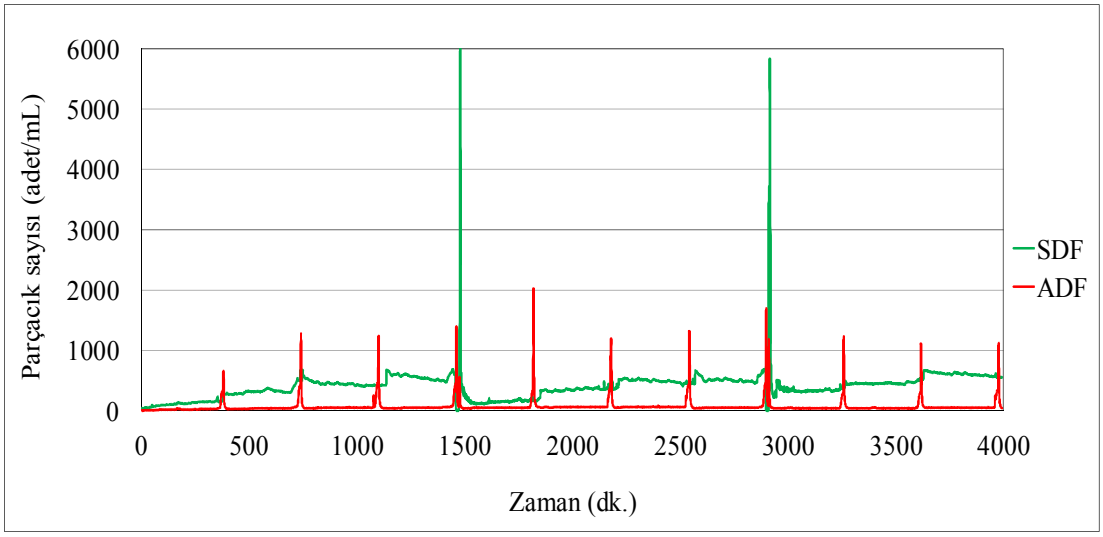
Şekil F.9. Deney 3'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



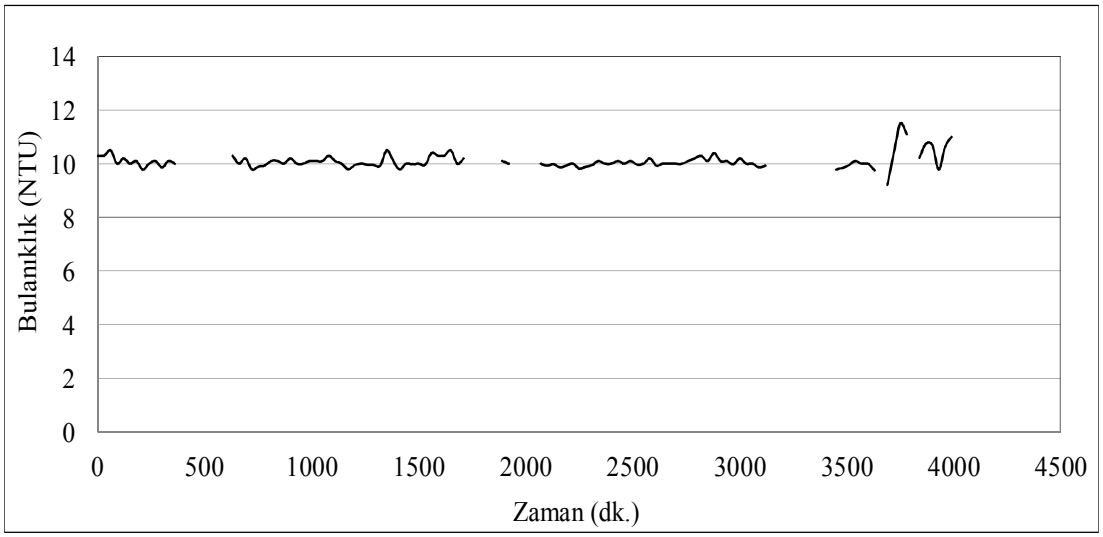
Şekil F.10. Deney 4'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



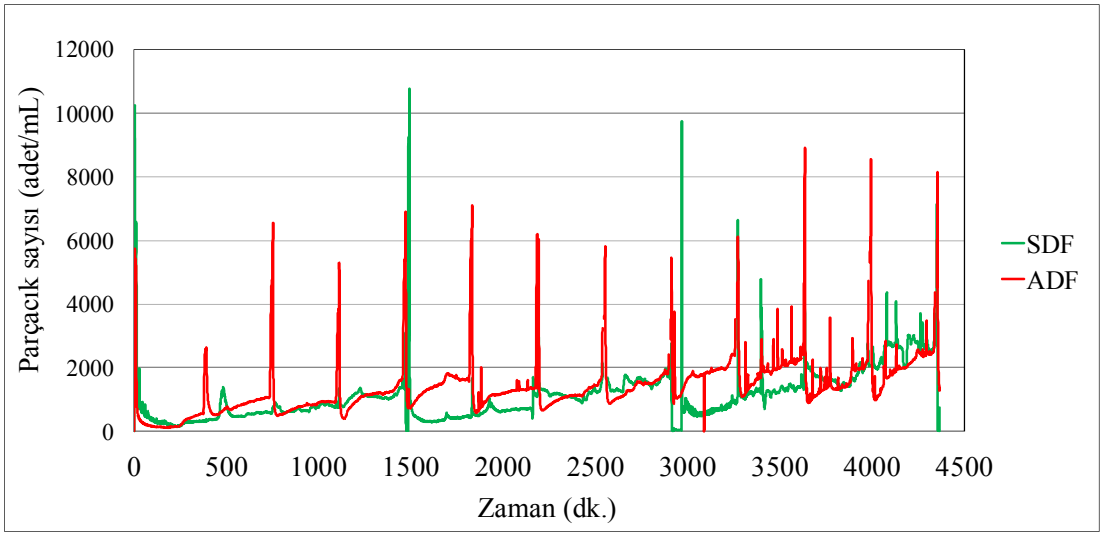
Şekil F.11. Deney 4'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.01 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



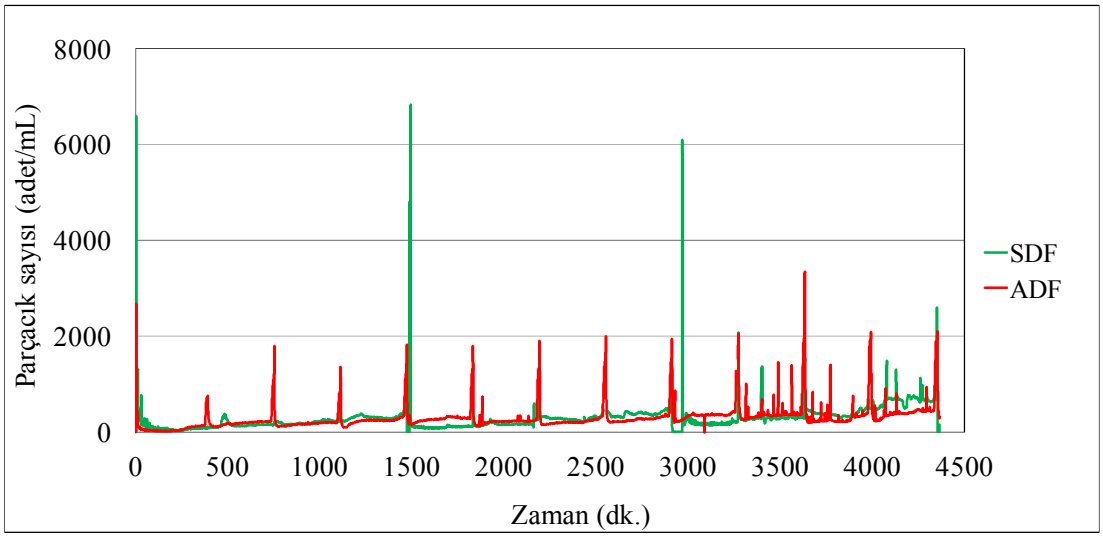
Şekil F.12. Deney 4'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.01 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



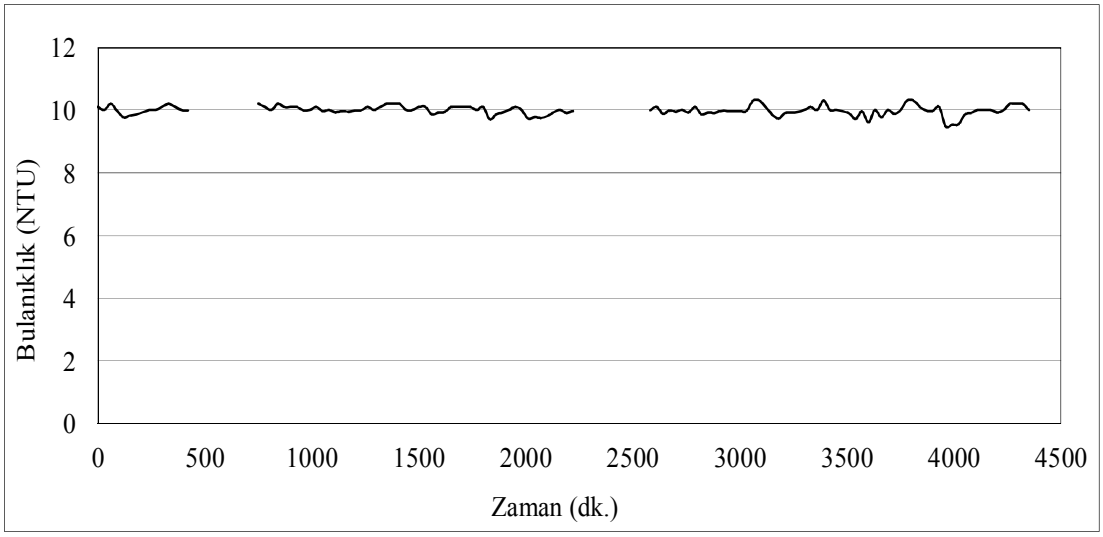
Şekil F.13. Deney 5'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



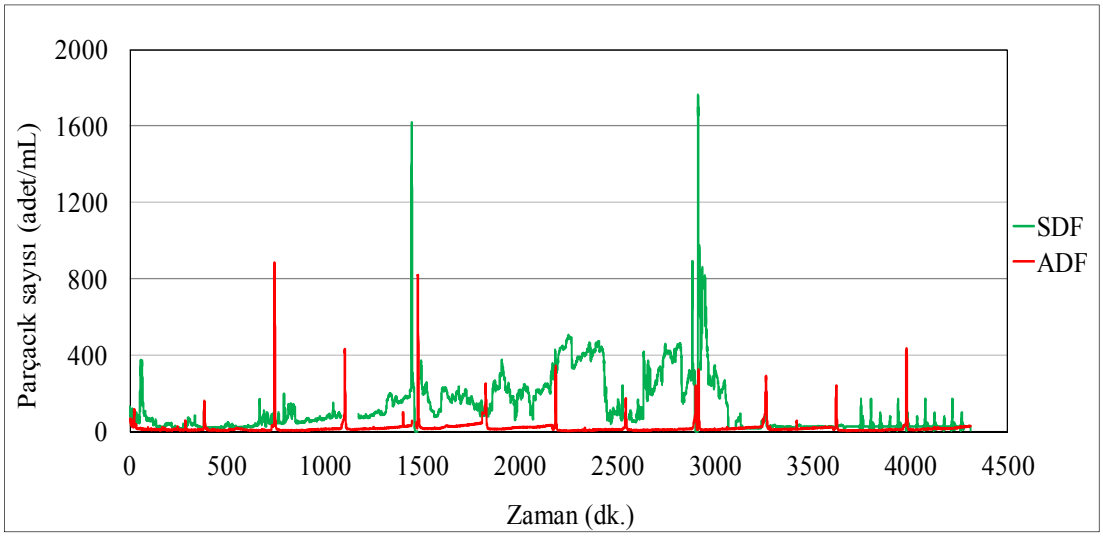
Şekil F.14. Deney 5'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.67 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).



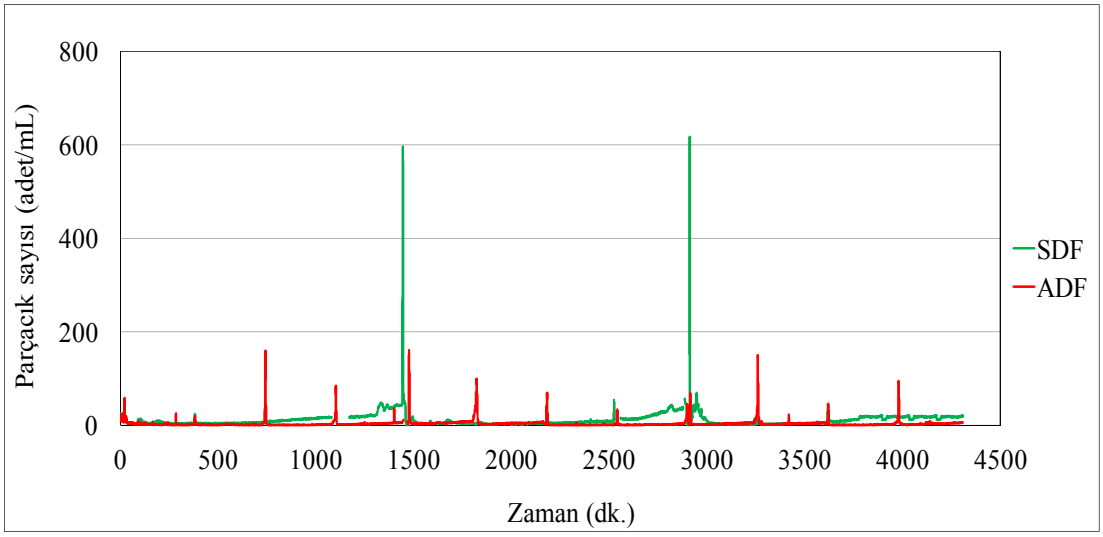
Şekil F.15. Deney 5'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.67 NTU, alum dozajı: 5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).



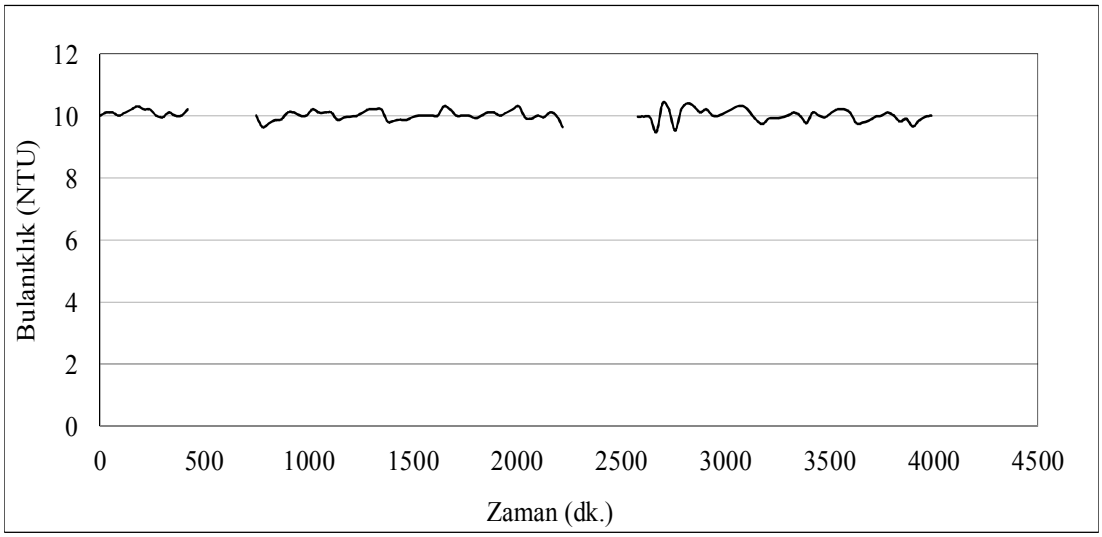
Şekil F.16. Deney 6'da kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



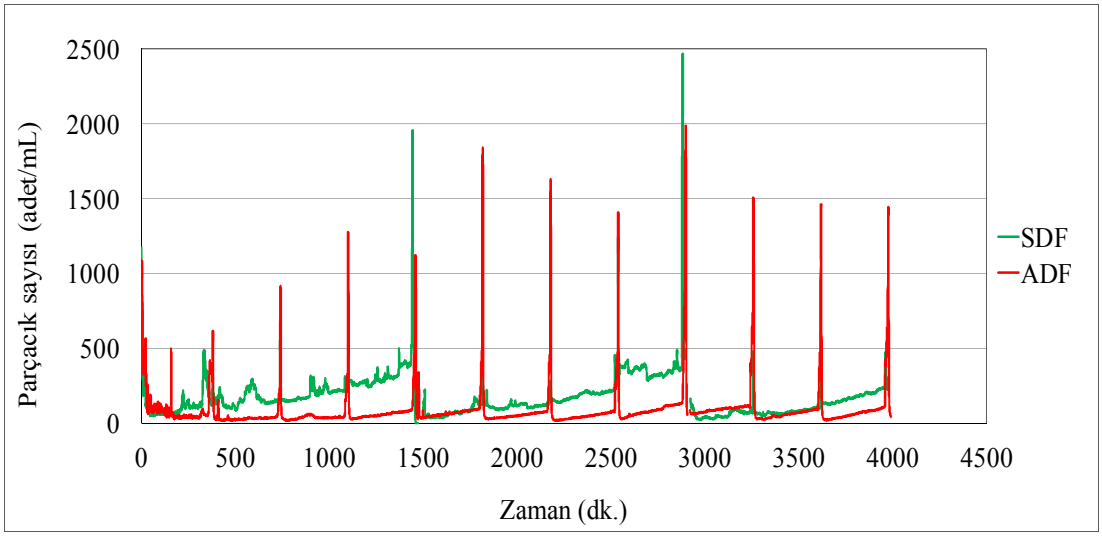
Şekil F.17. Deney 6'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.99 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



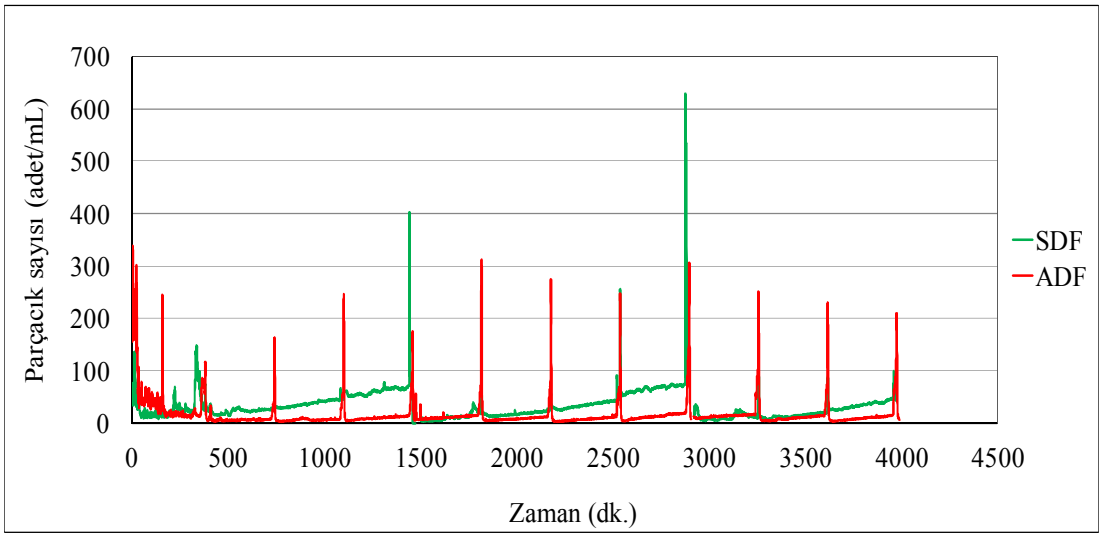
Şekil F.18. Deney 6'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.99 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



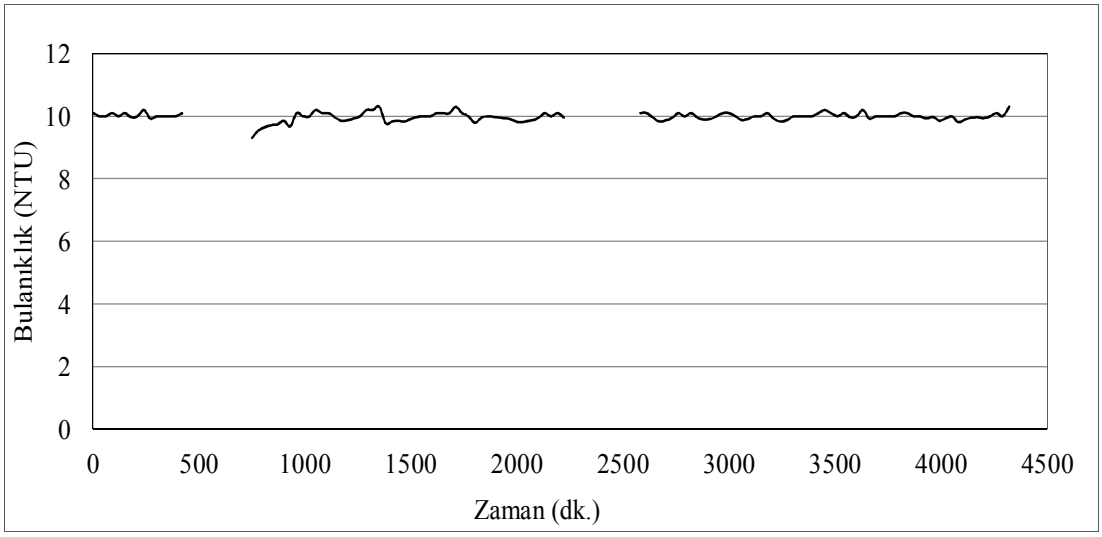
Şekil F.19. Deney 7'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



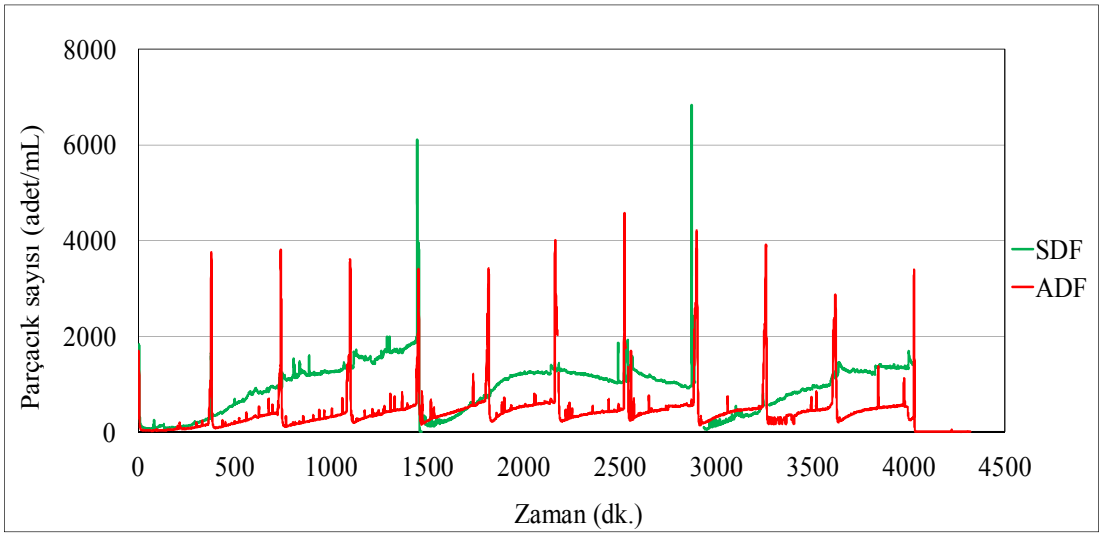
Şekil F.20. Deney 7'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.02 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



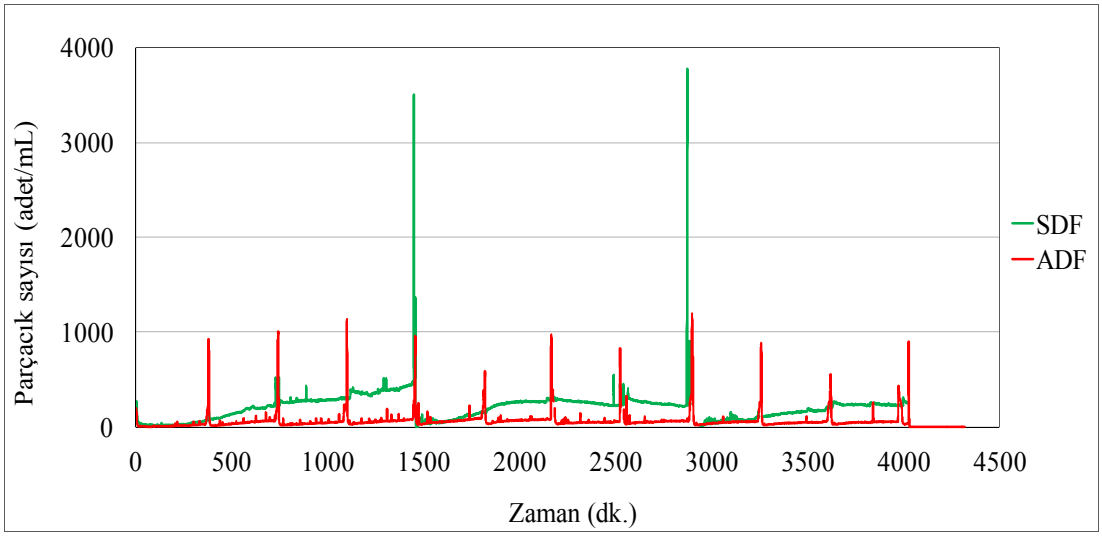
Şekil F.21. Deney 7'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.02 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



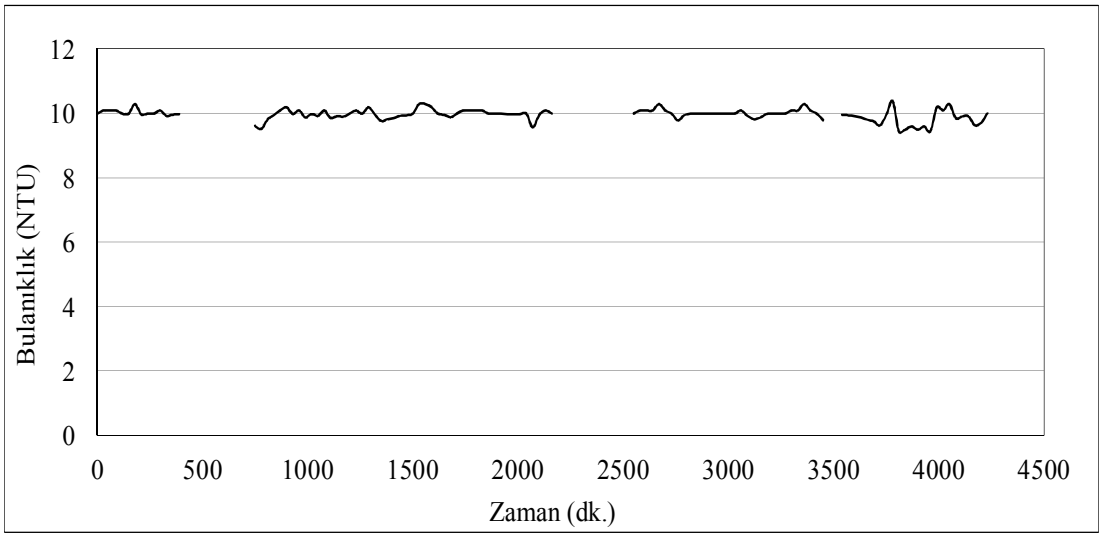
Şekil F.22. Deney 8'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



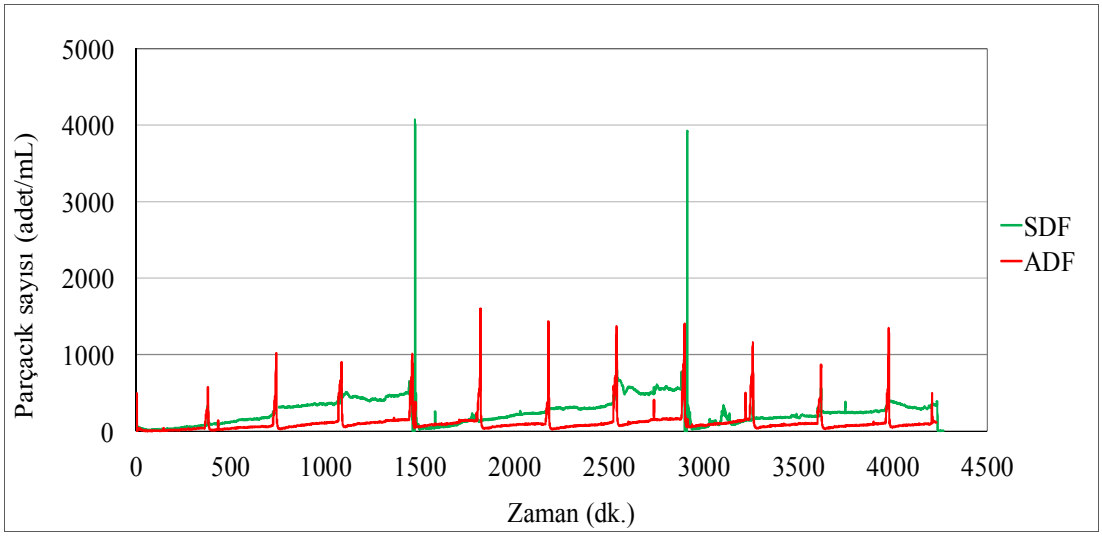
Şekil F.23. Deney 8'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.93 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



Şekil F.24. Deney 8'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'den büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.93 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



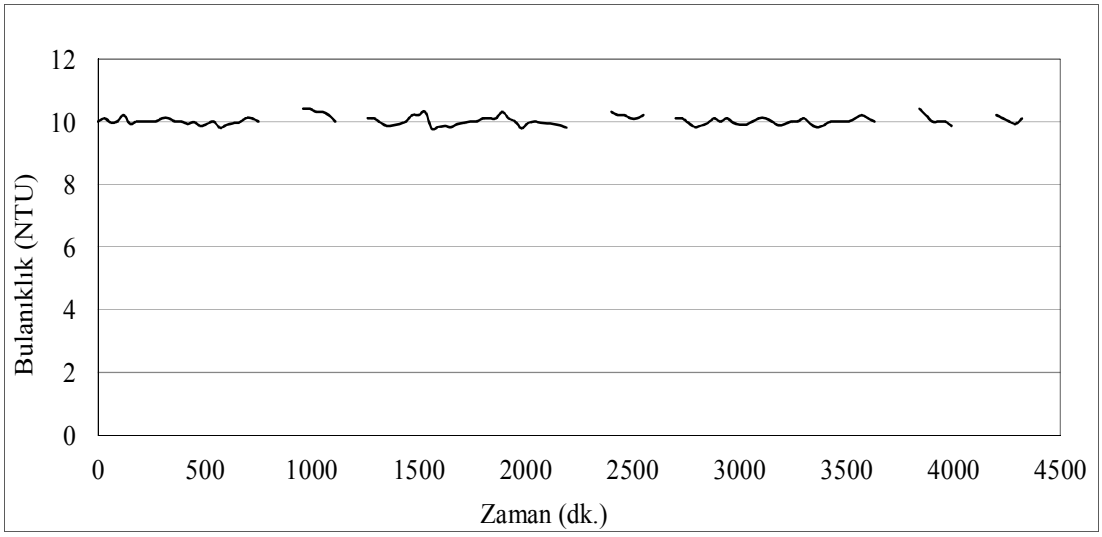
Şekil F.25. Deney 9'da kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



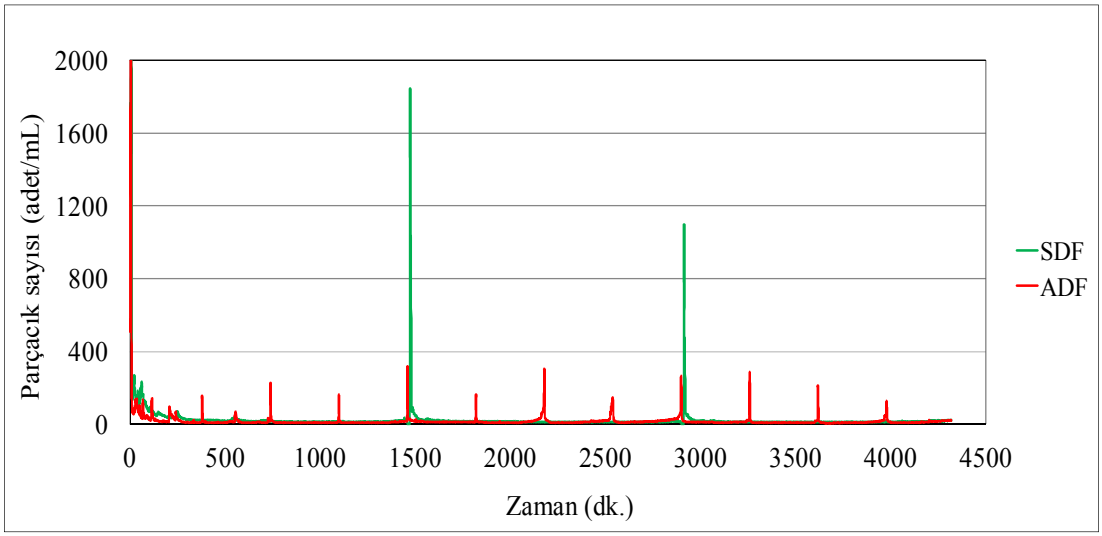
Şekil F.26. Deney 9'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.6 m/sa).



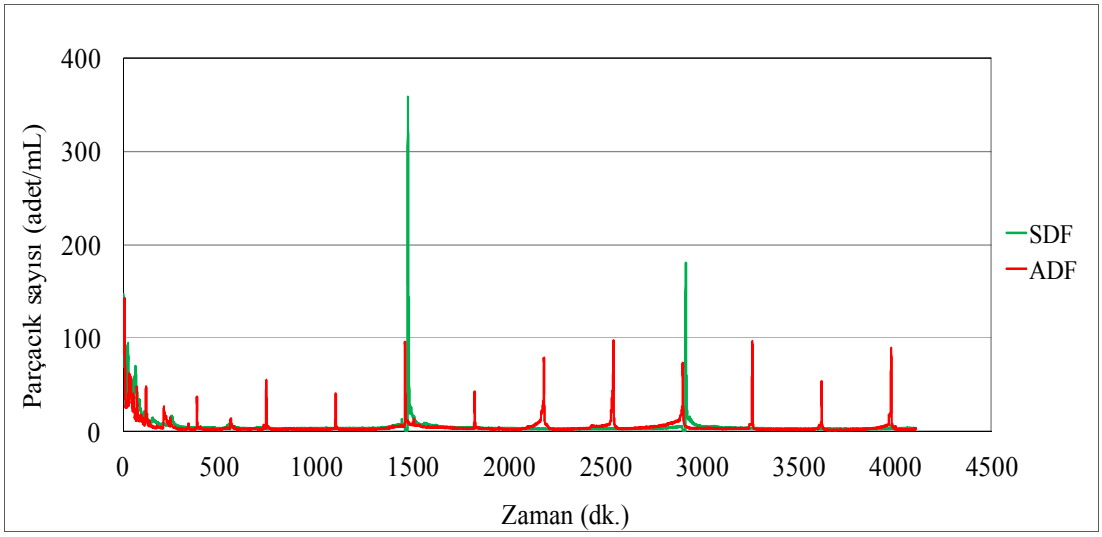
Şekil F.27. Deney 9'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.97 NTU, alum dozajı: 7.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.6 m/sa).



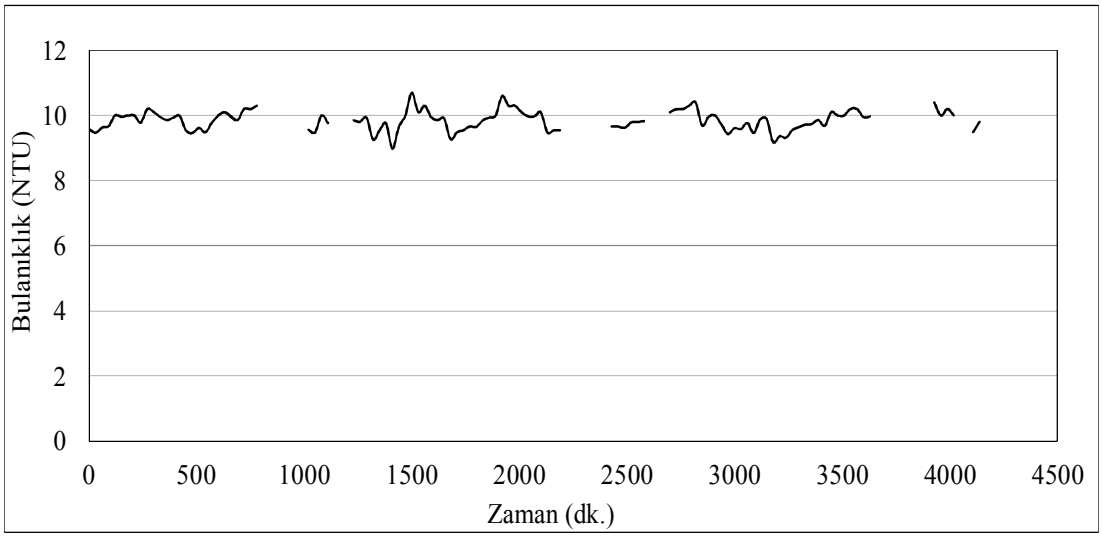
Şekil F.28. Deney 10'da kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



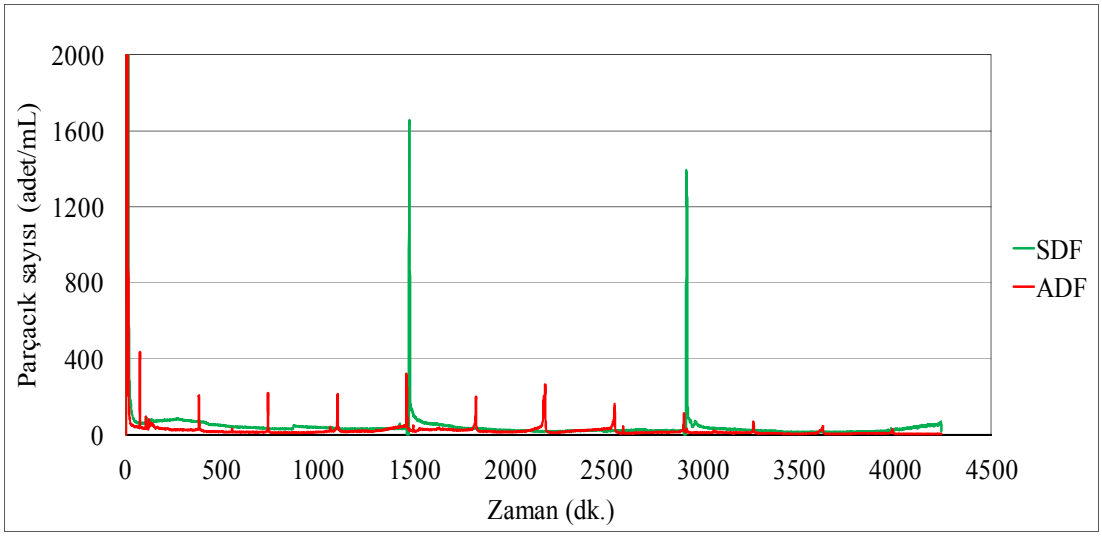
Şekil F.29. Deney 10'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa).



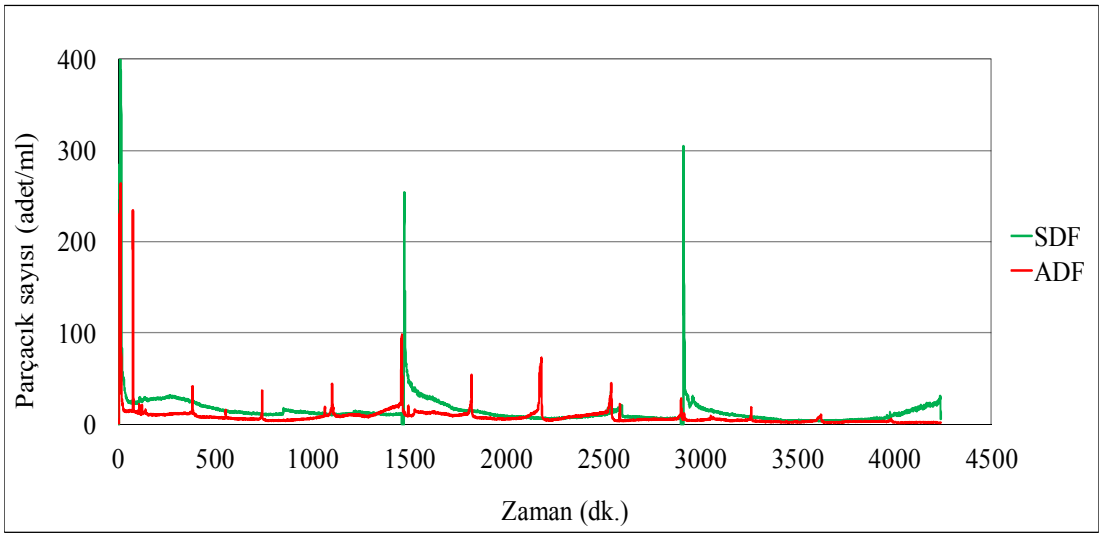
Şekil F.30. Deney 10'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10.03 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.9 m/sa).



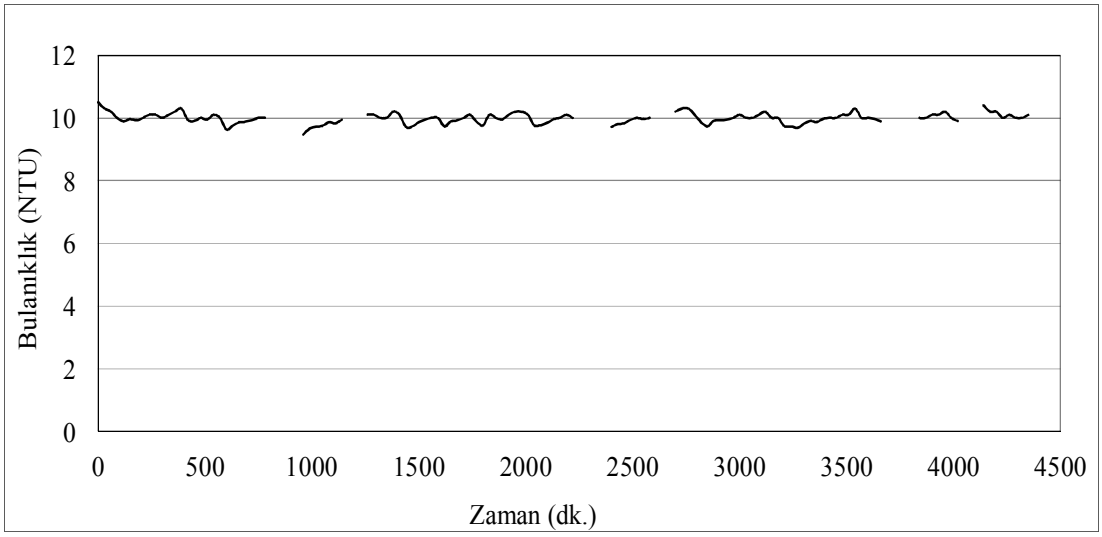
Şekil F.31. Deney 11'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



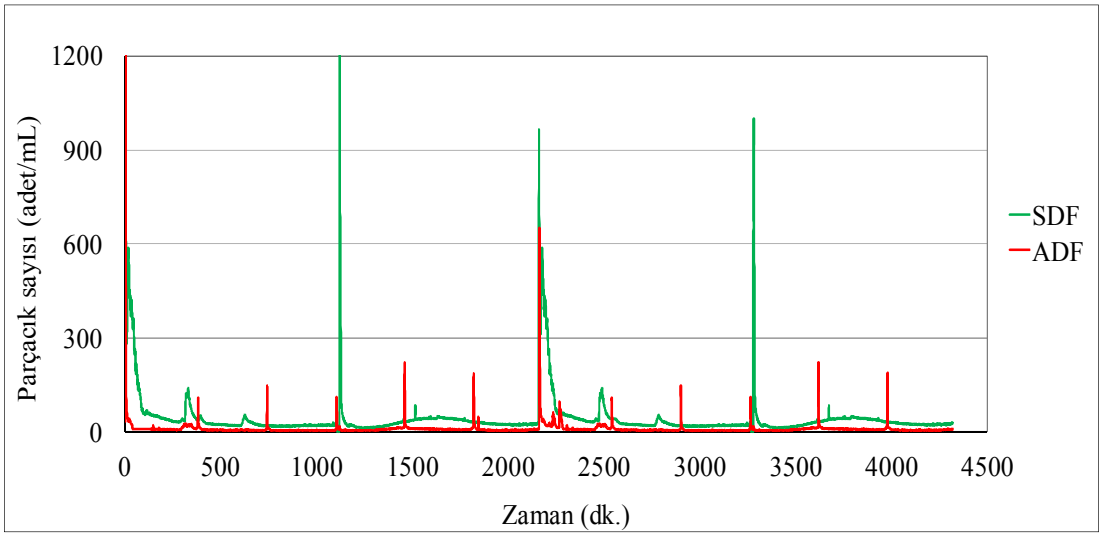
Şekil F.32. Deney 11'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.85 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



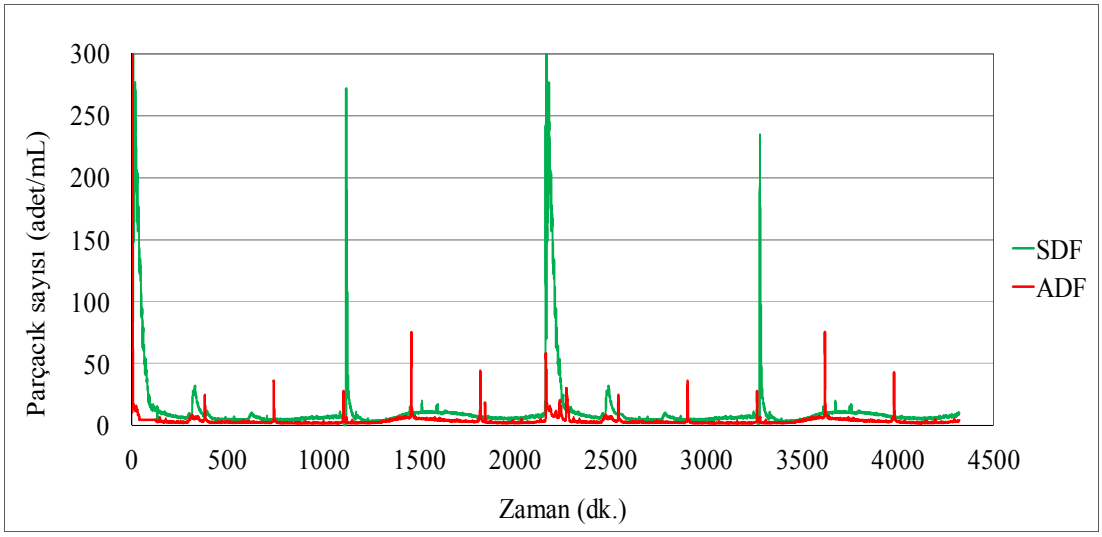
Şekil F.33. Deney 11'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.85 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



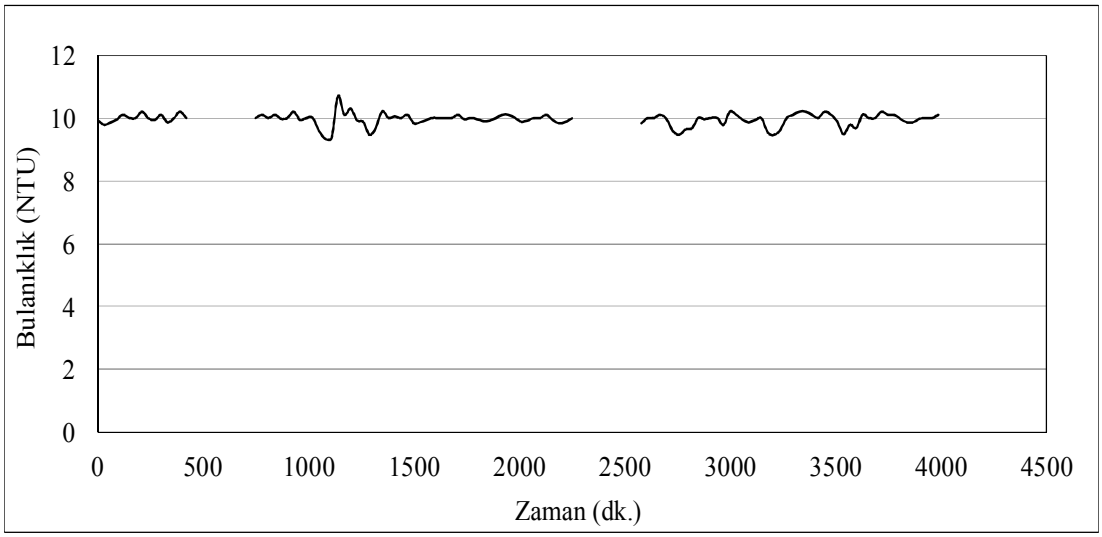
Şekil F.34. Deney 12'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



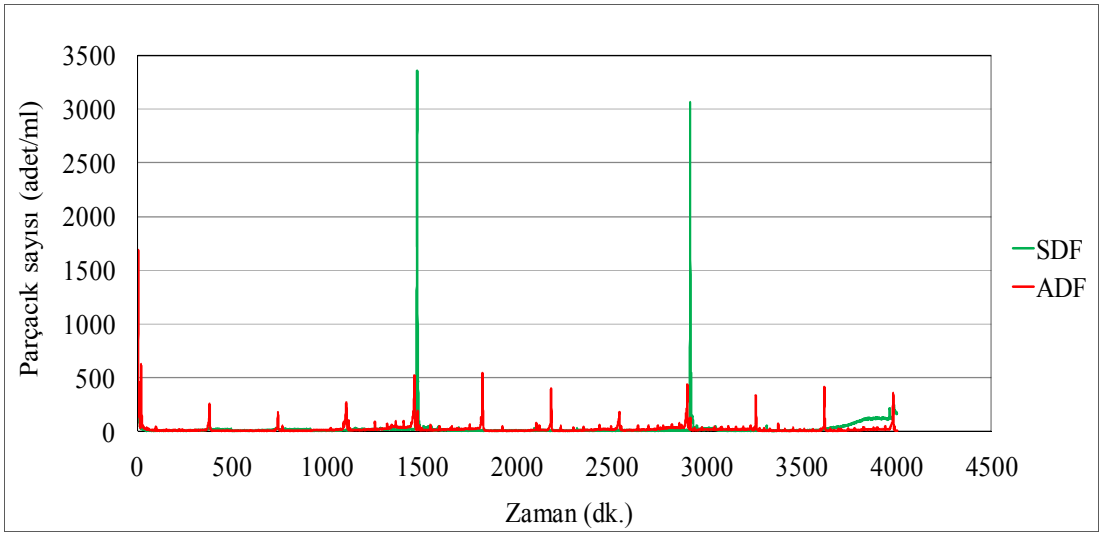
Şekil F.35. Deney 12'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



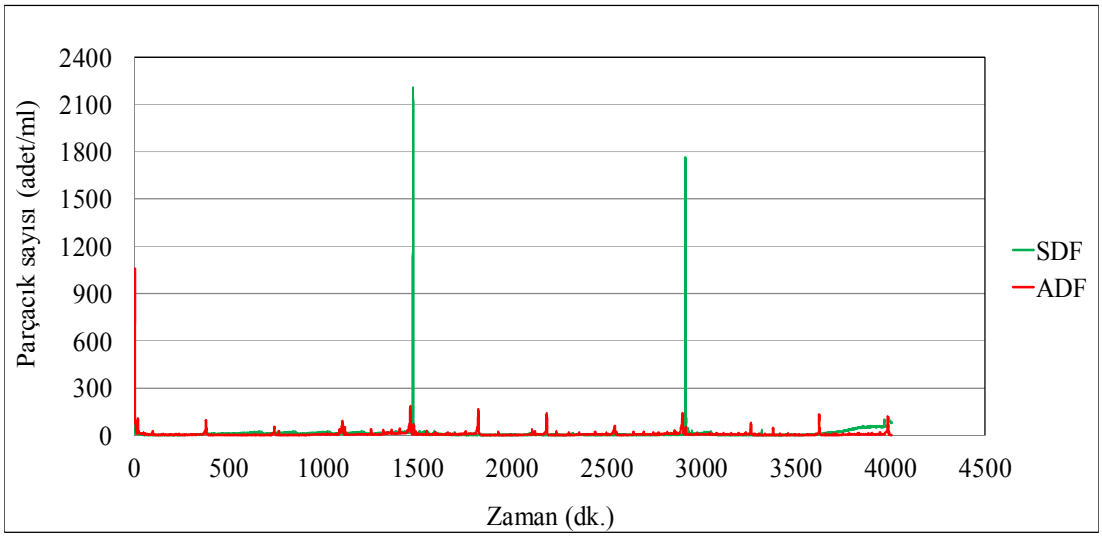
Şekil F.36. Deney 12'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 10 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 12.5 m/sa).



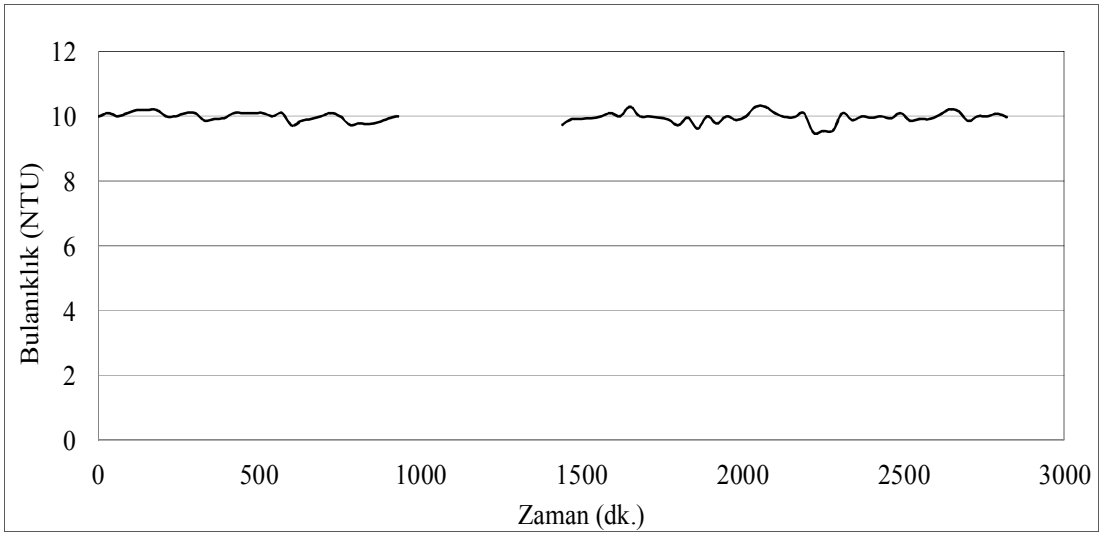
Şekil F.37. Deney 13'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



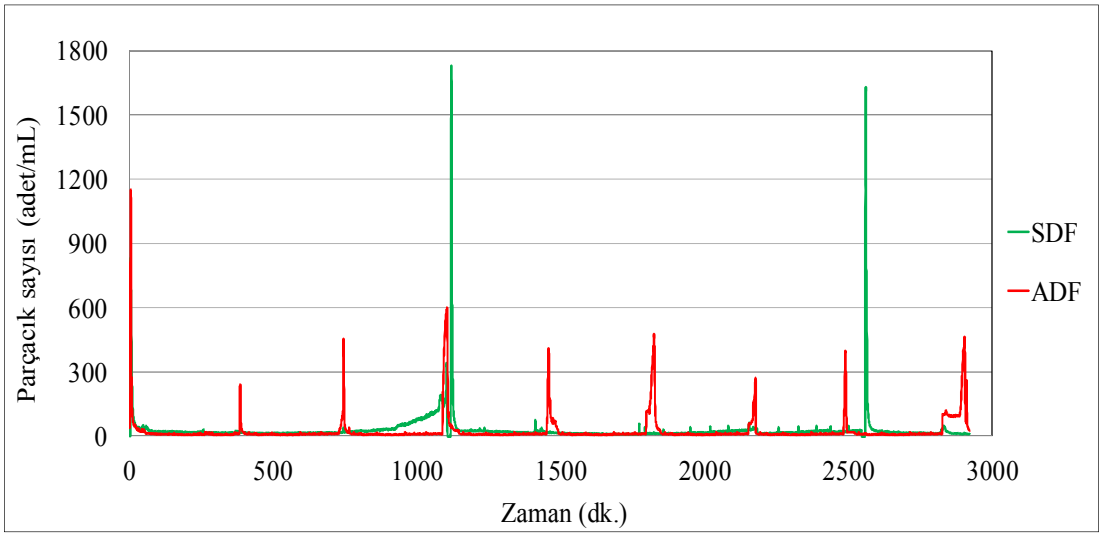
Şekil F.38. Deney 13'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.95 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



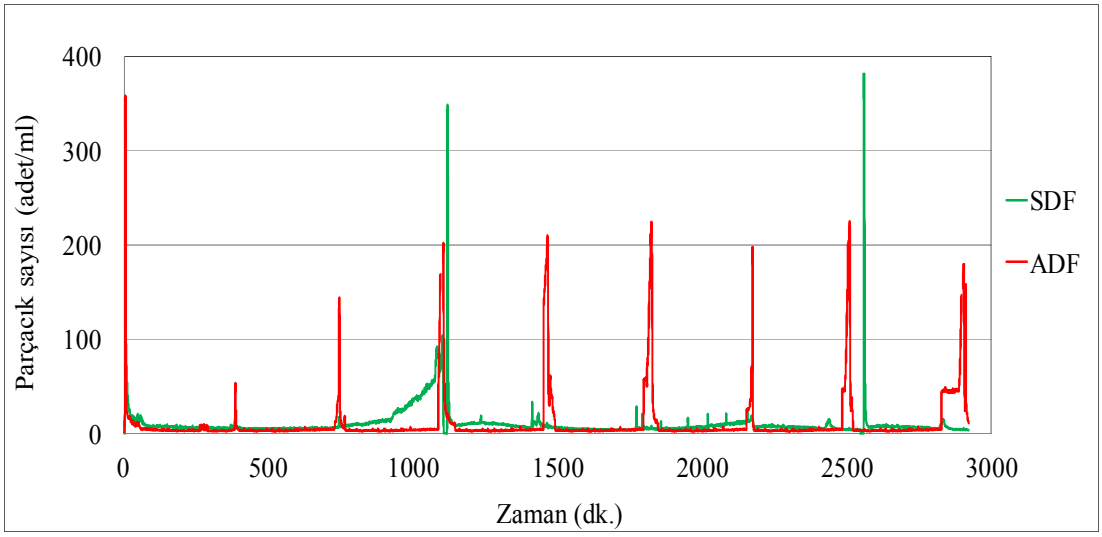
Şekil F.39. Deney 13'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.95 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



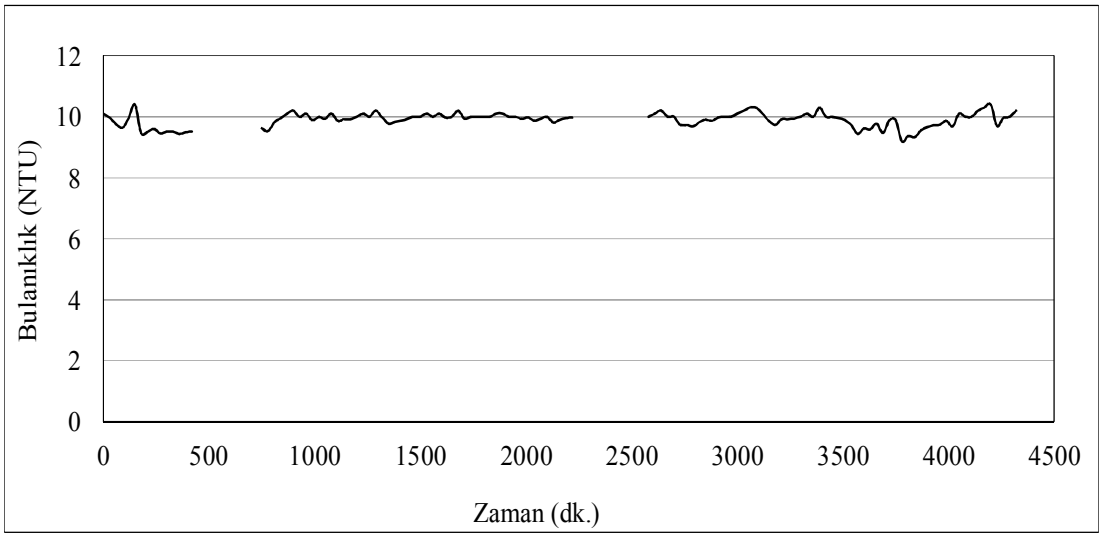
Şekil F.40. Deney 14'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



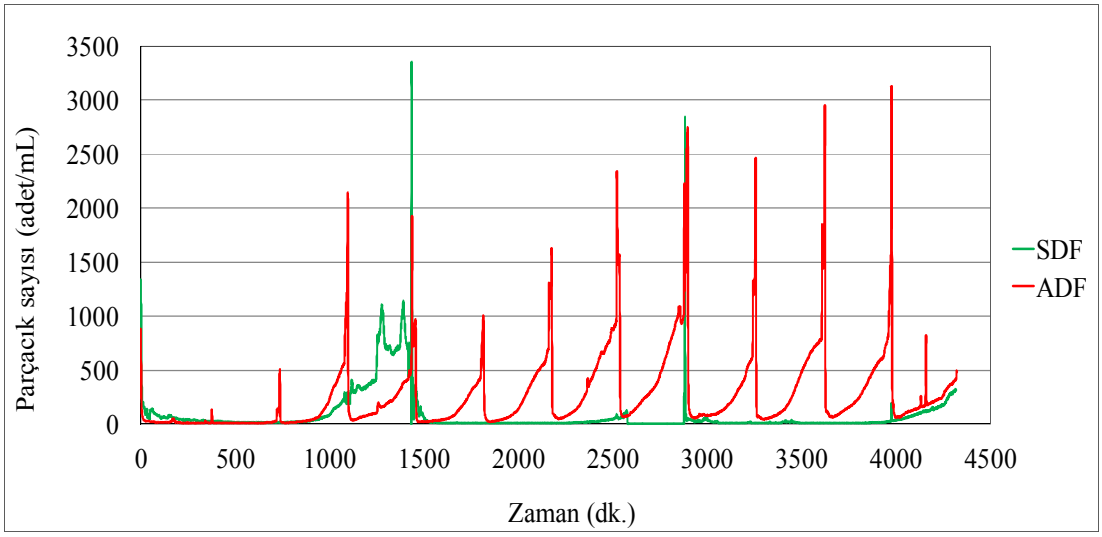
Şekil F.41. Deney 14'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.46 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.4 m/sa).



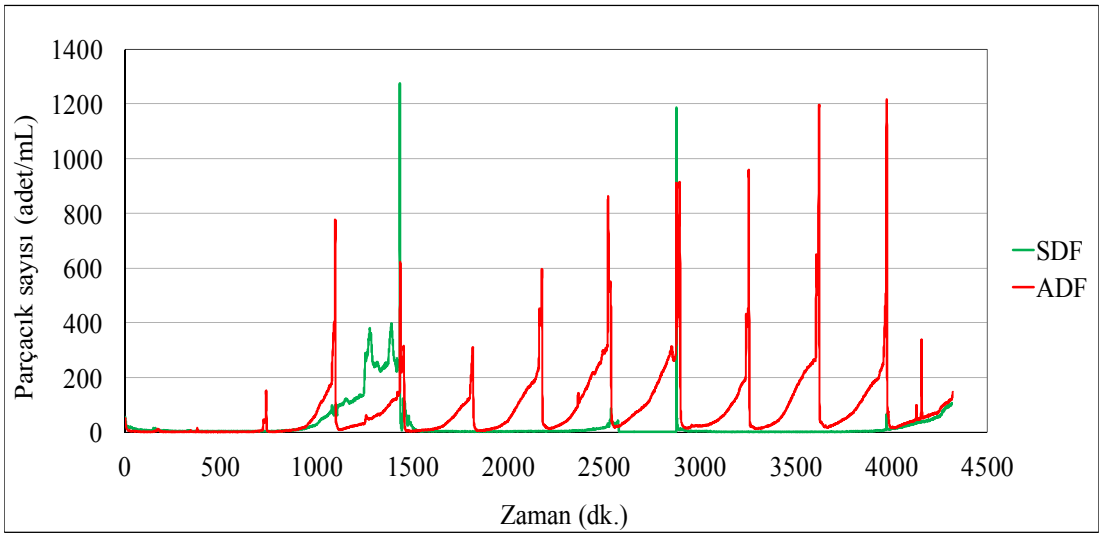
Şekil F.42. Deney 14'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.46 NTU, alum dozajı: 10 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.4 m/sa).



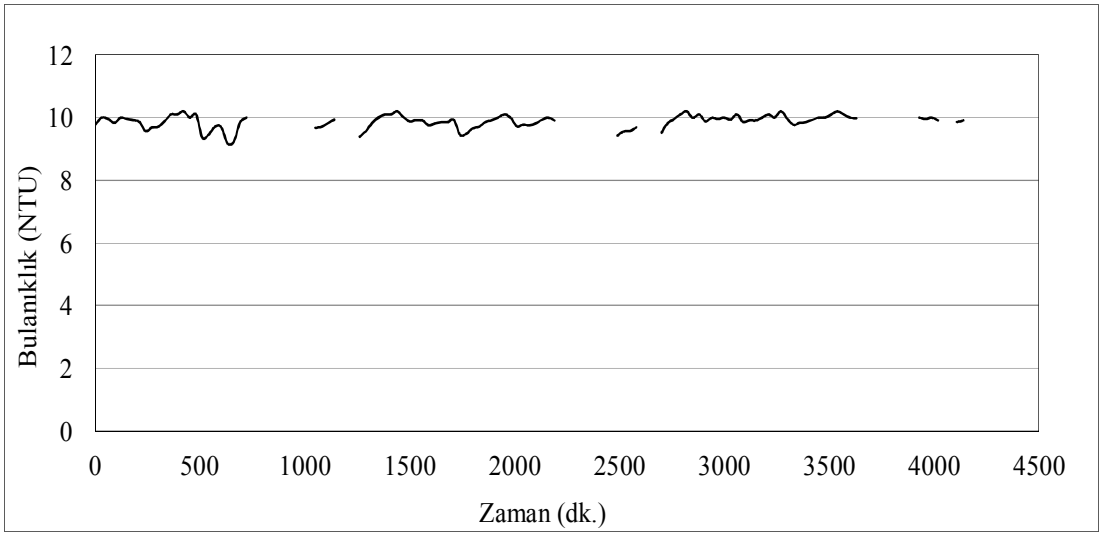
Şekil F.43. Deney 15'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



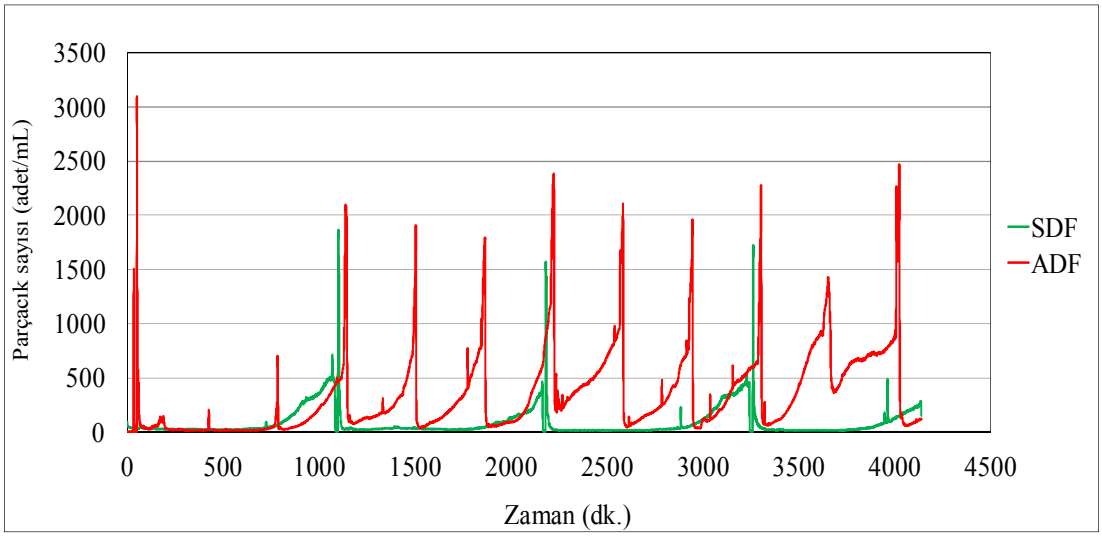
Şekil F.44. Deney 15'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.90 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



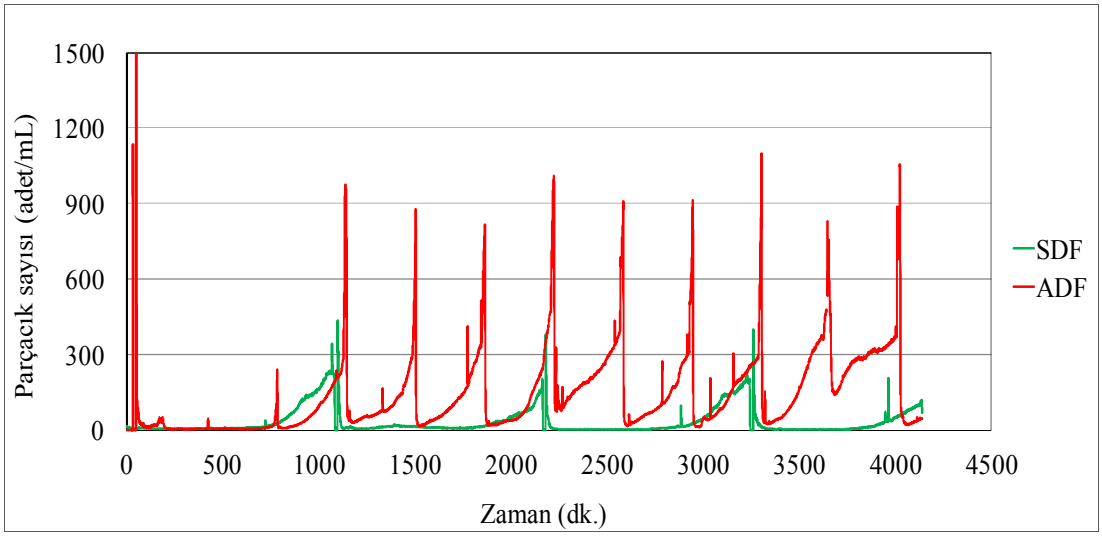
Şekil F.45. Deney 15'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.90 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 7.8 m/sa).



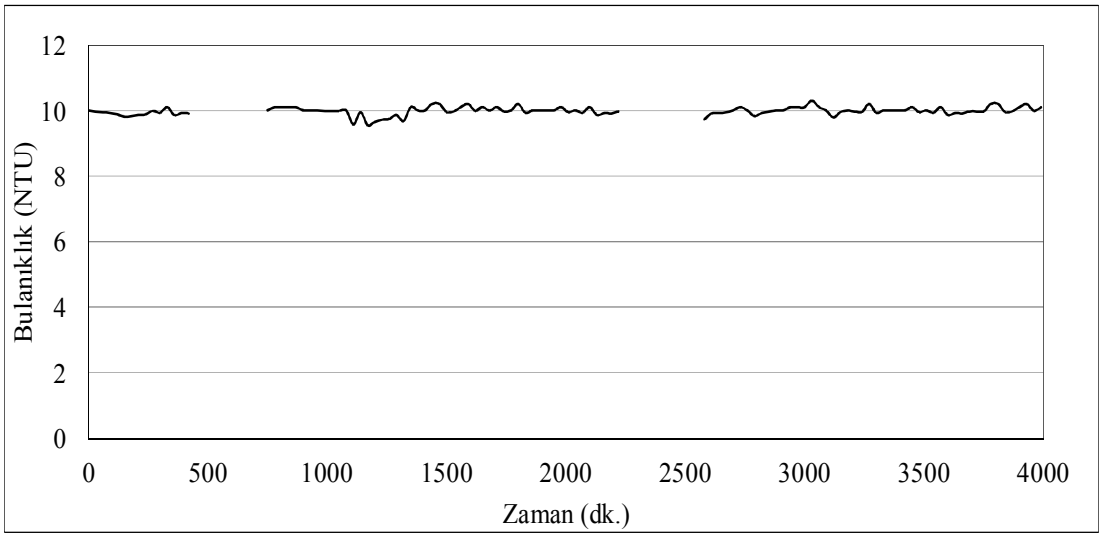
Şekil F.46. Deney 16'da kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



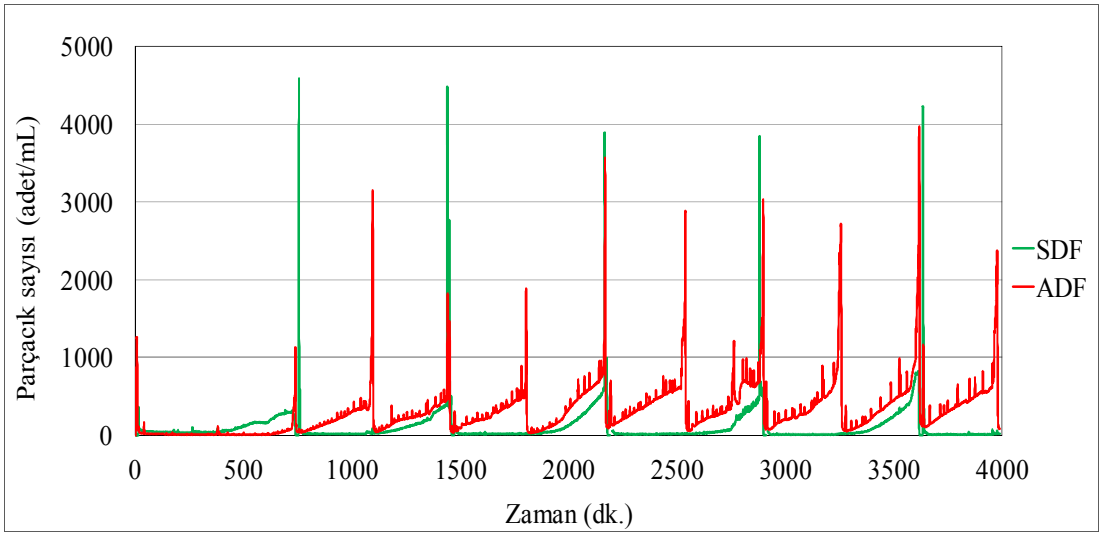
Şekil F.47. Deney 16'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.87 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



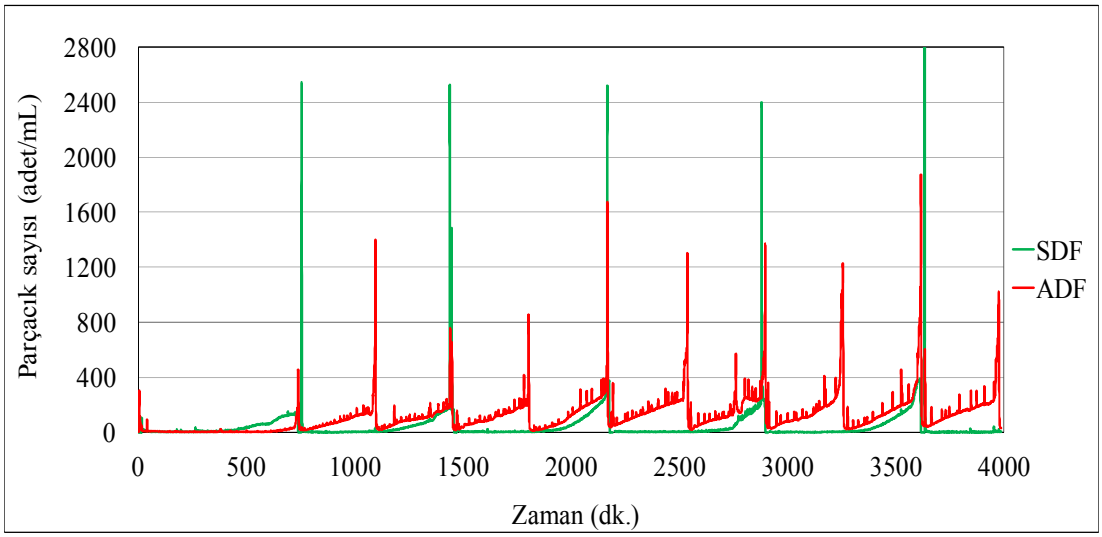
Şekil F.48. Deney 16'da filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.87 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 10.5 m/sa).



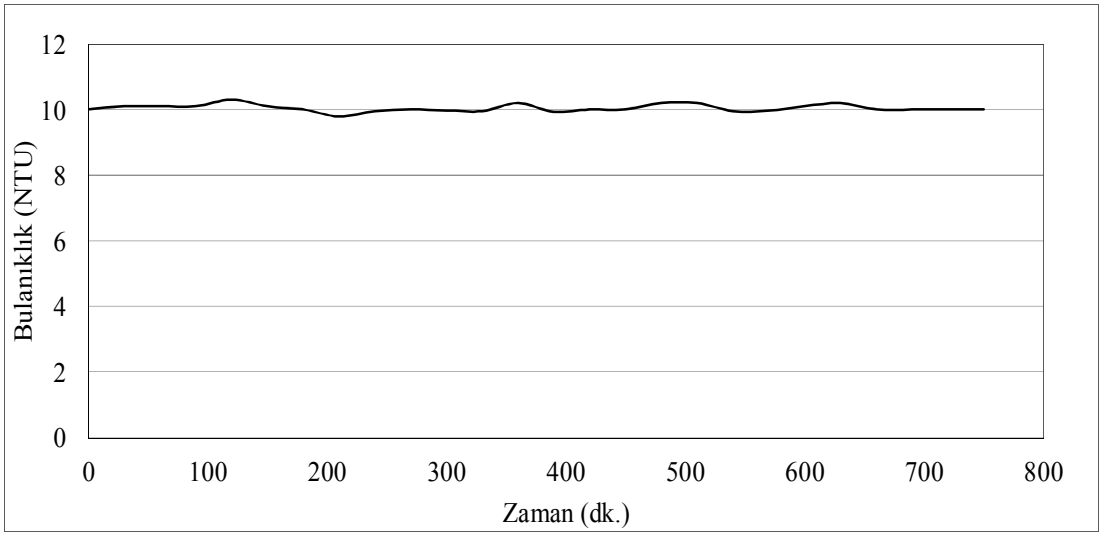
Şekil F.49. Deney 17'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



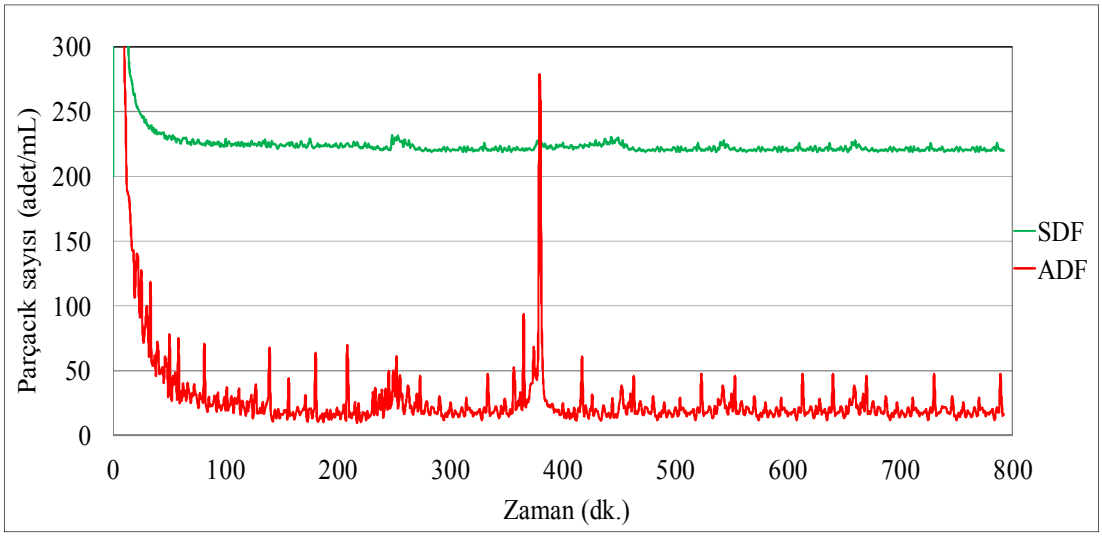
Şekil F.50. Deney 17'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



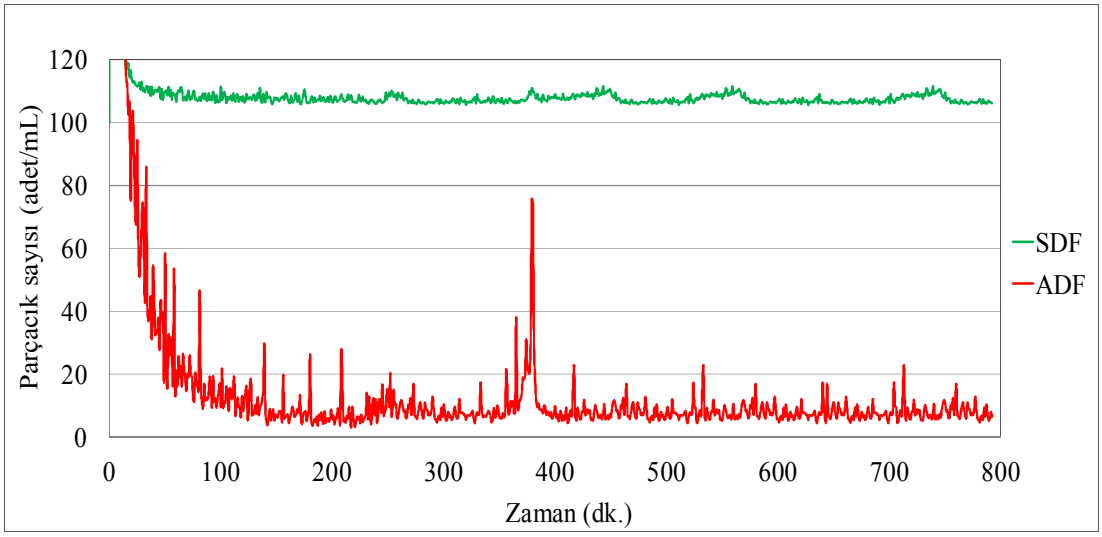
Şekil F.51. Deney 17'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.96 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 14.6 m/sa).



Şekil F.52. Deney 18'de kullanılan ham suda filtrasyon süresince bulanıklık değişimi (Ölçüm aralığı: 30 dakika, ölçüm yeri: ham su rezervuarı ile filtreler arasındaki boru hattından alınan numunede).



Şekil F.53. Deney 18'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 2-5 µm boyutlarındaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.30 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).



Şekil F.54. Deney 18'de filtrasyon süresince filtre edilmiş suyun 5 µm'dan büyük boyutlardaki parçacık sayısı değişimi (ham su bulanıklığı: 9.30 NTU, alum dozajı: 12.5 mg/L, ortalama filtrasyon hızı: 17.3 m/sa).