

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

ULTRASES KULLANIMININ DİREKT
FİLTASYONA ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

MEHMET BUĞRA ZENGİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2011

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

**ULTRASES KULLANIMININ DİREKT
FİLTASYONA ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

MEHMET BUĞRA ZENGİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. EBUBEKİR YÜKSEL

GEBZE

2011

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : ULTRASES KULLANIMININ DİREKT FİLTRASYONA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YAZAR ADI : MEHMET BUĞRA ZENGİ

Ultrasesin yumaklaştırmaya yardımcı olduğu, literatürdeki bazı çalışmalarda bildirilmektedir. Ayrıca ultrasesin, içme suyu filtrasyonunda ham su içerisindeki patojen mikroorganizmaların giderilmesine de yardımcı olduğu gözlenmiştir. Çıkış suyu kalitesinin iyileştirilmesi için yumaklaştırıcı dozajının aşırı derecede artırılması, filtre ömrünü kısaltmaktadır. Filtre ömrünün kısalması, geri yıkama ihtiyacını sıklaştırmakta, böylece geri yıkama suyu tüketimini artırmaktadır. Daha da önemlisi, fazla yumaklaştırıcı dozunun tıkadığı filtre yatağı, çıkış suyu kalitesinin bozulmasına da sebep olmaktadır.

Bu çalışmada, çıkış suyu kalitesini standartlarda tutmak ve makul filtrasyon süreleri elde etmek için yumaklaştırma yardımcısı olarak ultrases kullanılmıştır. İki eş filtre kolonu kullanılarak filtrasyon öncesinde ultrases uygulanan ve uygulanmayan kum filtreleri mukayese edilerek yüzeysel su arıtımında optimum şartlar araştırılmıştır. Yumaklaştırıcı olarak alum ve demir klorür kullanılmıştır. Deneylerde, hem kaolinle hazırlanmış sentetik su hem de Ömerli Havzası'ndan temin edilen yüzeysel su kullanılmıştır. Çıkış suyu bulanıklık ve parçacık sayısı online olarak takip edilmiştir.

Ultrasesin yumaklaşmaya yardımcı olduğu bilinmesine rağmen yumaklaşma prosesinin büyük çoğunluğu yumaklaştırıcılar tarafından gerçekleştirilmektedir. Çalışmamızın deney şartları altında alumun yumaklaştırıcı olarak demir klorürden daha etkili olduğu bulunmuş ve hem sentetik ham su ile hem de Ömerli ham suyu ile yapılan deneylerde içme suyu standartlarına, en yakın şekilde, alum ve ultrasesin

birlikte kullanımıyla ulaşılabilmektedir. Ultrases şiddetinin belirli bir değere kadar artırılması su kalitesini iyileştirmekte, daha yüksek ultrases şiddetinde ise çıkış suyu kalitesinde herhangi bir iyileşme görülmemekte ve filtre ömrü hemen hemen aynı kalmaktadır.

Anahtar kelimeler: Direkt filtrasyon, ultrases, yumaklaşma, yük kaybı, bulanıklık, parçacık sayısı.

SUMMARY

**TITLE : INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF ULTRASOUND ON
DIRECT FILTRATION**

AUTHOR : MEHMET BUĞRA ZENGİ

In the literature, there are a number of studies in which the ultrasound was found to help the flocculation process. It was also observed that ultrasonic irradiation improves the disinfection efficiency. Increasing the flocculant dosage excessively brings about shorter filtration times. As a result, higher frequencies of backwashing is required and thus, the consumption rate of the water used in backwashing is increased. More importantly, the filter bed clogged by excessive flocculant dosage, causes the effluent quality to deteriorate.

In this study, ultrasound was used as a flocculation additive to meet the effluent quality standards and achieve acceptable filtration times. Optimum conditions for surface water treatment was investigated by comparing two identical pilot scale sand filter columns, untreated and pretreated with ultrasound. Aluminium sulfate and iron (III) chloride were used as flocculants. In the experiments, both the synthetic raw water prepared with kaolin and the actual raw water provided from Omerli Basin (Istanbul, Turkey) were used. Turbidity and particle count in the effluent were monitored online.

Despite the fact that US improves the flocculation process, the majority of the process is carried out by the flocculants. Under the experimental conditions of this study, aluminium sulphate was found to be more effective than iron (III) chloride and in the experiments carried out with both the synthetic and the actual raw water, drinking water standards were best achieved with the combination of aluminium sulphate and ultrasound. Increasing the ultrasound intensity up to a certain point is

observed to improve the effluent quality while a higher intensity level is found to be ineffective and the filtration time remains almost the same.

Keywords: Direct filtration, ultrasound, flocculation, head loss, turbidity, particle count.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince, bana gerekli tüm kolaylıkları sağlayan, yol gösteren, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım, Doç. Dr. Sayın Ebubekir YÜKSEL'e, çalışmalarımın başlangıcından sonuna kadar her aşamasında, laboratuvar ve yazım aşamalarının olgunlaşmasında yakın ilgi ve desteğini gördüğüm Araş. Gör. Murat EYVAZ'a, laboratuvar çalışmalarımda destek ve yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Ercan GÜRBULAK'a ve çeşitli konularda görüşlerinden yararlandığım değerli bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2011

Mehmet Buğra ZENGİ

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	6
2. İÇME SUYU ARITIM TEKNOLOJİSİ	8
2.1. Yüzeysel Su Kaynakları	8
2.2. İçme Suyu Arıtımında Filtrasyon	10
2.2.1. Filtrasyon Prosesiyle Giderilen Parametreler	11
2.2.2. Filtrasyon Hidroliği	12
2.2.3. Filtrasyon Mekanizmaları	14
2.2.4. Geçirimli Ortamda Akışın Hidroliği	19
2.2.5. Yerçekimli Filtrede Yük Kaybı	20

3. ULTRASES VE DİĞER DEZENFEKTANLAR	22
3.1. Ultrasesin Genel Tanımı ve Uygulama Alanları	22
3.2. Ultrasesin Germisidal Etkileri	25
3.2.1. Mikroorganizma İnaktivasyonunda Sonikasyonun Tek Başına Kullanımı ile İlgili Önceki Çalışmalar	26
3.2.1.1. Sonikasyon Süresi	26
3.2.1.2. Sonikasyon Şiddeti	27
3.2.1.3. Sonikasyon Frekansı	28
3.2.2. Mikroorganizma İnaktivasyonunda Sonikasyon Kullanımının Sağladığı Sinerjik Etkiler ile İlgili Önceki Çalışmalar	29
4. MATERYAL VE METOD	31
4.1. Materyal	31
4.2. Deney Düzeneği	33
4.3. Analitik Metod	42
4.3.1. Filtre Malzemesi Elek Analizi (Granülometri)	42
5. BULGULAR	46
5.1. Sentetik Ham Su ile Yapılan Deneyler	46
5.1.1. Filtre Verimine Ultrases Şiddetinin Etkisi	46
5.1.2. Yumaklaştırıcı Tipi ve Dozajının Ultrases ve Filtre Verimine Etkisi	55
5.2. Ömerli Ham Suyu ile Yapılan Deneyler	71
5.3. Filtre Verimlerinin IVES Filtre İndeksi ile Karşılaştırılması	87
6. TARTIŞMALAR VE SONUÇLAR	90
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	98

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

		<u>Birim</u>
ABD	Amerika Birleşik Devletleri	[–]
TSE	Türk Standartları Enstitüsü	[–]
WHO	Dünya Sağlık Örgütü	[–]
US EPA	Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı	[–]
TÇK	Toplam çözünmüş katı	[mg/l]
Alum	Aluminyum sülfat	[–]
NTU	Nephelometrik bulanıklık birimi	[–]
JTU	Jackson bulanıklık birimi	[–]
FTU	Formazin bulanıklık birimi	[–]
V_f	Filtrasyon hızı	[m/s]
k	Geçirimsizlik katsayısı	[m/s]
I	Hidrolik eğim	[–]
H	Yük kaybı	[m]
L	Yatak derinliği	[m]
g	Yerçekimi ivmesi	[m/s ²]
ν	Kinematik viskozite	[m ² /s]
ε	Porozite	[–]
d	Dane çapı	[m]

μ	Dinamik viskozite	[kg/m's]
ρ	Yoğunluk	[kg/m ³]
S	Spesifik yüzey alanı	[m ² /m ³]
pK _a	Asit iyonlaşma sabiti	[–]
K _L a	Oksijen transfer hızı katsayısı	[sa ⁻¹]
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi	[–]
TOK	Toplam organik karbon	[mg/l]
TK	Toplam karbon	[mg/l]
İK	İnorganik karbon	[mg/l]
US	Ultrases	[–]
GYTE	Gebze Yüksek Teknolojisi Enstitüsü	[–]
d	Üniformluk katsayısını	[–]
d ₆₀	Ağırlıkça malzemenin % 60'ının geçtiği elek delik çapı	[mm]
d ₁₀	Ağırlıkça malzemenin % 10'unun geçtiği elek delik çapı	[mm]
FI	Filtre indeksi	[–]
C	Ortalama filtre çıkış suyu bulanıklığı	[NTU]
C ₀	Ham su bulanıklığı	[NTU]
t	Filtrasyon süresi	[dk]

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No.</u>		<u>Sayfa</u>
2.1.	Yüzey suyu arıtımı için klasik arıtma tesisi	10
2.2.	Filtre malzemesinin arasında kalan deliklerin ve süspansiyon haldeki maddelerin boyutları	15
2.3.	Parçacıkların taşınma mekanizmaları	16
2.4.	Örnek bir filtre düzeneği	17
2.5.	Bir kum filtresi içerisinde, belli zamanlardaki basınç	21
3.1.	Sesin frekans aralıkları ve uygulama örnekleri	22
4.1.	Ultrases probunun şematik gösterimi	34
4.2.	Laboratuvarda çalışılan pilot tesis deney düzeneği	35
4.3.	Pilot tesisin genel görünümü	37
4.4.	Pilot tesis kontrol paneli	38
4.5.	Debimetre	38
4.6.	Ultrases jeneratörü	39
4.7.	Ultrases uygulama tankı ve probu	39
4.8.	Dozaj pompaları	40
4.9.	Kum filtresi ve piyezometre boruları	40
4.10.	Türbiditimetre	41
4.11.	Parçacık sayacı	41

4.12.	Bulanıklık ve parçacık sayısı değişimlerinin sürekli olarak izlendiği gösterge cihazı	42
4.13.	Elek analizinde kullanılacak kumdan çeyreklere bölme metodu ile temsil edici numune alınması	43
4.14.	Elek analizi sonuçlarının grafik şeklinde gösterimi	44
5.1.	4.44 W/l US uygulanmayan filtrede oluşan yük kaybı	47
5.2.	4.44 W/l US uygulanan filtrede oluşan yük kaybı	48
5.3.	4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi	48
5.4.	4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 μm arası parçacık sayısı değişimi	49
5.5.	4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 μm 'den büyük parçacık sayısı değişimi	49
5.6.	8.89 W/l US uygulanmayan filtrede oluşan yük kaybı	50
5.7.	8.89 W/l US uygulanan filtrede oluşan yük kaybı	50
5.8	8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi	51
5.9.	8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 μm arası parçacık sayısı değişimi	51
5.10.	8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 μm 'den büyük parçacık sayısı değişimi	52
5.11.	13.33 W/l US uygulanmayan filtrede oluşan yük kaybı	52
5.12.	13.33 W/l US uygulanan filtrede oluşan yük kaybı	53
5.13.	13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi	53

5.14.	13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	54
5.15.	13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	54
5.16.	4.44 W/l US uygulanmadan 5 mg/l FeCl ₃ ilavesiyle oluşan yük kaybı	56
5.17.	4.44 W/l US ve 5 mg/l FeCl ₃ 'ün birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı	56
5.18.	5 mg/l FeCl ₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi	57
5.19.	5 mg/l FeCl ₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	57
5.20.	5 mg/l FeCl ₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	58
5.21.	4.44 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l FeCl ₃ ilavesiyle oluşan yük kaybı	58
5.22.	4.44 W/l US ve 7.5 mg/l FeCl ₃ 'ün birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı	59
5.23.	7.5 mg/l FeCl ₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi	59
5.24.	7.5 mg/l FeCl ₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	60

5.25.	7.5 mg/l FeCl ₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	60
5.26.	4.44 W/l US uygulanmadan 10 mg/l FeCl ₃ ilavesiyle oluşan yük kaybı	61
5.27.	4.44 W/l US ve 10 mg/l FeCl ₃ 'ün birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı	61
5.28.	10 mg/l FeCl ₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi	62
5.29.	10 mg/l FeCl ₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	62
5.30.	10 mg/l FeCl ₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	63
5.31.	4.44 W/l US uygulanmadan 5 mg/l alum ilavesiyle oluşan yük kaybı	64
5.32.	4.44 W/l US ve 5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı	64
5.33.	5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi	65
5.34.	5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	65
5.35.	5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	66

5.36.	4.44 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l alum ilavesiyle oluşan yük kaybı	66
5.37.	4.44 W/l US ve 7.5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı	67
5.38.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi	67
5.39.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 μm arası parçacık sayısı değişimi	68
5.40.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 μm 'den büyük parçacık sayısı değişimi	68
5.41.	4.44 W/l US uygulanmadan 10 mg/l alum ilavesiyle oluşan yük kaybı	69
5.42.	4.44 W/l US ve 10 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı	69
5.43.	10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi	70
5.44.	10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 μm arası parçacık sayısı değişimi	70
5.45.	10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 μm 'den büyük parçacık sayısı değişimi	71
5.46.	4.44 W/l US uygulanmadan 5 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	72

5.47.	4.44 W/l US ve 5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	72
5.48.	5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan bulanıklık değişimi	73
5.49.	5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	73
5.50.	5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	74
5.51.	4.44 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	74
5.52.	4.44 W/l US ve 7.5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	75
5.53.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan bulanıklık değişimi	75
5.54.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	76
5.55.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	76
5.56.	4.44 W/l US uygulanmadan 10 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	77
5.57.	4.44 W/l US ve 10 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	77

5.58.	10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan bulanıklık değişimi	78
5.59.	10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	78
5.60.	10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	79
5.61.	8.89 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	79
5.62.	8.89 W/l US ve 7.5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	80
5.63.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan bulanıklık değişimi	80
5.64.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	81
5.65.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	82
5.66.	13.33 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	82
5.67.	13.33 W/l US ve 7.5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı	83
5.68.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan bulanıklık değişimi	83

5.69.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi	84
5.70.	7.5 mg/l alum ilavesinden önce 13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrede oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi	84
5.71.	Filtre indeksleri	88

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo No.</u>		<u>Sayfa</u>
1.1.	Ülkemiz için kabul edilen içme suyu standardı (TS-266)	4
1.2.	İçme suyu standartları	5
3.1.	Ultrasesin genel uygulama alanları	24
3.2.	Membran filtre tipine göre yıkama türleri	24
3.3.	Membran filtrelerin temizlenmesinde kullanılan çeşitli yöntemler	24
3.4.	Membran filtrelerin temizlenmesinde ultrases kullanımı	25
4.1.	Deneylerde kullanılan ham suyun kimyasal analizi	32
4.2.	Deney programı	32
4.3.	Siemens Sitrans FM Magflo Magna 5000 Debimetre teknik özellikleri	34
4.4.	Ultrases probunun teknik özellikleri	34
4.5.	Elek analizi deney sonuçları	44
5.1.	Deney sonuçları	85
5.2.	Filtre indeksleri	88

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Anlam ve Önemi

Günümüz şartlarında sürekli artan nüfus ve gelişen teknoloji ile beraber su kullanımında sürekli olarak bir artış gözlenmektedir. Bununla birlikte, çevresel kirlilik ve ekolojik dengelerin bozulması, su kaynaklarını tahrip etmektedir. Bu sebeplerle, elverişli tatlı su kaynaklarını bulmak ve bu kaynaklardan en ekonomik şekilde içilebilir su elde etmek, en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir.

Türkiye'nin coğrafi olarak bulunduğu kuşağın iklimsel özelliklerinden dolayı, karasal tatlı su kaynakları oldukça kısıtlıdır. Nüfusu, ekonomik beklentileri ve yaşam standardı hızla artarak gelişmekte olan Türk toplumunun, su gereksinimi her geçen gün artmaktadır. Bir ülkenin su potansiyelinin bilinmesi, çeşitli kullanımlara yönlendirilecek su miktarının çerçevesini de çizdiğinden, su yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Türkiye'de su tüketimi, ülke genelinde homojen olarak dağılmamaktadır. Ülke bütününde çekilen su sıkıntısının yanı sıra, yerel olarak su tüketiminde büyük farklılıklar görülmektedir.

Yeryüzündeki sular güneşin sağladığı enerji ile sürekli bir döngü içinde bulunur. İnsanlar, yaşamsal ve ekonomik gereksinimleri için suyu, bu döngüden alır ve kullandıktan sonra tekrar aynı döngüye iade ederler. Bu süreç sırasında suya karışan maddeler, suların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini değiştirir.

Dünyadaki toplam su miktarı 1,4 milyar km^3 'tür. Bu suların % 97.5'i okyanuslarda ve denizlerde tuzlu su olarak, % 2.5'i ise nehir ve göllerde tatlı su olarak bulunmaktadır. Bu kadar az olan tatlı su kaynaklarının da % 90'ının kutuplarda ve yeraltında bulunması sebebiyle insanoğlunun kolaylıkla yararlanabileceği elverişli tatlı su miktarının ne kadar az olduğu anlaşılmaktadır. Türkiye'de yıllık ortalama yağış yaklaşık olarak 643 mm olup, yılda ortalama 501 milyar m^3 suya tekabül etmektedir. Bu suyun 274 milyar m^3 'ü toprak ve su yüzeyleri

ile bitkilerden olan buharlaşmalar yoluyla atmosfere geri dönmekte, 69 milyar m³'lük kısmı yeraltı suyunu beslemekte, 158 milyar m³'lük kısmı ise akışa geçerek çeşitli büyüklükteki akarsular vasıtasıyla denizlere ve kapalı havzalardaki göllere boşalmaktadır. Yeraltı suyunu besleyen 69 milyar m³'lük suyun 28 milyar m³'ü pınarlar vasıtasıyla yerüstü suyuna tekrar katılmaktadır. Ayrıca, komşu ülkelerden ülkemize gelen yılda ortalama 7 milyar m³ su bulunmaktadır. Böylece ülkemizin brüt yerüstü suyu potansiyeli 193 milyar m³ olmaktadır. Yeraltı suyunu besleyen 41 milyar m³ de dikkate alındığında, ülkemizin toplam yenilenebilir su potansiyeli brüt 234 milyar m³ olarak hesaplanmıştır. Ancak, günümüz teknik ve ekonomik şartlar çerçevesinde, çeşitli amaçlara yönelik olarak tüketilebilecek yerüstü suyu potansiyeli yurt içindeki akarsulardan 95 milyar m³, komşu ülkelerden yurdumuza gelen akarsulardan 3 milyar m³ olmak üzere yılda ortalama toplam 98 milyar m³'tür. 14 milyar m³ olarak belirlenen yeraltı suyu potansiyeli ile birlikte ülkemizin tüketilebilir yerüstü ve yeraltı su potansiyeli yılda ortalama toplam 112 milyar m³ olmaktadır.

İnsan hayatı için en önemli unsur olan su, sanılanın aksine sınırlı bir kaynaktır. Günümüzde su kaynakları ile ilgili en önemli problem onun etkin kullanımıdır. Su kaynakları tarım, endüstri ve evsel kirliliklerden önemli ölçüde etkilenmekte olup bu sektörlerin su ihtiyacının giderek artması, su yönetimini zorlaştırmaktadır.

Su kaynaklarının etkin kullanımı, uzun dönemde ülkemizin sosyal ve ekonomik kalkınmasında en büyük etken olacaktır. Bu sebeple, ülkemizde de sürdürülebilir su kaynaklarının yönetimi, gün geçtikçe önem kazanmaktadır.

Bazı bölgelerde görülen su kıtlıkları ve tahsis problemleri neticesinde, içme ve tarımsal alanda suyun ekonomik kullanımı etkilenmektedir. Tarım, endüstri ve içme suyunun kontrolsüz kullanımı sonucunda su kalitesi bozulmakta, aynı zamanda yeraltı sularının aşırı ve dengesiz kullanımı ile yeraltı su rezervi korunamamaktadır. Hayat standartları geliştikçe, suya karşı olan talep nüfus artış hızından çok daha fazla olmaktadır. Yakın geçmişe kadar su tasfiyesi ve temini için işletimi kolay ve az maliyetli tesisler tercih edilirken, günümüzde ihtiyaçlar doğrultusunda oldukça karmaşık, yüksek maliyetli ve çevresel etkileri kontrol edilmesi güç olan tesisler yaygınlaşmıştır.

Su stresi, sadece su sıkıntısı çeken bölgelerde değil, bol su kaynaklarına sahip dünyanın birçok bölgesinde de ortaya çıkabilmektedir. En fazla rastlanan sorun yeraltı sularının seviyelerindeki düşüştür. Gereğinden fazla yeraltı suyu kullanımına Çin’de, Hindistan’da, Meksika’da, Tayvan’da, ABD’nin batısında ve ortadoğuda rastlanmaktadır.

Talep arttıkça ve su tesislerinin inşa edilmesi zorlaştıkça, mevcut su kaynaklarının yönetilmesi birçok alanda başa çıkılamaz bir hal almaktadır. Çevre korumacılığında oynadığı rolü ve içinde yaşayan varlıkları hiç göz önüne almadan inşaa edilen su yapıları (baraj, gölet vb.) akarsuların yataklarını değiştirerek ve akarsuları kirleterek, doğayla ters düşen toplumlar deltaları, gölleri, nehir yataklarını ve burada yaşayan canlıları mahvetmişlerdir. Dünyada çevre korumasının her türlü yaşamın temelini oluşturduğu tam olarak kabul edilmiş değildir. Çevreyi korumak için yönetimlerin atmak istedikleri adımlara karşı çıkanlar, özel tasarruf haklarını ileri sürerek özellikle ABD’de ekosistemlerinin korunmasını zorlaştırmaktadır.

Her yıl kullanıma sunulan içme suyu miktarının en az nüfus artış hızına paralel olarak arttırılması, buna bağlı olarak da sektörde görev yapan kuruluşların yatırımlarını arttırarak sürdürmeleri kaçınılmaz bir zorunluluk haline gelmiştir.

Gerek yeraltı ve gerekse yer üstü su kaynaklarının kirlenmesine ve bozulmasına karşı gereken önlemler alınırken, söz konusu kaynakların kirlenmeden önce korunması, özellikle içme suyu kaynağı olarak kullanılan baraj ve doğal göllerin kirlenmeye karşı korunması ödün verilmeden sürdürülmelidir.

Tablo 1.1’de ülkemizde kabul edilen TS–266 içme suyu standardını, tablo 1.2’de TSE–266’nın WHO ve US EPA’nın içme suyu standart değerleri ile karşılaştırılması gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Ülkemiz için kabul edilen içme suyu standardı (TS-266)

1.ZEHİRLİ MADDELER	Kurşun (Pb)	–	0.05 mg/l
	Selenyum (Se)	–	0.01 mg/l
	Arsenik (As)	–	0.05 mg/l
	Krom (Cr ⁺)	–	0.05 mg/l
	Siyanür (CN)	–	0.2 mg/l
	Kadmiyum (Cd)	–	0.01 mg/l
2.SAĞLIĞA ETKİ YAPAN MADDELER	Florür (F)	1.0 mg/l	1.5 mg/l
	Nitrat (NO ₃)	–	45 mg/l
3.İÇİLEBİLME ÖZELLİĞİNE ETKİ YAPAN MADDELER	Renk	5 birim	50 birim
	Bulanıklık	5 birim	25 birim
	Koku ve tad	kokusuz normal	kokusuz normal
	Buharlaşıma Kalıntısı	500 mg/l	1500 mg/l
	Demir (Fe)	0.3 mg/l	1 mg/l
	Mangan (Mn)	0.1 mg/l	0.5 mg/l
	Bakır (Cu)	1 mg/l	1.5 mg/l
	Çinko (Zn)	5 mg/l	15 mg/l
	Kalsiyum (Ca)	75 mg/l	200 mg/l
	Magnezyum (Mg)	50 mg/l	150 mg/l
	Sülfat (SO ₄)	200 mg/l	400 mg/l
	Klorür (Cl)	200 mg/l	600 mg/l
	pH	7–8.5	6.5–9.2
	Bakiye Klor	0.1 mg/l	0.5 mg/l
	Fenolik Maddeler	–	0.002 mg/l
	Alkali Benzil Sülfonat	0.5 mg/l	1.0 mg/l
	Mg+Na ₂ SO ₄	500 mg/l	1000 mg/l
4.KİRLENMEYİ BELİRTEN MADDELER	Toplam Organik Madde	3.5 mg/l	–
		–	–
		–	–

*Toplam organik madde miktarının 3.5 mg/l'yi aşması halinde bakteriyolojik muayenede özellikle titiz davranılmalıdır.

Tablo 1.2. İçme suyu standartları

	Türk Standartları TSE-266	Dünya Sağlık Örgütü (WHO)	ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA)
BERRAKLIK (NTU)			
Bulanıklık	25	5	5
MİKROBİYOLOJİK PARAMETRELER			
Koliform Bakteri	<1	0	<1
ORGANİK KİMYASAL PARAMETRELER (mg/l)			
Toplam Trihalometanlar		400	100
İNORGANİK KİMYASAL MADDELER (mg/l)			
Alüminyum, Al	0.2	0.2	1
Arsenik, As	0.05	0.05	0.05
Baryum, Ba	0.3		1
Kadmiyum, Cd	0.01	0.01	0.01
Krom (Toplam)	0.05	0.05	0.05
Florür, F	1.5	1.5	0.7-2.4
Kurşun, Pb	0.05	0.05	0.05
Civa, Hg	0	0	0
Nitrat, NO ₃	50	50	45
Selenyum, Se	0.01		0.01
Gümüş, Ag	0.01		0.05
Antimon, Sb	0.01		0.01
Berilyum, Be			0
Asbest > 10 mikron			7 milyon lif/l
RADYOLOJİK PARAMETRELER			
Gross Alfa			15
Gross Beta			50
ESTETİK PARAMETRELER (mg/l)			
Klorür, Cl	600	250	250
Renk (Birim)	20	15	15

Tablo 1.2 (devam). İçme suyu standartları

	Türk Standartları TSE-266	Dünya Sağlık Örgütü (WHO)	ABD Çevre Koruma Ajansı (US EPA)
Bakır, Cu	3		1
Deterjanlar	0.2		0.5
Demir, Fe	0.2		0.3
Mangan, Mn	0.05	0.5	0.05
Koku Eşik Değeri (Birim)			3
pH	6.5–9.2	6.5–8.8	6.5–8.5
Sülfat, SO ₄	250	250	250
TÇK	1500	1000	500
Çinko, Zn	5		5
İLAVE PARAMETRELER (mg/l)			
Kalsiyum, Ca	200		
Sertlik, CaCO ₃		500	
Magnezyum, Mg	50		
Potasyum, K	12		
Sodyum, Na	175	200	
Bakiye Klor	0.1–0.5	5	
Amonyum, NH ₄	0.05–0.5	1.5	

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Filtrasyon, içme suyu arıtımında askıdaki maddeleri uzaklaştırmak, ön ozonlama veya klorlama sırasında okside olmuş demir ve mangani tutmak, amonyumu okside etmek, mikroorganizmaları nispeten uzaklaştırmak gibi çok çeşitli amaçlarla kullanılan ve içme suyu tesislerinin kalbi olarak kabul edilen en eski arıtma yöntemlerinden biridir. Bu nedenle su arıtımında filtrasyon konusunda yoğun araştırmalar bulunmaktadır. Kum filtrelerinin uzun süreli ve yüksek arıtma verimine sahip olarak işletilmesi; ham su özelliklerine, filtrasyon hızına, filtre malzemesinin cinsine ve malzemenin diğer özelliklerine (yoğunluk ve porozite gibi) bağlıdır. Bununla birlikte bir ön arıtmanın (ozonlama, havalandırma ve koagülasyon gibi) yapılması ve filtre sisteminin modifikasyonları da işletmeyi iyileştirmeye yönelik uygulamalardır.

Bu çalışmada, iki denk filtre kolonu kullanılarak filtrasyon öncesinde ultrases uygulanan ve uygulanmayan filtreler mukayese edilerek yüzeysel sulardan bulanıklık ve partikül madde gideriminde optimum şartlar araştırılmıştır. Alum ve demir klorür

gibi yumaklaştırıcılar da kullanılmıştır. Ayrıca yük kayıpları da ölçölerek filtre ömrünün maksimize edilmesi incelenmiştir. Deneylerde hem kaolinle hazırlanmış sentetik su hem de bir yüzeysel su kullanılmıştır. Yüzeysel su, Ömerli Havzası'ndan temin edilmiştir.

Bazı içme suyu standartlarına göre, filtre edilmiş yüzeysel sularda bulanıklığın 0.1 NTU'ya indirgenmiş olması gerekir. Fakat sadece bulanıklık sonuçları Giardia (10–12 µm) ve Cryptosporidium oocyst (4–6 µm) gibi mikroorganizmaların uzaklaştırılmasını garanti etmez. Bu nedenle partikül sayısı ve büyüklüğünü dikkate almak gerekir. Yüzeysel su arıtımında Giardia kistlerinin %99.9, enterik (bağırsak kökenli) virüslerin ise %99.99 oranında giderilmiş olması gerekmektedir [1].

2. İÇME SUYU ARITIM TEKNOLOJİSİ

2.1. Yüzeysel Su Kaynakları

İçme suyu temin edilen kaynaklar yüzey suları ve yer altı suları olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Nehirler, göller, akarsular, göletler ve baraj suları yüzeysel su kaynaklarını oluşturur. Yüzeysel su kaynaklarının arıtımı, su kaynağının yeri, kotu ve kalitesi ile ilgili problemlerin çözümü ve standartların sağlanabilmesi için çeşitli arıtma tiplerinin uygulanmasını gerektirir.

Nehir veya akarsular, su kalitesinde ani değişikliklerin yaşandığı yüzeysel su kaynaklarıdır. Şiddetli yağmurlar veya bahar yağmurları sırasında bulanıklılık ve diğer parametrelerde değişiklikler meydana gelir. Bu durum, esnek ve güvenilir arıtma sistemlerini ve operatörün yakın ilgisini gerektirir. Ayrıca nehir ve akarsular, kirlilik barındıran girişimleri arıtma tesisine taşıma riskine sahiptirler. Sonuç olarak arıtma prosesinin seçimi ve dizaynı, bu durumlar göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

Göl, gölet ve baraj suları su kalitesinde mevsimsel değişikliklerin yaşandığı yüzeysel su kaynaklarıdır. Fakat bu değişiklikler, nehir ve akarsulara göre daha kademeli ve yavaş gerçekleşen değişikliklerdir. Yaz aylarında göllerde tabakalaşma gözlenir. Sıcak su tabakası göl yüzeyine yakında kalırken, soğuk su tabakasında çok az bir karışım meydana geldiği için diptedir. Göllerde oksijen tüketici faaliyetler meydana geldiğinde demir ve mangan çözünür hale geçebilir. Anoksik ve/veya anaerobik parçalanma ürünleri ve hidrojen sülfür sebebiyle tat ve koku problemleri artabilir.

Göllerde üst seviyeler, karbonat, besi ve sıcaklık şartları bakımından alg patlamalarına sebep olabilir. Alg patlamaları, suyun bulanıklılığı, alkalitesi, tat, koku, pH ve diğer karakteristiklerinde değişikliklere sebep olabilir. Yüzeysel su

kaynaklarının seçiminde etkili diğer faktörler çevredeki arazinin kullanımı, bitkiler, toprak karakteristikleri ve topografyadır.

Yüzey sularının su kalitesi açısından ana problemleri özet olarak; parçacık içeriği, rengi, tadı, kokusu ve mikrobiyolojik içeriği ile ilgili problemler olarak ifade edilebilir. Sudaki partiküller, moleküllerden daha büyük fakat genellikle çıplak gözle seçilemeyen, büyüklükleri 1–150 µm arasında değişen, ince parçalanmış katılardan oluşur. Partiküller, kil, silt ve asbest gibi inorganik maddelerin yanı sıra alg, bakteri ve diğer mikroorganizmalar gibi ölü veya canlı organik maddeleri de içerebilirler. Ayrıca, geniş yüzey alanına sahip partiküller, güneş ışığının derinlere nüfuz etmesini ve su derinliğinin görünebilirliğini azaltmaları sebebiyle estetik olmayan durumlara sebep olurlar. Toksik maddeleri içermeleri veya absorbe etmeleri sebebiyle de sağlık açısından önem taşırlar. Bu toksik maddeler arasında patojenik mikroorganizmalar, ağır metaller ve klorlu hidrokarbonlar yer alır. Partiküller, yüzeylerine adsorbe ettikleri mikroorganizmalar sebebiyle dezenfektanların tüketimi sonucu dezenfeksiyon prosesine girişimde bulunabilirler. Buna ek olarak bazı partiküllerin dezenfektan ihtiyacı söz konusudur.

Temel arıtma tesisi, filtrasyondan önce, pıhtılaştırma, yumaklaştırma ve çöktürme aşamalarını içerir. Daha esnek olan bazı arıtma tesisleri, çoğu zaman su kalitesini daha ileri düzeyde iyileştiren iki kademeli koagülasyon, flokülasyon ve çöktürme birimlerinden oluşur.

Mevsimsel olarak yüksek partikül, renk, tat, koku ve kabul edilebilir sertlik konsantrasyonlarına sahip yüzey su kaynakları için geleneksel bir proses akış diyagramı şekil 2.1' de verilmiştir.

Ham suyun ızgaralardan geçirilmesi, sudaki büyük maddelerin uzaklaştırılması için yaygın bir şekilde sistemin bir parçası olarak kullanılmaktadır. Bakteri içeriğini, alg büyümesini, tat ve kokuyu kontrol için bir ön oksitleyici veya dezenfektan kullanılır. Geçmişte klor gazı çok daha yaygın bir şekilde kullanılırken, halojenli yan ürünlerin insan sağlığına olumsuz etkilerinin ortaya konması sebebiyle ozon, klor dioksit ve potasyum permanganat gibi alternatiflerin kullanımını artırmıştır.

her şey olabilir. Kum, kil, silis, kalsiyum karbonat, demir, mangan, sülfür vb. safsızlıklar, bulanıklığa neden olurlar. Birimi NTU (Nephelometrik bulanıklık birimi), JTU (Jackson bulanıklık birimi) veya FTU (Formazin bulanıklık birimi)'dir.

İçme sularının mutlaka berrak olması gerekir. Çünkü sudaki bulanıklık, mikrobiyolojik faaliyetlerin olması veya muhtemel bir kirli su girişimi ile ilişkilendirilir ve sağlık tehlikesi mevcut olabilir. Bu nedenle, içme sularında bulanıklık istenmez. Bulanıklığın artması, suyun filtrasyon maliyetini de artırır. Yüksek bulanıklılıktaki su, kum filtrelerini kullanılamaz hale getirebilir (yıkama süreleri kısılır, maliyet artar). Yüksek bulanıklılığa sahip sularda bulunan askıda maddeler, kimyasal koagülasyon işlemi ile yumaklaştırılarak kum filtrelerinde tutulabilir.

İnfektivite; patojen mikroorganizmaların enfeksiyona neden olma potansiyelini ifade etmektedir. İçme suyu kaynaklarında, çeşitli patojen mikroorganizmaların varlığı kaçınılmazdır. Bu nedenle dezenfeksiyon işlemi, içme suyu arıtımında son derece önemli bir adımdır. Dezenfeksiyonun etkili olabilmesi için dezenfektanın sudaki patojen mikroorganizmalarla tam temasının sağlanması gerekir. Ancak özellikle kanalizasyon atıklarındaki patojenler, sudaki katı maddelerin içine yerleşerek dezenfektan maruziyetinden kurtulabilmektedir. Bu nedenle içme suyu olarak kullanılacak sularda, girişimin bir belirtisi olan bulanıklığın düşük değerlerde olması istenir. Bulanıklık, özellikle nehir sularında, mevsimsel olarak değişiklik göstermekle birlikte, yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bunun başlıca nedenleri, yağmurlarla taşınan toprak ve/veya nehre karışan evsel–endüstriyel atık sularıdır. Ayrıca bu kirlenme sırasında organik maddeler kadar inorganik maddeler de suya karışır. Bu maddelerin sudaki varlığı, bakteri oluşumunu destekler. Bakteri oluşumu da suda bulanıklığı artırır. Örneğin azot ve fosfor gibi elementleri biyokimyasal reaksiyonlarda kullanan algler, çoğalarak suda bulanıklığa sebep olurlar. Aynı zamanda suda sıcaklık artışı da mikroorganizma faaliyetlerini hızlandırır.

Renk; suda bulunan çeşitli organik maddelerin yanısıra Fe ve Mn gibi ağır metaller nedeniyle de oluşmaktadır. Organik maddeler suda sarımsı bir görünüşe sebep olurken, demir kahverengimsi, mangan ise grimsi bir görüntü oluşturmaktadır.

Renk, Pt–Co (Platin–Kobalt) birimi ile ölçülür. TS–266’ya göre renk için kabul edilebilir limit değeri, 5 Pt–Co’tır. Giderim verimliliği, oksidasyon verimine, su kaynağının çeşidine ve kalitesine bağlıdır.

Tat ve koku; sularda, pek çok etken nedeniyle ortaya çıkabilmektedir. Bunlar, organik maddeler, mikroorganizma faaliyetleri, demir, mangan ve korozyonun metalik ürünleri, klorlama, fenol gibi endüstriyel atık kirliliği, yüksek mineral konsantrasyonu ve H₂S, CH₄ gibi suda çözünebilen gazlardır. Organik maddeler, genellikle suda bulunan alg, virüs, bakteri, yosun gibi organizmaların çürüyüp ayrışmaları sonucu açığa çıkarak tat ve koku problemlerine neden olmaktadır. Klor, dezenfeksiyon ve ağır metallerin çöktürülmesi gibi işlemlerde kullanıldıktan sonra suya kendine has bir tat ve koku bırakır.

Filtrasyon prosesinde, giriş suyu karakteristikleri, filtre malzemesinin özellikleri ve akım hızı (yüzey yükü), dikkate alınacak parametrelerin başlıcalarıdır. Giriş konsantrasyonunun artması, filtrenin tıkanma süresini kısaltmaktadır. Filtrelerde kullanılan dolgu malzemesinde dikkat edilecek nokta, malzeme boyutu ve gözenekliliğidir. Filtrelerde yüzey yükü ise filtreye giriş debisinin filtre yüzey alanına oranıdır. Düşük yüzey yüklerinde su, kolayca filtreden geçer ve yük kayıplarındaki artış, daha geniş zaman aralıklarına yayılır.

2.2.2. Filtrasyon Hidroliği

Poroz bir ortamda sıvı akışını en iyi açıklayan kanun Darcy Kanunu’dur. Darcy Kanunu’na göre filtrasyon hızı (V_f), ortamın geçirimsizlik katsayısı ve hidrolik eğimle doğru orantılıdır [3]. Buna göre filtrasyon hızı aşağıdaki formül ile ifade edilir.

$$V_f = k * I \quad (2.1)$$

V_f : Filtrasyon hızı (m)

k : Geçirimsizlik katsayısı

I : Hidrolik eğim

Hidrolik eğim, filtrelerde su yüzeyleri arasındaki mesafenin yatak kalınlığına oranıdır ($I = H / L$). Bu eşitlik, (2,1) nolu denklemde yerine konulursa, filtrasyon hızını veren denklem aşağıdaki şekli alır.

$$V_f = k * H / L \quad (2.2)$$

(2,2) nolu denklemde su yüzeyleri arasındaki mesafe yani yük kaybı olan H çekilirse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$H = V_f * L / k \quad (2.3)$$

Filtrasyon ünitelerinin yük kayıplarının hesaplanmasında Carmen–Kozeny veya Sabri Ergun denklemleri kullanılır.

Carmen–Kozeny eşitliğine göre “ d ” çapında sürekli akışı olan filtre yatağında geçirimsizlik katsayısını veren ifade aşağıda verilmiştir.

$$k = \frac{g \times \varepsilon^3 \times d^2}{180 \times \nu (1 - \varepsilon)^2} \quad (2.4)$$

k : Geçirimsizlik katsayısı (m/s)

g : Yerçekimi ivmesi (m/s^2)

ν : Kinematik viskozite (m^2/s)

ε : Porozite

d : Dane çapı (m)

(2.4) nolu formülü (2.3) nolu formülde yerine koyarsak;

$$H = \frac{V_f \cdot L}{d^2} \cdot \frac{180\nu}{g} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (2.5)$$

Carmen–Kozeny denklemi genellikle laminar akımlar için kullanılır. Sabri Ergun denklemi ise laminar akım, geçiş bölgesi ve türbülanslı akımı içine alan daha geniş kapsamlı bir denklemdir.

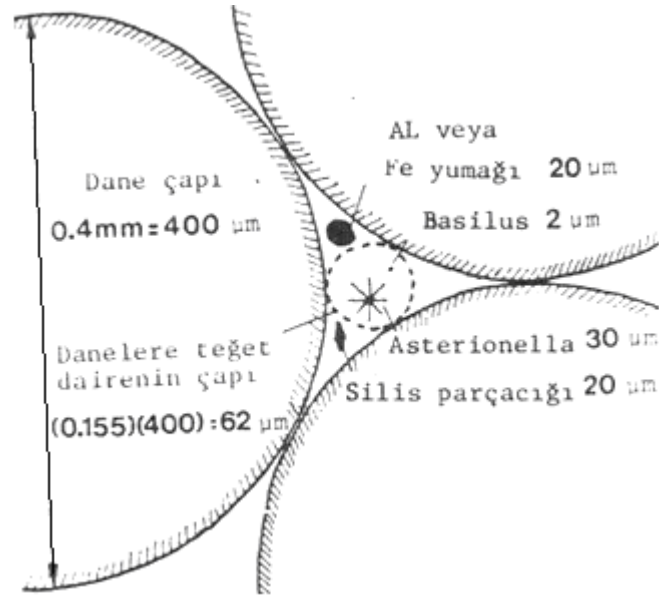
$$\frac{H}{L} = \frac{150\mu}{g \cdot \rho} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \left(\frac{S}{6}\right)^2 \cdot V_f + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{S}{6} \cdot \frac{V_f^2}{g} \quad (2.6)$$

2.2.3. Filtrasyon Mekanizmaları

Filtrasyon sırasında, koşullara bağlı olarak aktif olan, farklı tutunma mekanizmaları vardır. Mekanik olarak tutunma, çökme ve adsorpsiyon gibi mekanizmalar, tek tek veya birlikte her bir partikülün tutunma işlemi sırasında etkili olur.

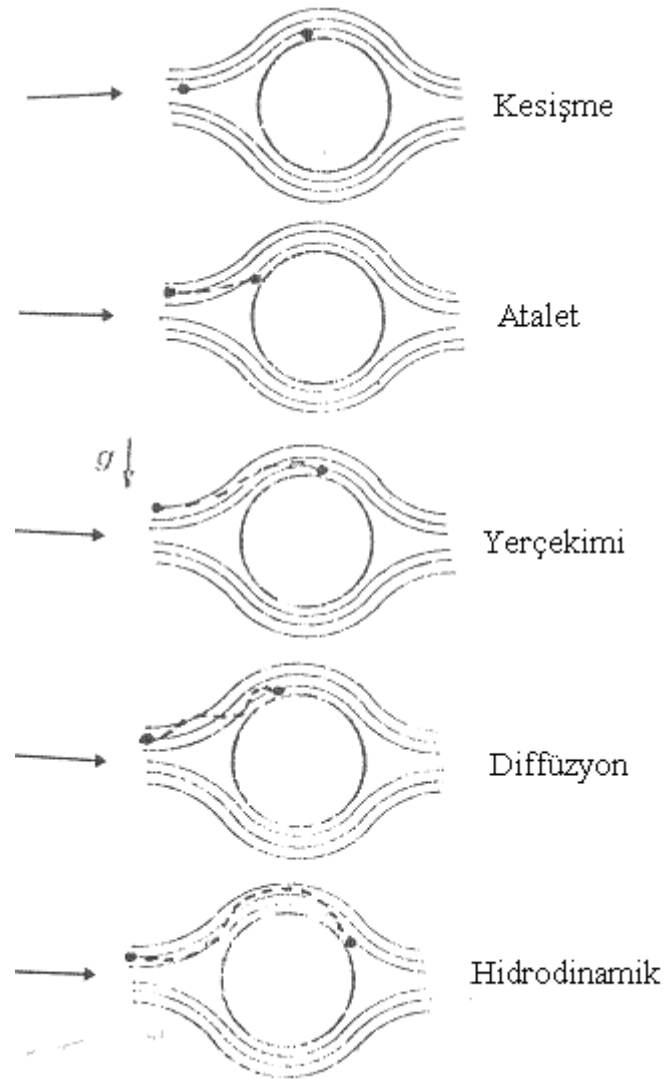
Kum filtrelerinde suda mevcut olan katı maddeler değişik mekanizmalar sonucunda tutulmaktadır. Bunlar, mekanik süzme, çökme, adsorpsiyon ile kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlardır.

- **Mekanik süzülme:** Suyun filtre yatağından geçmesi sırasında bazı kirleticilerin filtre malzemesi tarafından tutulması, mekanik süzülme olarak adlandırılır. Süspansiyon halindeki katıların boyutları, yatak malzemesi gözeneklerinden büyük olduğundan, burada tutulurlar.



Şekil 2.2. Filtre malzemesinin arasında kalan deliklerin ve süspansiyon halindeki maddelerin boyutları [4]

- **Çökeltme:** Filtre yatağından aşağı doğru geçirilen ham su içerisindeki kirleticiler, filtre dolgu malzemesini oluşturan taneciklerin yüzeyinde çöker. Meydana gelen durum bilindiği üzere basit bir çökeltme tankında gerçekleşen çökeltmeye çok benzemektedir. Bu iki olay arasındaki fark ise; bir çökeltim tankında çökelen maddenin birikiminin tabanda olmasıdır. Filtre ortamında ise çökeltme tanecik yüzeylerinde olmakta ve tüm taneciklerin toplam yüzey alanı çökeltmenin gerçekleşeceği yüzeyi oluşturmaktadır.
- **Yüzeyde tutulma (adsorbsiyon):** Su ortamında bulunan askıdaki katı maddelerin, kolloidal maddelerin ve moleküler düzeyde çözünmüş maddelerin uzaklaştırılmasında en etkin mekanizma adsorpsiyondur. Adsorpsiyon ile yüzeyde tutulmak istenen partiküllerin önce filtre ortamında bulunan dolgu malzemesini oluşturan taneciklerin yakınına getirilmesi gerekir. Adsorpsiyon kuvvetleri en fazla 0,1 mikrometre gibi mikroskopik mesafeler için tesirli olmaktadır. Halbuki kum taneciklerini saran film tabakasının kalınlığı bu mesafeden çok daha büyüktür. Bu husus dikkate alınırsa adsorpsiyonun, daneciklerin tutulmasında bir rolü olmayacağı düşünülebilir fakat adsorpsiyon işlemine yardım eden taşınma mekanizmaları ile suda bulunan partiküller, filtre malzemesini teşkil eden kum danesine doğru yaklaştırılır. Böylece mesafe azaldığından partiküller tutulabilir.

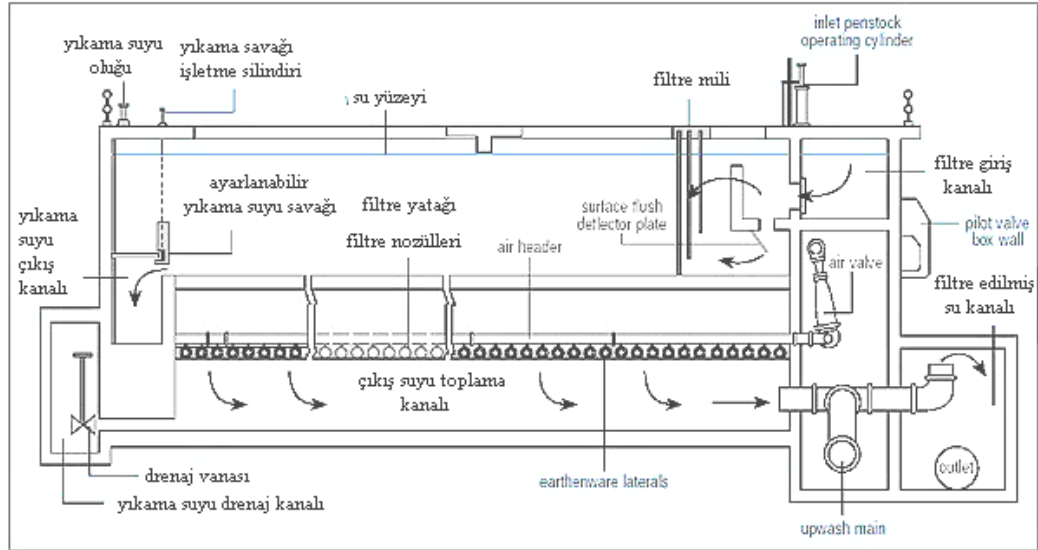


Şekil 2.3. Parçacıkların taşınma mekanizmaları [4]

- Kimyasal reaksiyonlar: Filtrasyon işlemi sırasında bazı kimyasal reaksiyonlar gerçekleşir. Böylece çözülmüş haldeki kirletici maddeler ayrışır, daha az zararlı maddeler haline dönüşür veya çözünmeyen maddelere dönüşerek çökme ve adsorbsiyon ile sudan uzaklaşır. Suda yeterli oksijen mevcut olduğu sürece organik maddeler, aerobik olarak ayrışır.

- Biyolojik faaliyetler: Filtre ortamında yaşayan mikroorganizmaların faaliyeti sonucunda biyokimyasal reaksiyonlar oluşur. Arıtılacak suda mevcut olan veya ilave edilen mikroorganizmalar, filtre ortamını oluşturan taneciklerin yüzeyinde tutulan organik veya inorganik maddeleri enerji ihtiyaçları ve çoğalmaları için tüketirler. Mikroorganizmalar Bundan dolayı koloidal ve moleküler düzeyde çözülmüş kirleticiler, mikroorganizmalar tarafından su ortamından uzaklaştırılır. Giriş suyu ile

birlikte zararsız ve faydalı mikroorganizmaların yanında E. Coli ve patojen mikroorganizmalar da gelmektedir. Bu mikroorganizmalar çökelme, adsorpsiyon ve süzme mekanizmaları ile giderilmektedir.



Şekil 2.4. Örnek bir filtre düzeneği

Askıda katıların bir granüler (gözenekli – taneli) filtre ortamından uzaklaştırılması, çok karmaşık bir prosestir. Uzaklaştırmada önemli rol oynayabilen çeşitli mekanizmalar hakkında ayrıntılı araştırmalar birçok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir [5]. Bu mekanizmalar;

- 1) Süspansiyonun fiziksel ve kimyasal özelliklerine,
- 2) Ortamın fiziksel ve kimyasal karakteristiklerine,
- 3) Filtrasyon debisine,
- 4) Suyun kimyasal özelliklerine

bağlıdır.

Bununla birlikte, genellikle uzaklaştırma işlemi filtre yatağı içerisinde meydana gelir ki bu proses, “derin yataklı filtrasyon” olarak bilinir. Filtrasyon esnasında verimlilik birçok mekanizmaya bağlıdır. Bazı katılar kum taneleri arasında tutularak uzaklaştırılabilir. Diğer katıların, özellikle daha ufak katıların uzaklaştırılması iki tip mekanizmaya bağlıdır.

1) Askı halindeki küçük parçacıkları, içinde bulunduğu akışkanın kütesinden alıp, ortamın yüzeylerine yaklaştırmak için bir taşınım mekanizması gereklidir. Taşınım mekanizmaları, yerçekimi çökmesi, difüzyon ve hidrodinamiği kapsayabilir ve

- a) ortam boyutu,
- b) filtrasyon debisi,
- c) akışkan sıcaklığı,
- d) asılı parçacıkların yoğunluk ve boyutu

gibi fiziksel özelliklerden etkilenirler.

2) Parçacık, ortamın veya ortamda daha evvel biriken katıların yüzeylerine yaklaştıkça, parçacığı tutabilmek için bir tutulma mekanizması gerekmektedir. Tutulma mekanizması;

- a) elektrostatik etkileşimleri,
- b) kimyasal bağları,
- c) spesifik adsorbsiyonu

içerebilir. Bunların hepsi ön arıtımda uygulanan yumaklaştırıcılar ve suyun kimyasal karakteristikleri ile filtre ortamının yapısı tarafından etkilenir.

Kum filtrelerindeki filtrasyon sırasında, filtrede yığılan çökelti, yukarıda adı geçen mekanizmalardan biri veya birkaçı tarafından uzaklaştırılır. Parçacıklar, filtre içerisinde kendilerini koparıp atmak isteyen hidrolik kesme kuvvetleri ile denge halinde tutulurlar. Filtre kirlendikçe, filtrenin gittikçe tıkanan yukarı tabakaları arasındaki hız artar ve bu tabakalar temizlemede daha az verimli hale gelirler. Temizleme yükü filtrenin daha derinlerine geçer [4, 6, 7]. Sonunda, istenen çıkış kalitesini sağlayacak yeterli yatak derinliği kalmaz ve filtrenin durdurulması gerekir.

Kirli bir filtrede filtrasyon debisi aniden artırılırsa, hidrolik kesme kuvvetleri de aniden artar [8]. Bu durum, biriken katı maddelerle su arasındaki mevcut dengeyi bozar ve bazı katı maddeler yerlerinden ayrılarak çıkış suyuna karışırlar. Katı maddenin tipi ve debi değişiminin büyüklüğü ile aniliğine bağlı olarak, bu etki çok

şiddetli olabilir. Projelendirmede ani debi değişiminin her türlü kaynağından kaçınılmalıdır.

2.2.4. Geçirimli Ortamda Akışın Hidroliği

Genellikle kullanılan debilerde, suyun filtre içinden akışı, hidrolik olarak yeraltı tabakalarındaki akım ile aynıdır. Akım, Darcy Kanunu'na uyar; temiz filtre yatağında laminerdir ve uzaklaştırılan askıdaki maddelerle yatak kirlendikçe bu durumda kalır.

Askıdaki maddeler, filtre tarafından tutuldukça akış için mevcut boşluk alanı azalır ve bu yüzden boşluklar arasındaki akım hızı artar. İstenen filtrasyon debisini muhafaza edebilmek ve filtre içindeki sürtünme kaybını karşılayarak suyun kirli filtrenin içinden geçmesini zorlamak için daha çok enerji gereklidir. Bu, filtrenin giriş kısmından çıkış kısmına kadar, toplam enerjide bir azalma olarak değerlendirilir. Genellikle yük kaybı olarak bilinen bu enerji azalması;

- ekonomik olmayacak şekilde büyük olursa veya,
 - istenen akım debisi mevcut cihaz sistemi ile sağlanamazsa veya,
 - çıkış suyu kalitesi, askıdaki katı maddelerin geçişinden dolayı bozulursa,
- filtre devreden çıkarılmalı ve ortam temizlenmelidir.

Taneli maddeler arasında laminar akımdaki yük kaybı Darcy tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

$$V_f = k * I \quad (2.7)$$

V_f : filtrasyon hızı (m/s)

k : geçirimsizlik katsayısı (m/s)

I : hidrolik eğim (H/L) (birimsiz)

H : yük kaybı (m)

L : filtre yatağının kalınlığı (m)

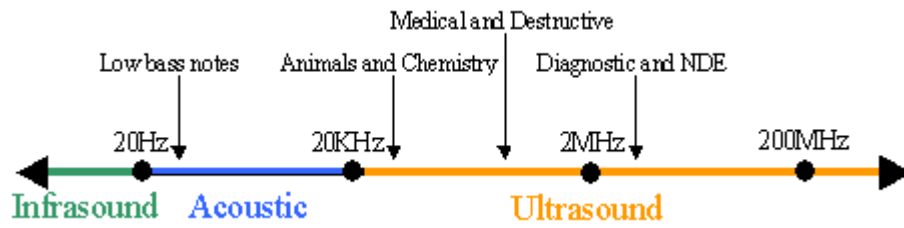
2.2.5. Yerçekimli Filtrelerde Yük Kaybı

Yüksek hızda filtrelerin kullanılması gittikçe yaygınlaştığı halde, kullanılan filtrelerin çoğunda katı maddelerin en etkin uzaklaştırılması kum filtrelerinin yukarı kısımlarında meydana gelir. Tipik bir yerçekimli filtrede bir filtre deneyi esnasında çeşitli zamanlardaki basınç, şekil 2.5'te gösterilmiştir.

3. ULTRASES

3.1. Ultrasesin Genel Tanımı ve Uygulama Alanları

Ultrases, insan kulağının işitemeyeceği kadar yüksek frekanslı ses dalgaları olarak tanımlanır. Ses frekansı, hertz (Hz) birimi ile ifade edilir. İnsan kulağının algılayabileceği ses frekansı 20 Hz ila 20 kHz arasındadır. Diğer canlılar da 1–200 kHz arasında değişen farklı frekans değerlerini algılayabilirler. Ultrases aralığı, insan kulağının algılayabildiği limit değeri olan 20 kHz'den gaz ortamında 5 MHz'e, sıvı ve katı ortamda ise 500 MHz'e kadar çıkan seslerdir (şekil 3.1).



Şekil 3.1. Sesin frekans aralıkları ve uygulama örnekleri [9]

Ultrases dalgaları, su içerisinde hareket ederken kavitasyon meydana getirirler. Kavitasyon, en basit ifade ile, sıvı ortamdaki basınç değişimleri sonucu baloncuk oluşumu, gelişimi ve patlamasıdır [10].

Ultrases dalgaları bir sıvıya iletildiğinde akustik kavitasyon gerçekleşir [11]. Ultrases dalgalarının oluşturduğu, düzenli ve keskin bir salınım gösteren basınç farklılıkları nedeniyle, sıvı içerisindeki baloncuklar önce genişler, daha sonra daralır ve sonunda kendi içine doğru çöker. Kaviteye uğrayan bir baloncukun ömrü mikrosaniyeler ile, çapı da mikrometreler ile ölçülür. Kaviteye prosesi sırasında baloncuklar, ses dalgalarının seyrekleşme (rarefaction) yarı döngüsünde genişler, sıkışma (compression) yarı döngüsünde ise daralır. Kaviteye prosesi sürekli ve süreksiz olmak üzere iki şekli vardır. Sürekli kaviteye, süreksiz kaviteye göre zayıftır. Süreksiz kaviteye maruz kalan baloncuklar, çok daha hızlı ve şiddetli şekilde çöker ve dolayısıyla çöküntü bölgesinde daha yüksek sıcaklık ve basınç

değerleri ortaya çıkar. Sıvı ortamdaki baloncuklar çöktüğünde, çöküntü bölgesini çevreleyen sıvının hızı, yaklaşık olarak ortamdaki ses hızı kadardır [12]. Baloncuklar çöktüğünde, sıvının sıcaklığı 2000–4000 °K aralığındadır ve basınç, 330 atm'den daha yüksek değerlere ulaşmaktadır [11]. Baloncukların içerisinde, ortamdaki ekstrem şartlar sebebiyle sonik ışıma (sonoluminescence) adı verilen olay gerçekleşmektedir. Bu ekstrem sıcaklık ve basınç şartları, hidrojen atomlarının ve hidroksil radikallerinin açığa çıkmasına ve hem kesme hem de çekme gerilimlerinin oluşmasına neden olmaktadır [13].

Ultrasonik kavitasyon nedeniyle su moleküllerinin ayrışması sonucu hidroksil (OH) ve hidrojen (H) radikalleri oluşur [14]. Bu radikaller kimyasal reaksiyonlar başlatır ve organik kirleticilerin parçalanmasına yardımcı olur. Ayrıca ultrasonik kavitasyon, karıştırma, parçacıkların parçalanması, katı yüzey alanının artması ve kütle transferinin artması gibi mekanik etkilere de sebep olur [15].

Ultrases, çok çeşitli su kaynakları için potansiyel bir dezenfeksiyon yöntemidir [16]. Ultrases dezenfeksiyonu, proste kimyasal kullanılmadığı için tercih edilen bir oldukça verimli prostedir. Örneğin, birkaç kilovatlık bir sistemle Cryptosporidium (bir tür tek hücreli patojenik parazit) oositleri içeren 100 m³/gün'lük su arıtılabilir. Bu sistem, filtre geri yıkama suyunun arıtımında da kullanılabilir [17].

Elektrik, mekanik veya basınç enerjisi, ultrases jeneratörü adı verilen cihaz tarafından yüksek frekansta ses dalgalarına çevrilir. Ultrases sistemleri, su yumuşatmada, filtrasyonda, mekanik ve/veya iyonik arıtmada, içme suyu hazırlamada, merkezi ısıtma sistemlerinde ve Ca/Mg tortusu bulunabilecek her türlü cihazda kullanılabilir. Ultrases, su kalitesini olumsuz etkilemediği gibi çevre için de zararsızdır. Ultrases uygulamalarına başvuru alanlar tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Ultrasesin genel uygulama alanları

Uygulama alanı	Uygulama
Biyoloji, biyokimya	Saflaştırma ve hücre parçalama işlemleri
Mühendislik	Delme, öğütme ve kesme işlemleri, cam ve seramik üretimi, plastik ve metal şekillendirme
Diş hekimliği	Diş temizliği ve dolgu işlemleri
Jeoloji, coğrafya	Maden ve petrol arama işlemleri ile haritacılıkta çeşitli ölçümler
Endüstri	Başta metal ve kimya endüstrisi olmak üzere pek çok endüstri dalında çeşitli uygulamalar
Tıp	Tanı koyma, kanser ve kansızlık tedavisi

Ultrases bu genel uygulama alanlarının yanında çevre mühendisliğinde su ve atıksu dezenfeksiyonunda, arıtma çamurlarının susuzlaştırılmasında ve membran filtrelerin temizlenmesinde uygulanmaktadır [18]. Membran filtrelerin kirliliğinin giderilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler, tablo 3.2 ve 3.3'te sunulmuştur.

Tablo 3.2. Membran filtre tipine göre yıkama türleri [19]

Yıkama türü	Kullanım yeri
İleri yıkama	Sarmal gözenekli ve tübüler membranlar
Geri yıkama	Delikli elyaf

Tablo 3.3. Membran filtrelerin temizlenmesinde kullanılan çeşitli yöntemler [19]

Membran temizleme yöntemi	Karşılaşılan zorluklar
Deterjan, asit veya alkaliler gibi kimyasalların kullanılması	Membran yapısının zarar görebilmesi, ikincil kirlilik oluşumu
Elektriksele yöntemler	Elektrodiyaliz nedeniyle gaz oluşumu, elektrotların korozyonu, yüksek enerji maliyeti

Literatürde, bütün bu olumsuzlukları ortadan kaldırarak membran akısını artırmak amacıyla yapılan birçok çalışma göze çarpmaktadır. Ultrases ile ilgili uygulamalar aşağıdaki tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Membran filtrelerin temizlenmesinde ultrases kullanımı [19]

Kullanım amacı	Kullanım yeri
Konsantrasyon polarizasyonunu engellemek	Ters osmoz
Arıtım verimini artırmak	İyon değıştirici reçine yatağı
Membran sistemlerde küçük ve büyük molekül ağırlığına sahip moleküllerin permeabilitesini artırmak	Polimerik membranlar (0.05–30 W/cm ² şiddet ve 10 kHz–20 MHz frekans)
	Biyolojik membranlar (0.05–3 W/cm ² şiddet ve 1–3 MHz frekans)

Membran filtrelerin temizlenmesinde ultrases kullanımı yaygınlaşmaktadır. Ultrases ile membran filtre temizliğinin temelini oluşturan “kavitasyon” olayı ile içme suyu arıtma tesislerinin kalbi olan derin yataklı filtrelerin de temizlenebileceğı düşünölmektedir.

3.2. Ultrasesin Germisidal Etkileri

Mikroorganizmalar, ultrases dalgalarının neden olduğı kavitasyon olayı sırasında çeşitli mekanizmalarca inaktive edilebilmektedir. Bunlardan birincisi, baloncukların titremesi sırasında oluşan mikroskopik sıvı akışının sebep olduğı gerilimlerin bir sonucu olarak hücre membranlarının tahrip olmasıdır [20]. İkincisi, kesme ve çekme gerilimleri ile hidroksil radikallerinin birarada mikroorganizmaların inaktivasyonunu sağlayabilmeleridir. Üçüncüsü, sonikasyon etkilerinin diğere dezenfektanlar ile birlikte kullanılabilmesidir. Serbest radikal bombardımanı sırasında hücre membranları, kavitasyonun yarattığı etki ile tahrip olmaktadır ve bu sayede dezenfektanlar ve/veya oksidanlar hücre içine difüze olarak temel yapıları yok edebilmektedir [11]. Son olarak, sonikasyon, flokların dağılmasına yardımcı olmaktadır ve bu sayede mikroorganizmalar dezenfeksiyona karşı daha hassas hale gelmektedir.

Serbest hidroksil radikallerine ek olarak, bu radikallerin birleşmesiyle oluşan ve yine oksidan özelliğıe sahip hidrojen peroksit (H₂O₂) bileşığı de dezenfeksiyona yardımcı olmaktadır [11]. Ancak, bu inaktivasyon mekanizması, H₂O₂ üretiminin üst limitinin, mikroorganizmaların inaktivasyonu için gereken konsantrasyondan genellikle düşük olması sebebiyle pek etkili olamamaktadır. Ayrıca, aerobik

mikroorganizmalarca üretilen peroksidaz ve katalaz gibi enzimler, hidrojen peroksit konsantrasyonunu düşürmektedir.

3.2.1. Mikroorganizma İnaktivasyonunda Sonikasyonun Tek Başına Kullanımı ile İlgili Önceki Çalışmalar

Daha önce yapılan araştırmalar sonikasyonun tek başına mikroorganizma inaktivasyonu için yeterli olabileceğini göstermektedir. Sonikasyona dayalı mikroorganizma inaktivasyonunun verimliliği öncelikle, sonikasyon süresine, şiddetine ve frekansına bağlıdır.

3.2.1.1. Sonikasyon Süresi

Konu ile ilgili yapılan bazı çalışmalarda, sonikasyon süresi arttıkça inaktivasyon veriminin de arttığı bulunmuştur.

Nakanishi ve diğerleri (2001), saf su içerisinde askıda haldeki *Cryptosporidium parvum* oositlerinin ultrasese duyarlılıklarını ve uygulama sonrası farelere ne ölçüde bulaşabildiklerini, 28, 45 ve 100 kHz'lik frekanslarda ve yüksek şiddette ultrases dalgaları uygulayarak test etmiştir. Elde edilen sonuçlar, sonikasyon sırasında ookist duvarlarının parçalandığını ve hücre içeriğinin dışarı sızdığını göstermiştir. 28 kHz frekansında uygulanan 2, 10 ve 20 dakikalık sonikasyon işlemleri sonunda sırasıyla yüzde 40, 97 ve 99 oranlarında giderim sağlandığı gözlenmiştir. Ayrıca, 2 ve 10 dakikalık sonikasyon işlemleri sonunda ookistlerin infektiviteleri sırasıyla yüzde 30 ve 0.1 oranına düşmüştür [21].

Phull ve diğerleri (1997), steril tuz çözeltisi içerisinde askıda haldeki *E.coli* ve nehir suyu içerisinde askıda haldeki çeşitli bakterilerin inaktivasyonu için benzer sonuçlar elde etmiştir. Yaklaşık 20°C'de, birkaç farklı sonikasyon şiddetinde ve frenkansında, hem prob hem de banyo tipi sonikasyon sistemleri ile çalışılmıştır. Sonuç olarak mikroorganizmaların maruziyet süresinin inaktivasyon oranıyla doğru

orantılı olduğu bulunmuştur. 20 kHz frekasında ve 15 W/cm³ şiddetinde yürütülen prob tipi sonikasyonda 15 dakika (test edilen en uzun süre) sonunda maksimum inaktivasyon oranına ulaşılmıştır. Ancak, deneyler sırasında tüketilen enerji miktarı göz önüne alındığında 15 dakikalık sonikasyon süresinin büyük su arıtma tesisleri için ekonomik olmayacağı sonucuna varılmıştır [22].

3.2.1.2. Sonikasyon Şiddeti

Sonikasyon süresine benzer bir şekilde, sonikasyon şiddetinin de inaktivasyon verimi ile arasında pozitif bir ilişki olduğu çeşitli çalışmalarda gözlenmiştir.

Thacker (1973), ultrasonik şiddet ve frekansın maya hücrelerinin inaktivasyonu üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada haploid (tek set kromozomlu) ve diploid (çift set kromozomlu) olmak üzere iki tür maya hücresi denenmiştir. Hücreler, YEPD (maya ekstratı, pepton, dekstroz ve saf su karışımı) ya da yüzde 85'lik NaCl çözeltisi ile hazırlanan büyüme ortamlarında muhafaza edilmiştir. Deneyler, 1, 2 ve 4 W/cm²'lik sonikasyon şiddetleri ile 20kHz ve 1 MHz frekanslarında yürütülmüştür. Sonikasyon şiddeti arttıkça daha az maya hücresinin canlı kaldığı gözlenmiştir. Ayrıca en büyük ve bölünebilen maya hücrelerinin, ultrasonik dezenfeksiyona en duyarlı hücreler olduğu saptanmıştır [23].

Scherba ve diğerleri (1991), jakuzi ve benzeri ortamlarda sonikasyon yoluyla mikroorganizma inaktivasyonu üzerine çalışmıştır. Tüm deneyler 39 ± 0.3°C sıcaklıkta ve 26 kHz frekansında yürütülmüştür. İnaktivasyonları incelenen türler; *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis* ve *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri ile bazı virüsler ve mantarlardır. 60 dakikalık ultrases maruziyeti sonunda mantar gelişiminde oldukça büyük azalmalar gözlenmiş ve sonikasyon şiddeti arttıkça verim yükselmiştir. Bakteriler için *E. coli* hariç benzer sonuçlar elde edilmiştir [20].

Hua ve Thompsen (2000), 4.6–74 W/cm² aralığında *E. coli* inaktivasyonu verimini incelemiştir. Sonuçlara göre, en yüksek inaktivasyon oranı, çalışılan en

yüksek ses şiddeti olan 74 W/cm^2 ile elde edilmiştir. 20 kHz frekansında ve 74 W/cm^2 şiddetinde uygulanan 30 dakikalık sonikasyon işlemi sonunda elde edilen inaktivasyon oranı, 4.6 W/cm^2 ve 18.5 W/cm^2 şiddetleri ile elde edilen oranlardan sırasıyla yaklaşık 1.23 ve 1.6 kat daha büyüktür [11].

Nakanishi ve diğerleri (2001) tarafından *Cryptosporidium parvum* ookistlerinin sonikasyon ile inaktivasyonu üzerine yapılan çalışmada, yüksek sonikasyon şiddetlerinin, kavitasyon ile ilişkilendirilen fiziksel ve kimyasal etkileri kuvvetlendirdiği gözlenmiştir [21].

3.2.1.3. Sonikasyon Frekansı

Sonikasyon frekansı, kavitasyonun neden olduğu mekanik gerilimler üzerinde önemli bir role sahiptir. Yapılan çalışmalarda, düşük frekanslarda daha yüksek giderim verimleri sağlandığı görülmektedir.

Thacker (1973), 20 kHz ve 1 MHz frekanslarında maya hücrelerinin inaktivasyonunu incelemiştir ve 20 kHz frekansında daha yüksek inaktivasyon verimi gözlemiştir [23].

Hua ve Thompson (2000), sonikasyon frekansındaki değişimlerin dezenfeksiyon verimine etkisini *E. coli* bakterileri üzerinde test etmiştir. Çalışmada 205, 358, 618 ve 1017 kHz frekansları kullanılmıştır. Sonuçlara göre, en yüksek dezenfeksiyon verimine, 205 kHz frekansında ulaşılmıştır. Bu frekansta elde edilen inaktivasyon hız sabiti $0.078 \text{ dakika}^{-1}$ iken, 1017 kHz frekansında 0.03 dakika^{-1} kadardır. Ayrıca, hidrojen peroksit oluşumu için hız sabitleri, 205, 358, 618 ve 10171 kHz frekanslarında sırasıyla 3.7, 4.7, 2.2 ve $1.4 \mu\text{M/dakika}$ 'dır [11].

Nakanishi ve diğerleri (2001), *Cryptosporidium* ookistleri için 28, 45 ve 100 kHz frekanslarındaki inaktivasyon verimlerini incelemiştir. Sonuçlara göre en yüksek verim, 28 kHz frekansında sağlanmıştır. 28 kHz frekansında 10 dakikalık sonikasyon

uygulaması sonunda ookistlerin yüzde 10'u tamamen ortadan kaldırılmış, kalan ookistlerin yüzde 97'sinin ise hücre duvarlarının tahrip olduğu ve hücre içeriklerinin dışarı sızdığı gözlenmiştir. İnfektivite oranları, 28, 45 ve 100 kHz için sırasıyla yüzde 1, 40 ve 100 olarak bulunmuştur [21].

3.2.2. Mikroorganizma İnaktivasyonunda Sonikasyon Kullanımının Sağladığı Sinerjik Etkiler ile İlgili Önceki Çalışmalar

Burleson ve diğerleri (1975), üç virüs ve altı bakteri türünün inaktivasyonunda sonikasyon ve ozonasyon arasında sinerjik bir etki belirlemiştir. Mikroorganizmalar, PBS (sodyum fosfat ve sodyum klorür ile hazırlanan bir tür tampon çözeltisi) ve ikincil biyolojik arıtma çıkış suyu içerisinde askıda halde muhafaza edilmiştir. Deneylerde dört farklı dezenfeksiyon tekniği kullanılmıştır; sadece ozonasyon, aynı anda ozonasyon ve sonikasyon, sadece sonikasyon ve oksijenasyon sırasında sonikasyon. Sadece sonikasyon ve oksijenasyon sırasında sonikasyon işlemlerinde 10 dakikalık uygulama sonrası her iki ortamda da inaktivasyon sağlanamamıştır. 15 dakikalık ozonasyon ile aynı anda ozonasyon ve sonikasyon işlemleri sonrasında ise PBS içerisindeki tüm bakteri türleri tamamen inaktive olmuştur. Çıkış suyu içerisindeki bakteriler için de aynı işlemler ile inaktivasyon sağlanmış fakat daha uzun temas süreleri gerekmiştir. Sonikasyon işlemi tek başına inaktivasyon sağlayamazken ozonizasyon ve sonikasyonun aynı anda kullanımının yarattığı olumlu etki, sinerjik bir ilişkinin göstergesidir. Ultrases, bir yandan okside olabilir organik materyal miktarını azaltarak ozonun verimliliğini artırırken, diğer yandan bakteri kümelerini dağıtarak mikroorganizmaları ozona karşı daha hassas hale getirmektedir. Bu mekanizmalara ek olarak kavitasyon olayı da inaktivasyon verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Araştırmacılar, ozonun stabil olmaması nedeniyle ozonasyonun sonikasyonun ardından kullanımı yerine bu iki işlemin birarada kullanımının daha etkili olduğu önermesinde bulunmuşlardır [24].

Dahi (1976), *E. coli* inaktivasyonunda sonikasyon ve ozonasyon işlemleri arasındaki sinerjik etkiyi incelediği çalışmada benzer sonuçlara ulaşmıştır. Deneylerde, tek başına ozonasyon, aynı anda ozonasyon ile sonikasyon ve

ozonasyon sonrası sonikasyon olmak üzere üç ayrı işlem test edilmiştir. 20 kHz frekansında ve 160 W gücünde prob tipi bir ultrases sistemi kullanılmıştır. Sonuçlar, test edilen ortak temas sürelerinde en yüksek giderim veriminin, sonikasyon ve ardından ozonasyon ile sağlandığını göstermiştir. En az giderim verimi ise yalnızca ozonasyon kullanımında görülmüştür. Ultrasonik dalgalar, yarattığı kavitasyon etkisinin yanı sıra ozonun ayrışmasından kaynaklanan serbest radikallerin neden olduğu kimyasal oksidasyonu da dolaylı yoldan hızlandırmıştır. Sonuçlara göre, oksijen transfer hızı katsayısı (K_{La}), sonikasyon sonrası yüzde 15–45 oranında artmıştır. Bu durum, ozonun fazlar arası transferinin yoğunlaştığını göstermektedir [25].

Phull ve diğerleri (1997), yaptıkları çalışmada sonikasyon ve klorinasyon arasında sinerjik bir ilişki gözlemiştir. Çalışmada, NaCl çözeltisi ve ham nehir suyu içerisinde askıda halde bulunan *E. coli* bakterileri kullanılmıştır.

5 dakikalık uygulamalarda 1 mg/l klor ile yüzde 43 giderim sağlanırken, 38 kHz frekansında ve 0.6 W/cm^2 şiddetinde yürütülen sonikasyon işleminde giderim oranı, yüzde 19'da kalmıştır. Sonikasyonu takiben klorinasyon uygulamasında ise aynı süre sonunda yüzde 86 giderim sağlanmış, 20 dakika sonunda da giderim verimi, yüzde 100'e ulaşmıştır.

Bu testlerin ardından, sonikasyon frekansının ve şiddetinin, giderim verimine etkileri incelenmiştir. 20 kHz frekansında, 12 ve 21 W/cm^2 şiddetlerinde, 1 dakikalık sonikasyon sonrası 5 dakikalık klorinasyon uygulamaları sonucunda, 21 W/cm^2 şiddetinde sağlanan giderim verimi, yüzde 40 daha yüksek olmuştur. 1 dakikalık sonikasyon sonrası 5 dakikalık klorinasyon uygulamaları sonucunda, 800 kHz frekansında sağlanan giderim verimi, yüzde 80 olarak ölçülürken, 25 kHz frekansında yalnızca yüzde 25 verim sağlanmıştır.

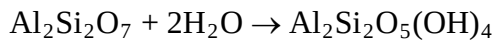
Araştırmacılar, sonikasyon işleminin kloru uzaklaştırıcı etkisi nedeniyle, klorinasyonun, sonikasyonun ardından yapılmasını önermişlerdir [22].

4. MATERİYAL VE METOD

4.1. Materyal

Deneylerde ultrasesin ve yumaklaştırıcı türlerinin etkilerinin gözlemlenebilmesi ve elde edilen sonuçların yorumlanabilmesi için, su kalitesi özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Deneylerde kullanılan ham su ve filtre çıkış suyu üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda bulanıklık NTU cinsinden, parçacık değişimi parçacık adedi/ml cinsinden online olarak, yük kaybı ise piyezometre boruları ile belirli zaman aralıklarında ölçülmüştür. Parametrelerin ölçüm metotları, teknik özellikleri aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

Çalışmada öncelikle sentetik su ile denemeler yapılmış, optimum ultrases şiddeti ile yumaklaştırıcı çeşidi ve dozajı belirlenmiştir. Burada bulunan optimum işletme parametreleri Ömerli Havzası'ndan temin edilen ham suya uygulanmıştır. Sentetik su hazırlanırken şebeke suyuna 10 mg/l KCl, 50 mg/l NaHCO₃, 15 mg/l MgCl₂·6H₂O ilave edilmiş ve bulanıklık oluşturabilmek için kaolin tercih edilmiştir [26–29]. 40 g/l'lik 1000 ml stok çözelti hazırlanarak kaolinin aşağıda verilen reaksiyon sonucu hidratasyonu için çözelti 24 saat bekletilmiş ve 3 m³'lük ham su tankına eklenmeden önce 300 rpm'de 1 saat karıştırılmıştır. Böylece yaklaşık 10 NTU bulanıklığında sentetik ham su elde edilmiştir. Bu ham suyun parçacık sayısı ise 2–5 µm boyutundaki parçacıklar için 3850–3900 ve > 5 µm için 1310–1340 olarak ölçülmüştür.



Ömerli Havzası'ndan alınan ham su karakteristikleri ise tablo 4.1'de verilmiştir. Bu özellikleri ile her iki su da direkt filtrasyonda kullanılabilecek karakteristiklere sahiptir. Bu çalışmada filtre malzemesi olarak da halen İSKİ'de kullanılan filtre kumu ile çalışılmıştır. Deney programı tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Deneylerde kullanılan ham suyun kimyasal analizi

Parametre	Ortalama	Aralık
pH	7.6	7.5–7.7 (25 °C)
İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	221	212–230 (25 °C)
Zeta potansiyeli (mV)	-21	(-19)–(-23)
Bulanıklık (NTU)	9.5	8.5–10.5
Fe (mg/l)	0.2	0.18–0.22
Mn (mg/l)	< 0.01	–
Sulfat (mg/l)	22	21–23
Klor (mg/l)	29	28.3–29.7
Alkalinite (mg/l CaCO_3)	59	58–60
Sertlik (mg/l CaCO_3)	97	93–101
Parçacık sayısı (adet/ml)	5949 (2–5 μm)	5895–6003
	1977 (> 5 μm)	1830–2124
TOK (mg/l)	5	4.7–5.3
TK(mg/l)	13	12.8–13.2
İK (mg/l)	8	7.9–8.1

Tablo 4.2. Deney programı

Giriş suyu	US uygulanmayan filtre			US uygulanan filtre		
	Deney No.	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	US (W/l)	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (mg/l)	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ (mg/l)
Sentetik ham su (kaolin)	D1	–	–	4.44	–	–
	D2	–	–	8.89	–	–
	D3	–	–	13.33	–	–
	D4	5	–	4.44	5	–
	D5	7.5	–	4.44	7.5	–
	D6	10	–	4.44	10	–
	D7	–	5	4.44	–	5
	D8	–	7.5	4.44	–	7.5
	D9	–	10	4.44	–	10
Ömerli ham suyu	D10	–	5	4.44	–	5
	D11	–	7.5	4.44	–	7.5
	D12	–	10	4.44	–	10
	D13	–	7.5	8.89	–	7.5
	D14	–	7.5	13.33	–	7.5

4.2. Deney Düzenegi

GYTE Çevre Mühendisliği Bölümü İçme Suyu Laboratuvarı'nda, filtreyi besleyen su hattı boyunca uygulanan farklı yumaklaştırıcı türlerinin, ultrases ile birlikte ve ultrases uygulanmadan kullanılması ile filtre çıkış suyu, yük kayıpları ve filtrasyon süresi üzerine etkilerinin araştırılması amacıyla iki eş filtre kolonu sistemi işletilmiştir. Filtrelerden birinde su filtreye girmeden önce ultrases probunun yer aldığı tanka girmekte ve ardından kimyasal dozlaması da yapıldıktan sonra filtreye girmektedir.

Ham su, 3 m³'lük hacme sahip polietilenden yapılmış 150 cm çapında ve 180 cm yüksekliğindeki dairesel su haznesinde depolanmıştır. Su haznesindeki ham suyun bulanıklığını sabit tutmak amacıyla dairesel su haznesine yerleştirilen bir karıştırıcı vasıtasıyla deney boyunca ham su karıştırılmıştır. Haznede karıştırılan ham su dairesel su haznesinin alt kısmındaki çıkış vanasına bağlı bir pompa yardımıyla zeminden 385 cm yükseklikte bulunan dengeleme tankına, Elettro Meccanica Conforto marka pompayla manometre yüksekliğine iletme özelliğine sahip) iletmektedir. Dengeleme tankına iletilen ham su, buradan cazibeli akış ile kum filtresi kolonlarına (10 cm iç çapında ve 200 cm yüksekliğinde) iletilmektedir.

Dengeleme tankından filtre kollarına gelen su, filtre girişinde bulunan şiber vana ve debimetre (Siemens Sitrans F M Magflo Magna 5000) yardımıyla 90 l/saat (filtrasyon hızı yaklaşık 10 m/saat) olarak ayarlanmıştır. Tablo 4.3'te debimetrenin teknik özellikleri verilmiştir.

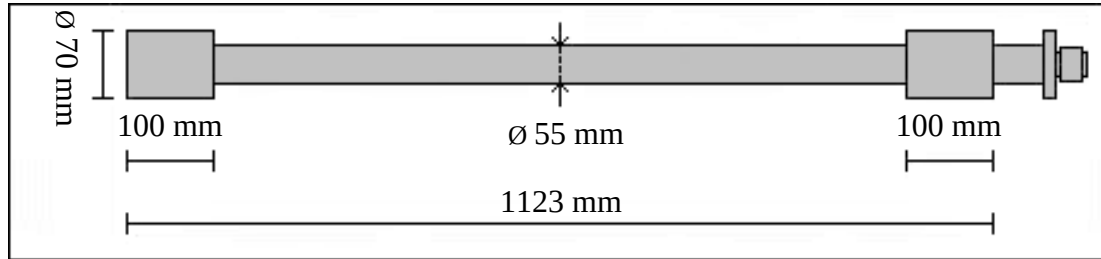
Ultrases uygulanan filtrede, ham su, filtreye girmeden önce ultrases tankından geçmektedir. Silindirik ultrases tankının çapı 20 cm, boyu 143 cm'dir. 90 l/saat'lik debiyle ultrases tankına giren ham su için temas süresi yaklaşık 30 dakikadır. Ultrases probunun teknik özellikleri tablo 4.4'te, boyutlarını içeren şematik gösterimi ise şekil 4.1'de verilmiştir.

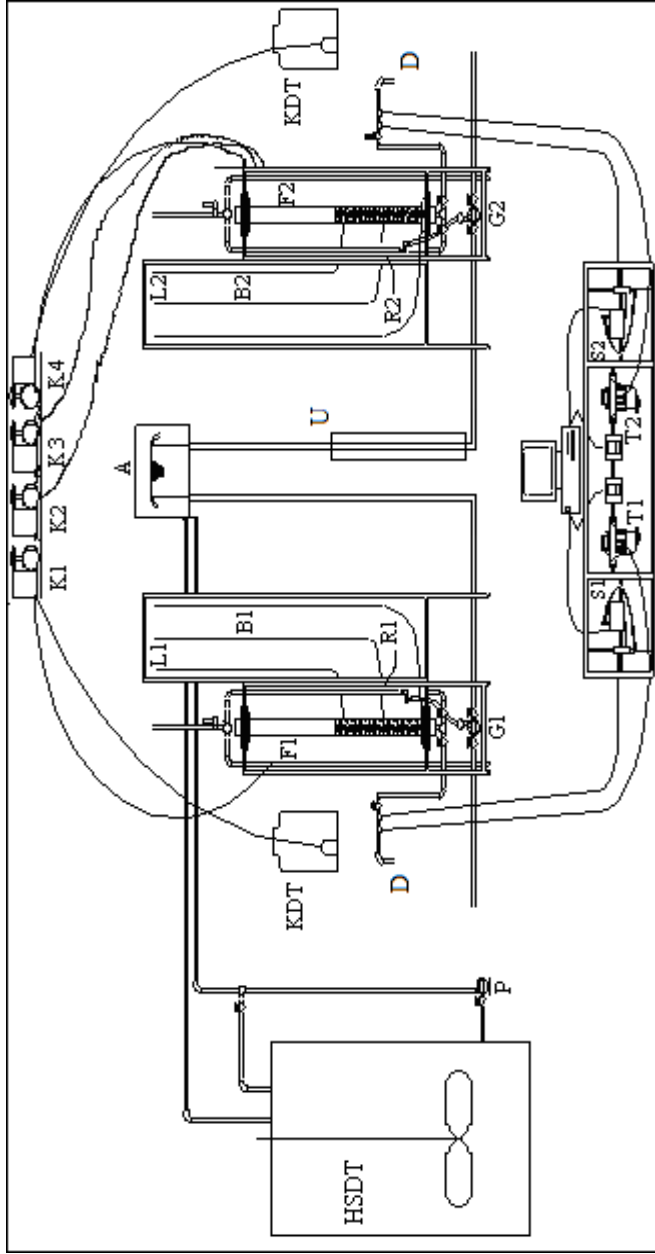
Tablo 4.3. Siemens Sitrans FM Magflo Magna 5000 Debimetre teknik özellikleri

Güç kaynağı	115/230 V AC, 50–60 Hz 17 VA
Nominal çap	15 mm
Borulama	PTFE
Elektrotlar	AISI 316 Ti
Basınç _{max}	40 bar / 580 psi
Basınç _{min}	0.3 bar / 4.35 psi
Sıcaklık _{max}	100 °C / 212 °F
Sıcaklık _{min}	-20 °C / -4 °F
Voltaj / Amper	60 V max / 0.12 A max

Tablo 4.4. Ultrases probunun teknik özellikleri

Maksimum güç	2000 W
Frekans	27 kHz
Voltaj	AC 220 V
Materyal	316 Paslanmaz çelik
Toplam uzunluk	1123 mm
Çap	55 mm
Prob ucu uzunluğu	100 mm
Prob ucu çapı	70 mm

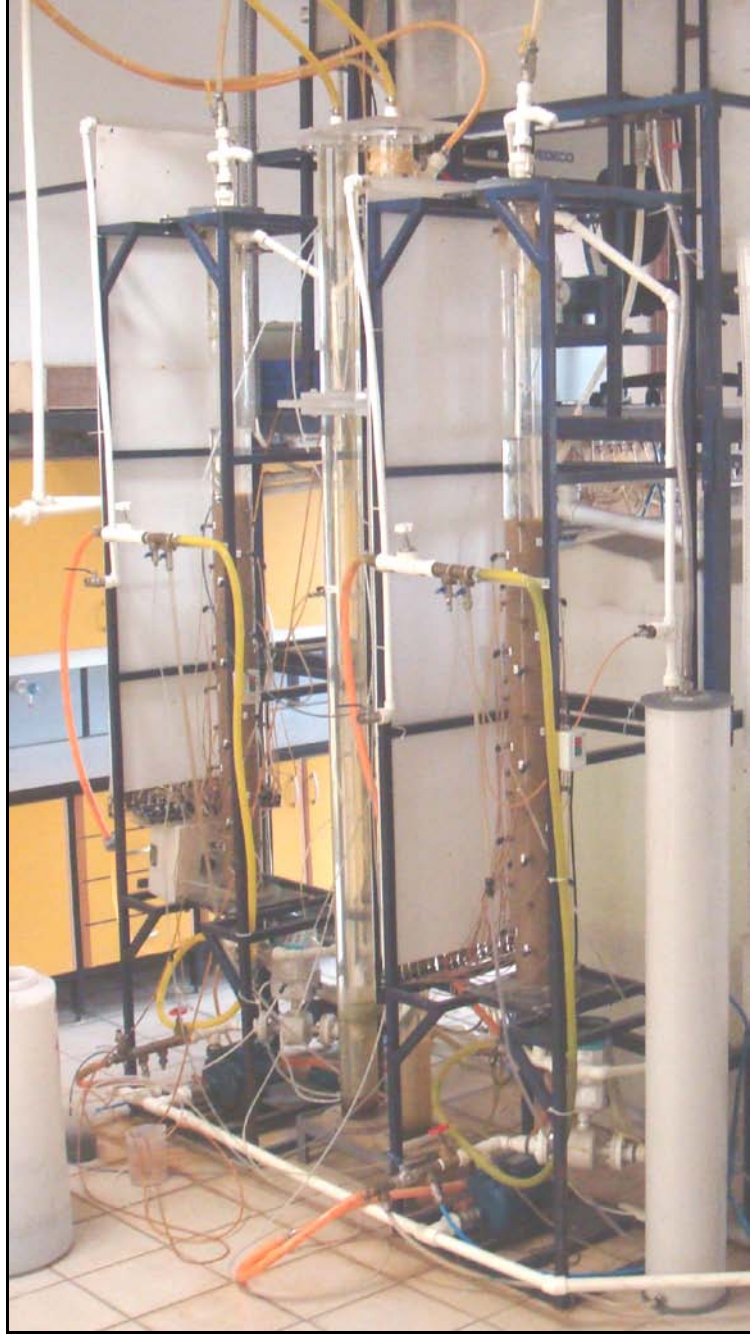
**Şekil 4.1.** Ultrases probunun şematik gösterimi



Şekil 4.2. Laboratuvarda çalışılan pilot tesis deney düzeniği

A: Sabit seviye tankı, **B1, B2:** Piyezometre boruları panosu, **D:** Drenaj, **E1, E2:** Kimyasal tankları, **F1, F2:** Filtre tankları, **G1, G2:** Geri yıkama pompaları, **K1, K2, K3, K4:** Yumaklaştırmacı pompaları, **R1, R2:** Flowmetreler, **L1, L2:** Piyezometre boruları, **S1, S2:** Parçacık sayıcılar, **T1, T2:** Türbidimetreler, **HSDT:** Ham su depolama tankı, **KDT:** Kimyasal depolama tankı, **U:** Ultrases uygulama tankı

Filtre kolonları atmosfere açıktır. Filtrelerde geri yıkama sonucu oluşan genleşmenin ortalama 15 cm olduğu görülmüş, her deney öncesi filtreler 105 cm kum yatağı olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Kimyasal ilâvesi ise, filtre kolonuna gelen su hattı üzerinde oluşturulan dozlama noktasından farklı konsantrasyonlarda, aynı debilerde sıvı çözelti olarak uygulanmıştır. Bu işlem selenoid pompa ile (Prominent Gamma) yapılmaktadır. Filtre edilen suda sürekli (online) olarak bulanıklık ve parçacık sayısı ölçümü yapılmıştır (şekil 4.12). Ölçümlerde sırasıyla Hach–Lange Ultraturb Plus SC türbidimetre ve WPC–22 parçacık sayacı (şekil 4.10–4.11) kullanılmıştır. Yük kayıpları, 60 dakikada bir filtre yatağı üzerinde her 4 cm’de bir bulunan piyozemetre ölçüm noktalarından ölçülmüştür. Aşağıda pilot tesisin genel görünüşü ve düzenekte kullanılan cihazlar görülmektedir.



Şekil 4.3. Pilot tesisin genel görünümü



Şekil 4.4. Pilot tesis kontrol paneli



Şekil 4.5. Debimetre



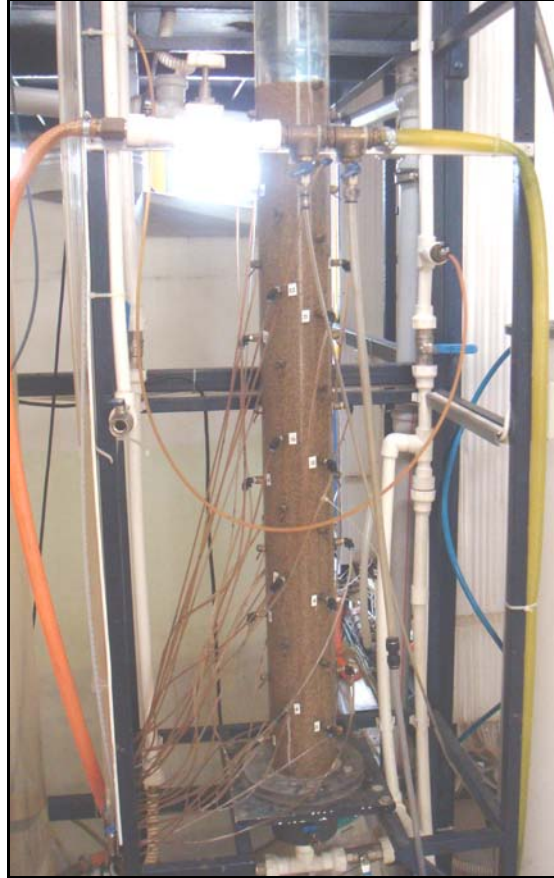
Şekil 4.6. Ultrases jeneratörü



Şekil 4.7. Ultrases uygulama tankı ve probu



Şekil 4.8. Dozaj pompaları



Şekil 4.9. Kum filtresi ve piyezometre boruları



Şekil 4.10. Türbidit metre



Şekil 4.11. Parçacık sayacı



Şekil 4.12. Bulanıklık ve parçacık sayısı değişimlerinin sürekli olarak izlendiği gösterge cihazı

4.3. Analitik Metod

4.3.1. Filtre Malzemesi Elek Analizi (Granülometri)

Bilindiği gibi mineral kökenli, daneli malzemeye agrega denilmektedir. Kum, çakıl ve mıcır gibi malzemeler doğal agregalardır. Elek analizi, diğer bir deyişle granülometri, bir agrega yığınının dane büyüklüklerine göre dizilişini saptamak amacıyla yapılır. Deney sonunda agrega yığınının hangi oranda belirli bir elek çapının altına geçebileceği saptanır. Elek analizi, kumlarda en az 1 kg, iri agregalarda en az 3 kg numune üzerinde yapılır. Bu az miktardaki numunenin büyük agrega yığınlarını temsil etmesi, üzerinde durulması gereken bir problemdir. Bu bakımdan elek analizi deneyinde örnek almaya çok dikkat edilmelidir. Filtre malzemesi olarak kullanılan kum, İSKİ Kağıthane Su Arıtma Tesisleri'nden temin edilen silisli kumdur.

Elek analizi deneyi için alınacak örnek agrega yığınının tepesinden ve eteğinden alınmamış, orta yükseklikten bir boru ile sondalanarak alınmıştır. Yığının muhtelif yerlerinden toplanan 8 adet numune karıştırılmış, eşit yükseklikte bir daire şeklinde zemine serilmiştir. Daha sonra daire şeklindeki numune yaklaşık 4 eşit dilime ayrılmış ve dilimlerden karşılıklı ikisi alınmıştır. Geriye kalan kum yığını tekrar dairesel olarak yayılmış ve bu dörtleme işlemine numune miktarı 1 kg oluncaya kadar devam edilmiştir (şekil 4.13).



(a) Standart elekler



(b) Elek analizi öncesinde filtre malzemesinden çeyreklere bölme metodu ile homojen temsil edici numune alınması

Şekil 4.13. Elek analizinde kullanılacak kumdan çeyreklere bölme metodu ile temsil edici numune alınması.

Alınan 1 kg'lık numune sırasıyla 1.4 mm, 1.18 mm, 1 mm, 0.85 mm ve 0.71 mm delik çaplı eleklerden elenmiş ve elek üstünde kalan malzeme yığışımlı olarak hassas bir tartıda tartılmıştır. İSKİ Kağıthane Su Arıtma Tesisleri'nden temin edilen 1000 g numune üzerinde yapılan elek analizi deneyinin sonuçları tablo 4.5'te verilmiştir. Deneyden elde edilen sonuçlar, elekten geçen malzeme miktarı x ekseninde, elek çapları ise y ekseninde olacak şekilde düzenlenerek bir grafik halinde şekil 4.14'te gösterilmiştir.

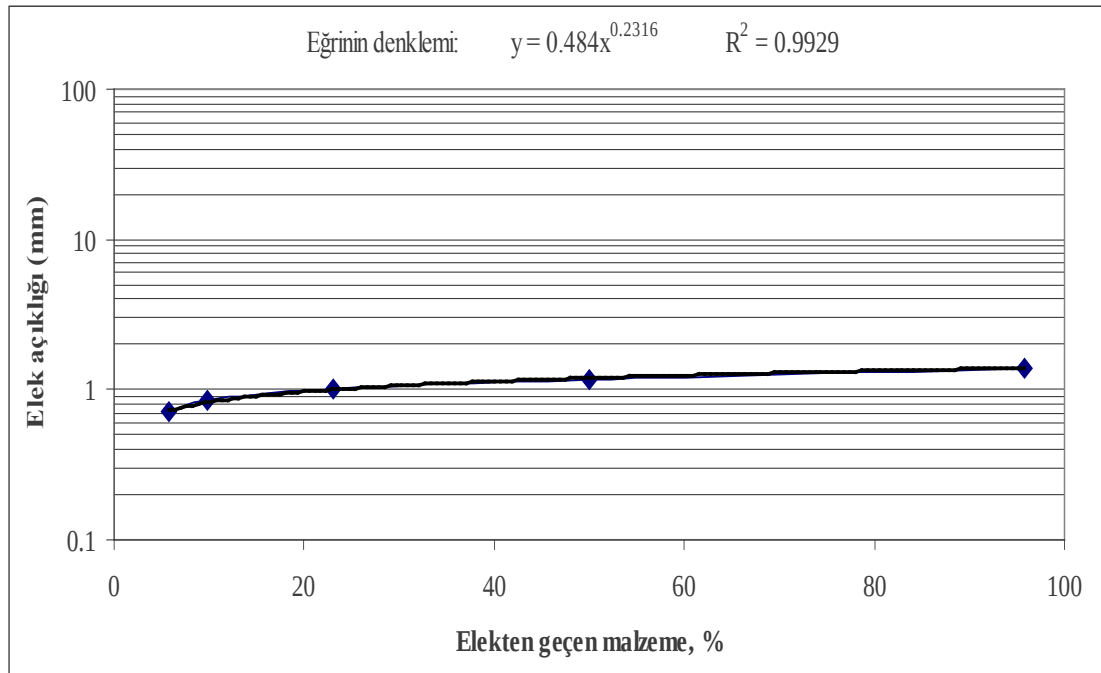
Tablo 4.5. Elek analizi deney sonuçları

Elek delik çapı (mm)	Elek üstünde kalan yığışımli malzeme miktarı (gram)	Elek altına geçen yığışımli malzeme miktarı (gram)	Elek altına geçen yığışımli malzeme (%)
1,4	42	958	95,8
1,18	458	500	50
1	269	231	23,1
0,85	133	103	10,3
0,71	40	63	5,8

Örnek olarak, 1.18 mm elek göz boyutu için;

Elek altına geçen yığışımli malzeme: 500 gram

% cinsinden elek altına geçen yığışımli malzeme: $\frac{500}{1000} * 100 = 50$

**Şekil 4.14.** Elek analizi sonuçlarının grafik şeklinde gösterimi

Silisli kumun üniformluk katsayısı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$d = d_{60} / d_{10} \quad (4.1)$$

d : üniformluk katsayısını

d_{60} : ağırlıkça malzemenin % 60'ının geçtiği elek delik çapını (mm)

d_{10} : ağırlıkça malzemenin % 10'unun geçtiği elek delik çapını (mm)

Şekil 4.14'te verilen grafik kullanılarak, $d_{60} = 1.25$ mm, $d_{10} = 0.83$ mm olarak bulunmuştur. Buna göre üniformluk katsayısı (4.1) denklemi yardımıyla;

$$d = (1.25 / 0.83) \cong 1.5$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değer, derin yataklı filtrelerde üniformluk katsayısının alt ve üst limit değerleri arasında olup ($d_{\min} = 1.2 < 1.5 < d_{\max} = 1.6$), gerekli kriterleri sağlamaktadır [30].

5. BULGULAR

İçme suyu arıtma tesislerinde kullanılan filtrasyon ünitesinin, en verimli ve en uzun süre tıkanmadan çalıştırmak amacıyla bu güne kadar birçok çalışma yapılmıştır [31, 32].

Bu çalışmalardaki temel amaç, filtre çalışma ömrünün uzatılması ve filtrasyon süresi boyunca istenilen çıkış suyu standartlarını yakalayıp, bu standardı filtrasyon süresi boyunca sabit tutmaktır. Yapılan filtrasyon çalışmalarında yumaklaştırıcı olarak yaygın bir şekilde demir ve alum ile bunların türevleri kullanıldığı görülmektedir [33, 34].

5.1. Sentetik Ham Su ile Yapılan Deneyler

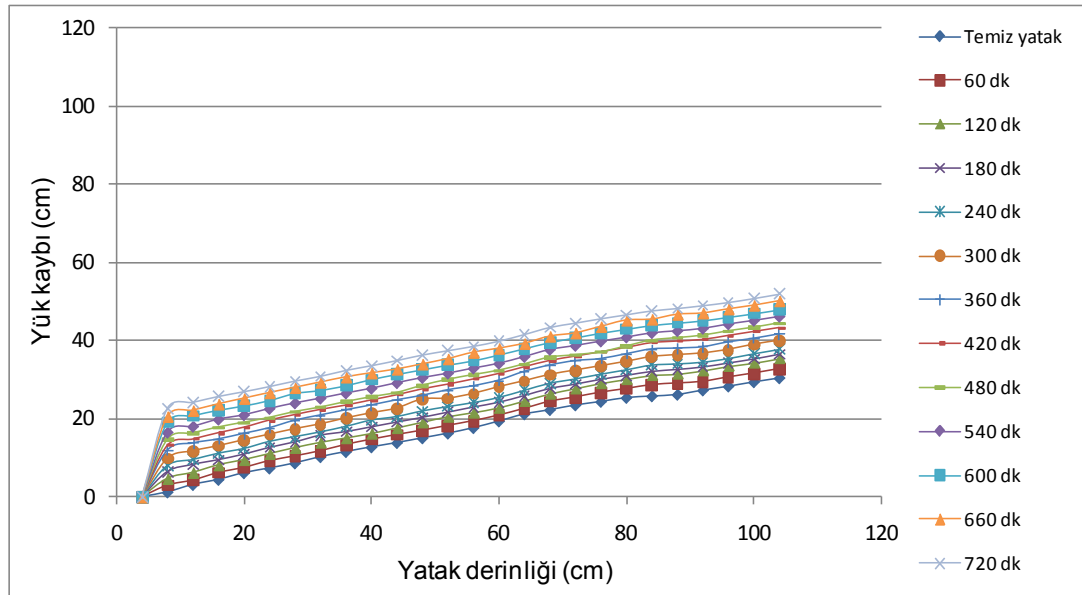
Çalışmanın ilk iki aşamasında yapılan deneylerde, kaolin çözeltisi ile hazırlanan sentetik ham su kullanılmıştır. Bu deneylerde ultrases şiddeti ile yumaklaştırıcı tipi ve dozajının filtre verimine etkileri incelenmiştir. Elde edilen optimum işletme parametreleri, çalışmanın son aşamasında, Ömerli Havzası'ndan temin edilen ham su ile yapılan deneylerde uygulanmıştır.

5.1.1. Filtre Verimine Ultrases Şiddetinin Etkisi

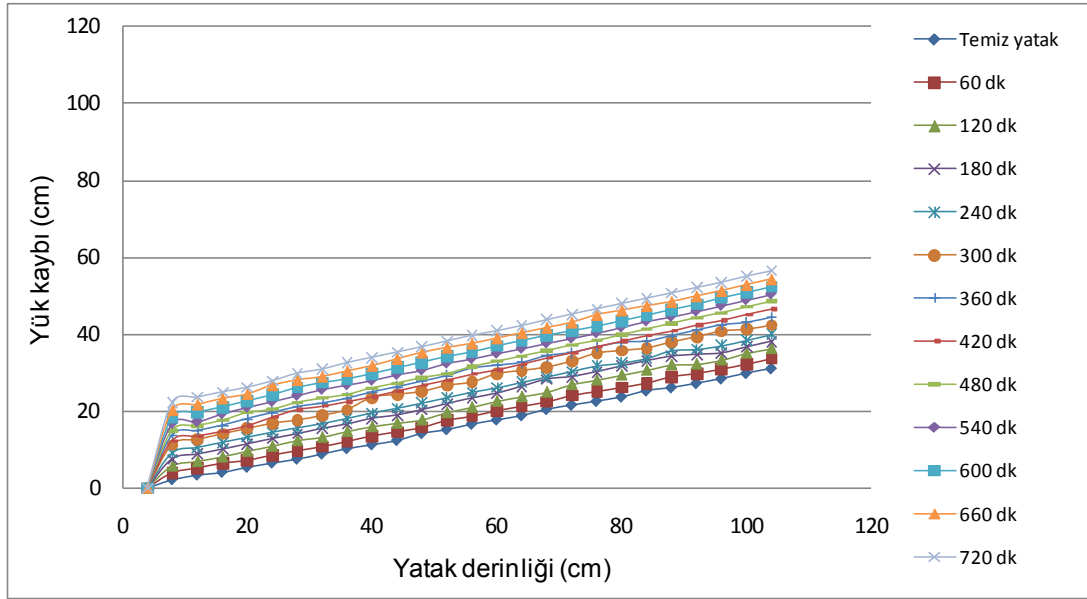
İlk aşamasında, ham suya kimyasal eklemeyen önce US uygulanarak çıkış suyu bulanıklığı ve parçacık sayısına etkileri araştırılmıştır. US dalgaları su içerisinde hareket ederken sıvı içerisinde basınç değişimleri sonucu baloncuk oluşumu, gelişimi ve patlaması olarak tanımlanan kavitasyonu meydana getirirler [10]. Ultrasonik kavitasyon sonucunda oluşan hidroksil ($\text{OH}^\cdot$) ve hidrojen ($\text{H}^\cdot$) radikallerinin neden olduğu kimyasal reaksiyonlar yanında karıştırma, partiküllerin parçalanması, katı yüzey alanının artması ve kütle transferinin artması gibi mekanik etkiler de görülür [14, 15]. Kavitasyonun gerçekleşmesi için ise spesifik bir ses şiddeti eşik değerine ulaşmak gereklidir. Bu eşik değeri aşıldıktan sonra US şiddetinin artmasıyla

kavitasyon da artar [35]. US'nin yoğun bir şiddette uygulanmasının ise mikroorganizma hücre yapısına zarar vererek koagülasyon sırasında yumaklaşmayı olumsuz etkileyebileceği bulunmuştur [36, 37]. Bu yüzden sistem verimi ve enerji tüketimi de dikkate alınarak optimum bir US şiddeti seçilmelidir. Bu amaçla sentetik su ile yapılan deneylerin ilk aşamasında, giriş suyuna, 200, 400 ve 600 W (sırasıyla 4.44, 8.89 ve 13.33 W/l) olmak üzere üç farklı şiddette ultrases uygulanan ve uygulanmayan filtreler karşılaştırılmıştır. Buradan optimum ultrases şiddeti (W/l) tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 4.44 W/l US şiddeti ile yapılan çalışmada, standartlara yaklaşamamış olsa da ultrases uygulanan filtrenin çıkış suyunda, en düşük bulanıklık ve en yüksek parçacık giderim verimi değerlerine ulaşılmıştır.

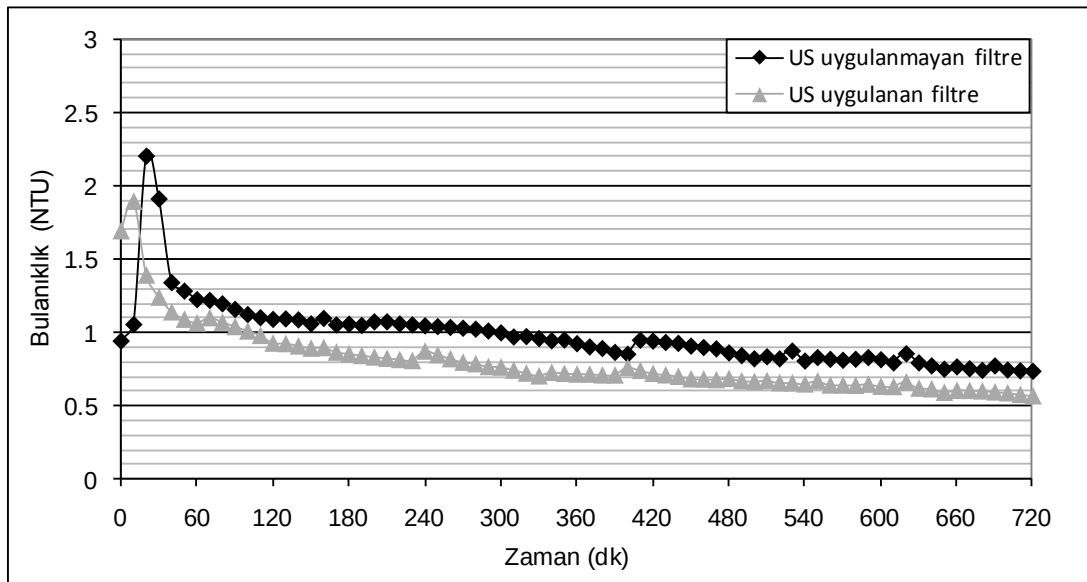
Her üç filtre de, tıkanmamalarına rağmen, su tankının boşalması nedeniyle 720 dakika sonunda durdurulmuştur. 4.44 W/l deneyine ait yük kaybı eğrileri şekil 5.1 ve 5.2'de sunulmuştur. Filtreler arasında yük kaybı artışı bakımından belirgin bir fark görülmemektedir. Bu deneye ait bulanıklık ve parçacık sayısı verileri, sırasıyla şekil 5.3 ve şekil 5.4–5.5'te gösterilmiştir.



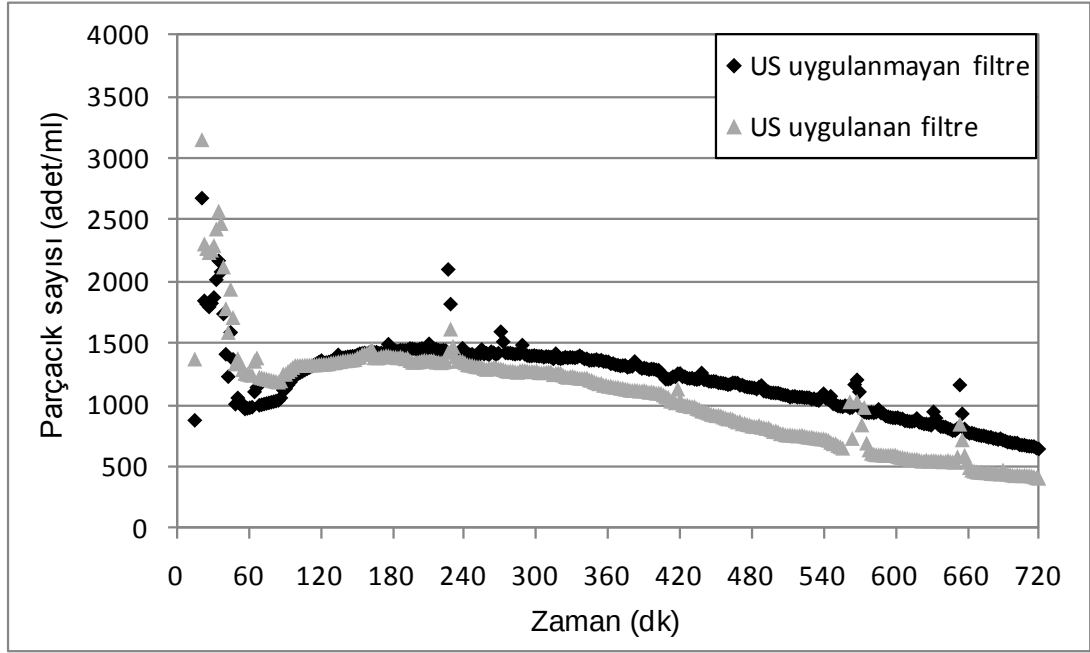
Şekil 5.1. 4.44 W/l US uygulanmayan filtrede oluşan yük kaybı



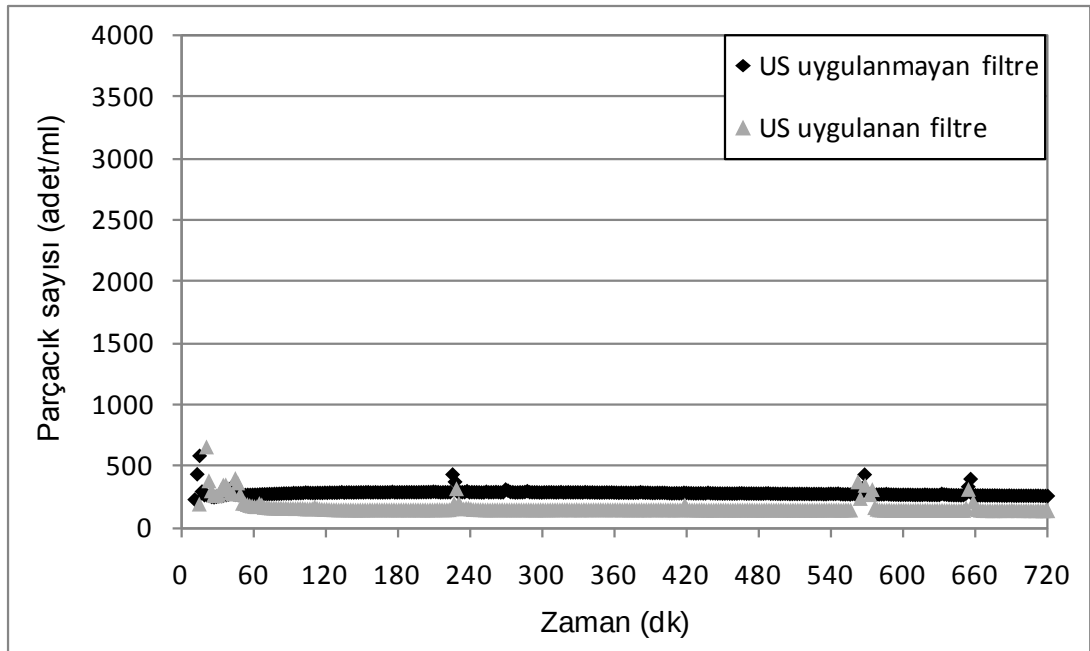
Şekil 5.2. 4.44 W/l US uygulanan filtrede oluşan yük kaybı



Şekil 5.3. 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



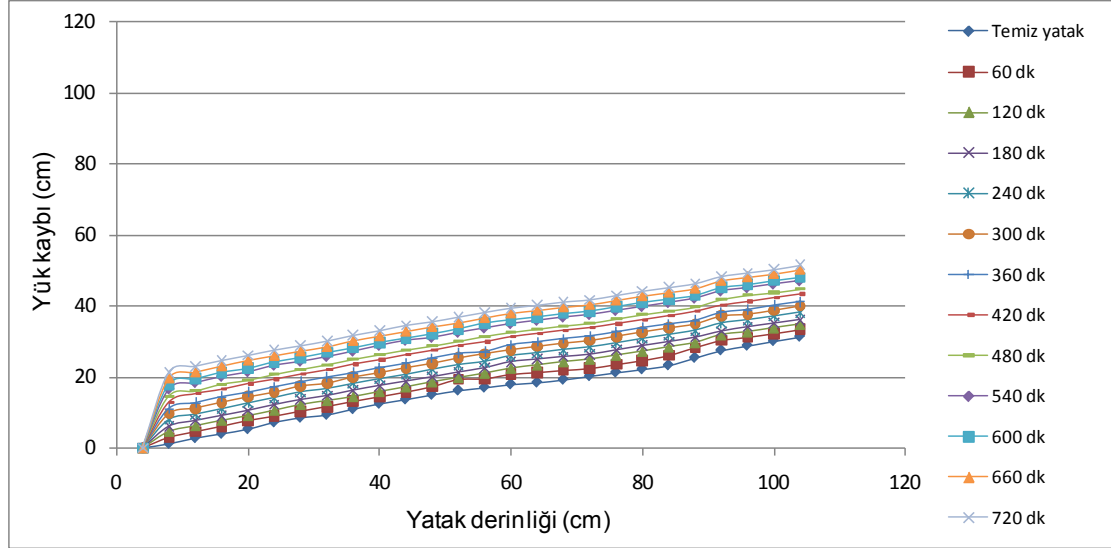
Şekil 5.4. 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi



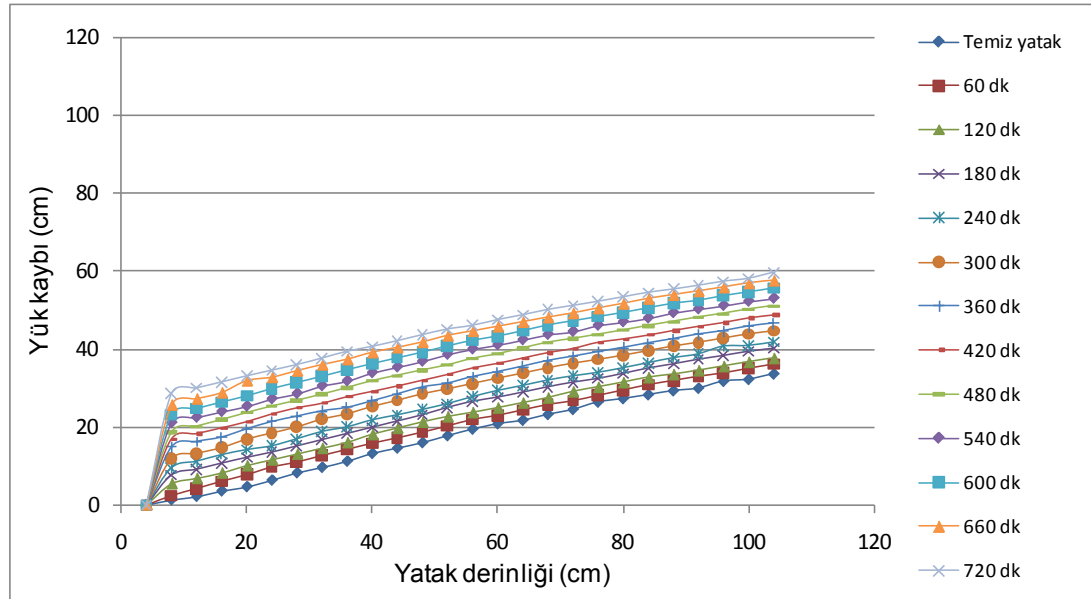
Şekil 5.5. 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi

Ultrases şiddetinin 4.44 W/l'den 8.89 W/l ve 13.33 W/l'ye çıkarılmasıyla çıkış suyu kalitesi ve filtre ömründe herhangi bir iyileşme görülmemiştir (şekil 5.6–5.15). Çıkış suyu bulanıklığı ve parçacık sayısında elde edilen maksimum giderme verimleri bölüm sonunda yer alan tablo 5.1'de verilmiştir. Gücün artırılmasıyla

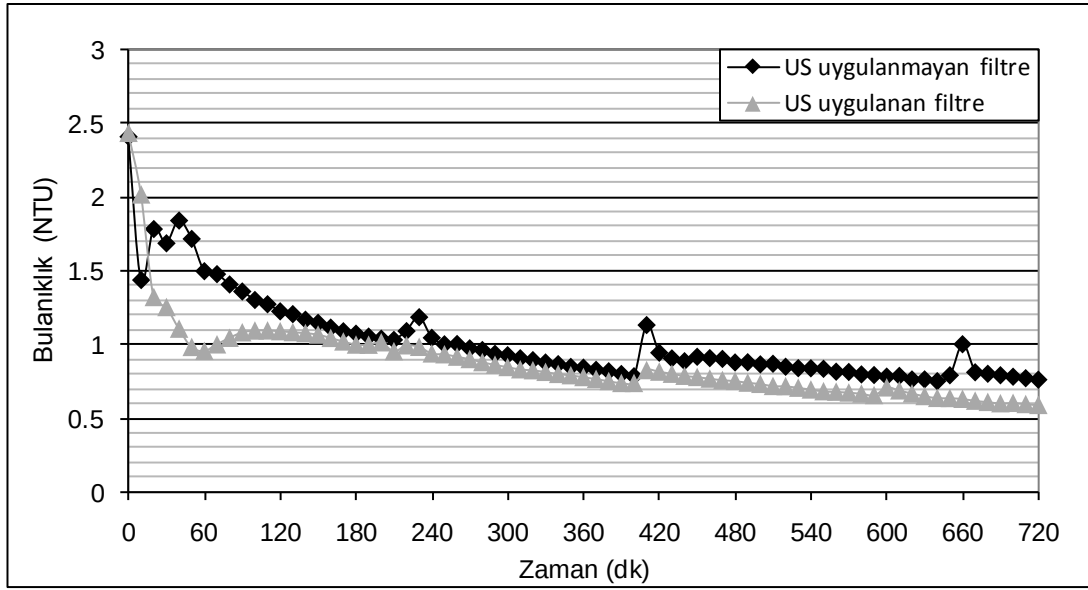
elektrik sarfıyatı ve dolayısıyla işletme maliyeti artacağından sonraki deneyler için 4.44 W/l ultrases şiddeti optimum olarak seçilmiştir.



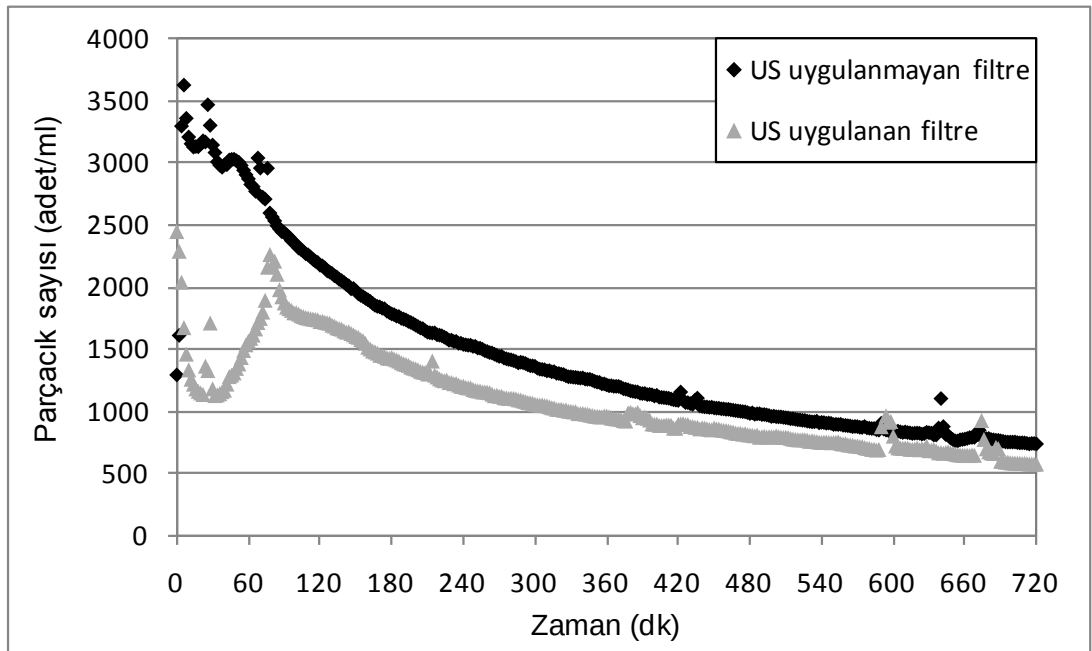
Şekil 5.6. 8.89 W/l US uygulanmayan filtrede oluşan yük kaybı



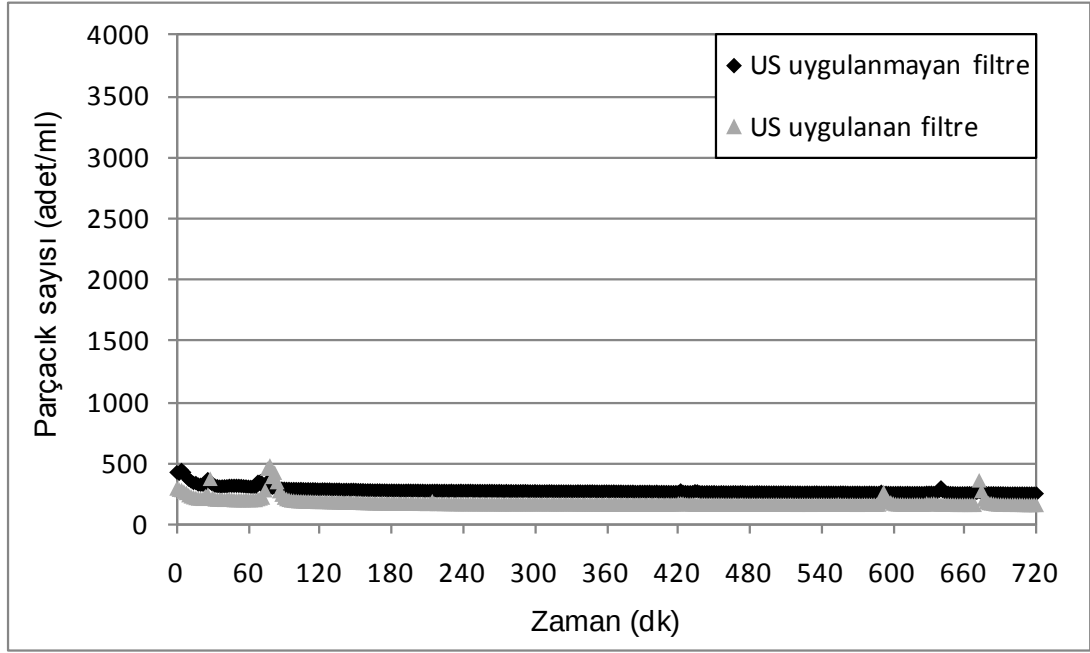
Şekil 5.7. 8.89 W/l US uygulanan filtrede oluşan yük kaybı



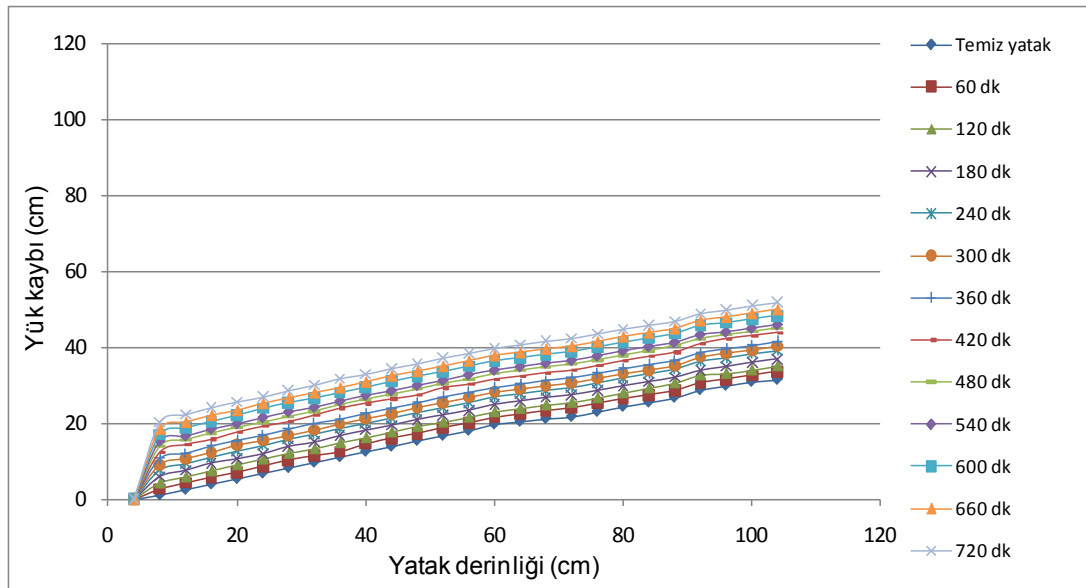
Şekil 5.8. 8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



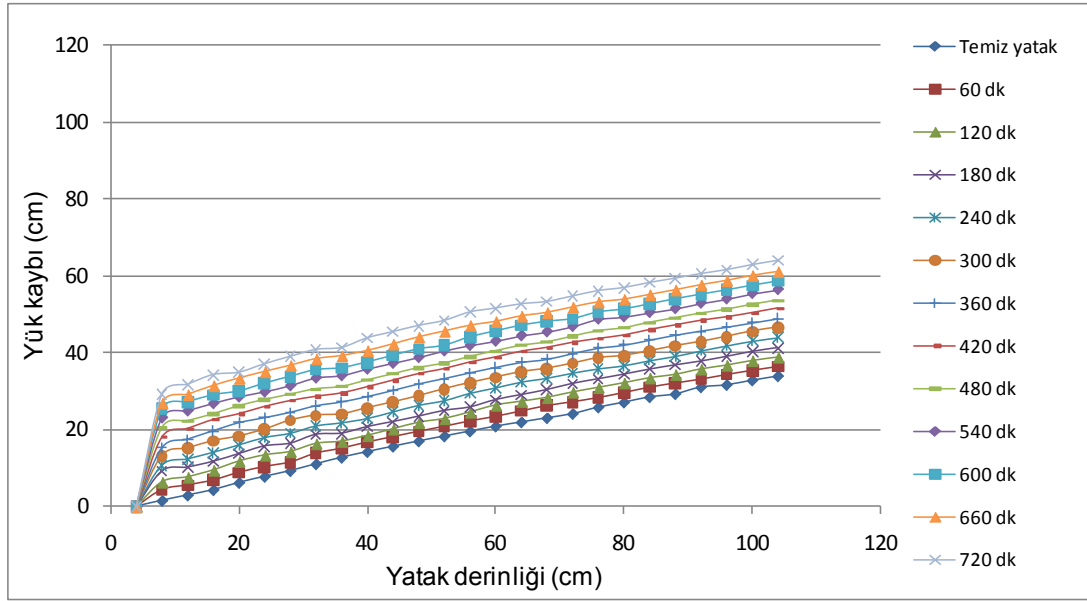
Şekil 5.9. 8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2-5 µm arası parçacık sayısı değişimi



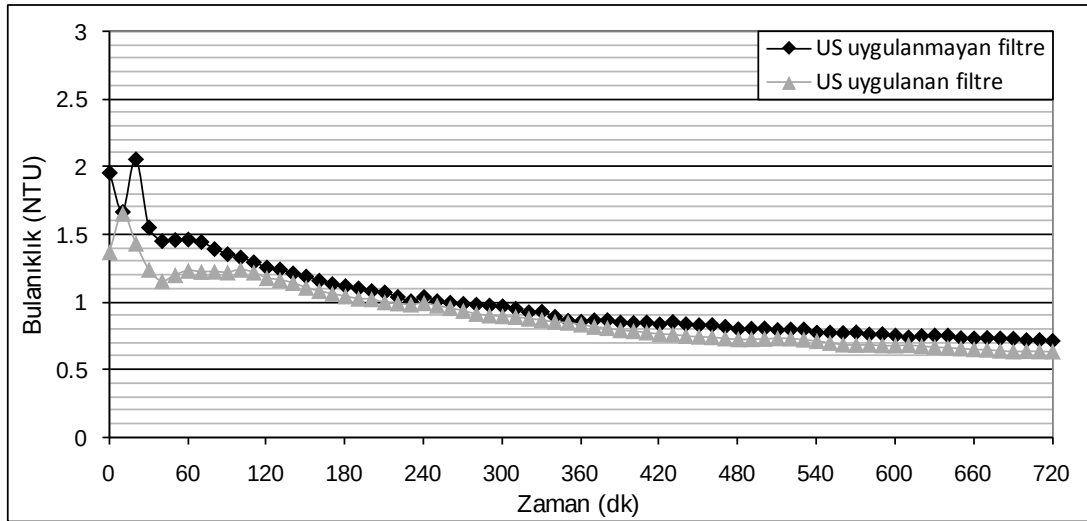
Şekil 5.10. 8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi



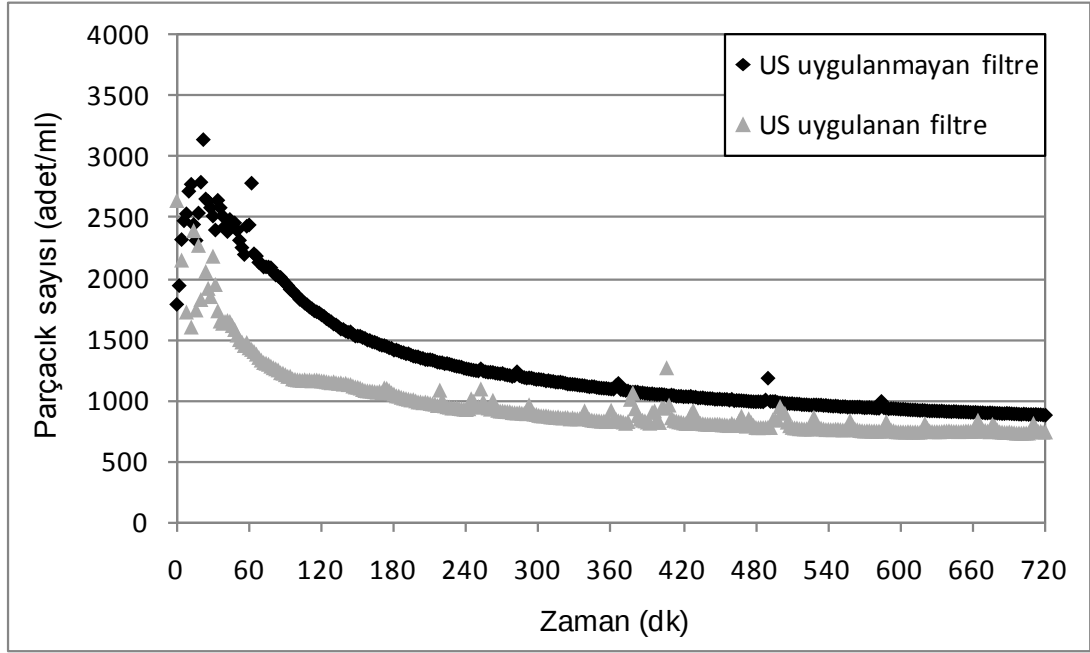
Şekil 5.11. 13.33 W/l US uygulanmayan filtrede oluşan yük kaybı



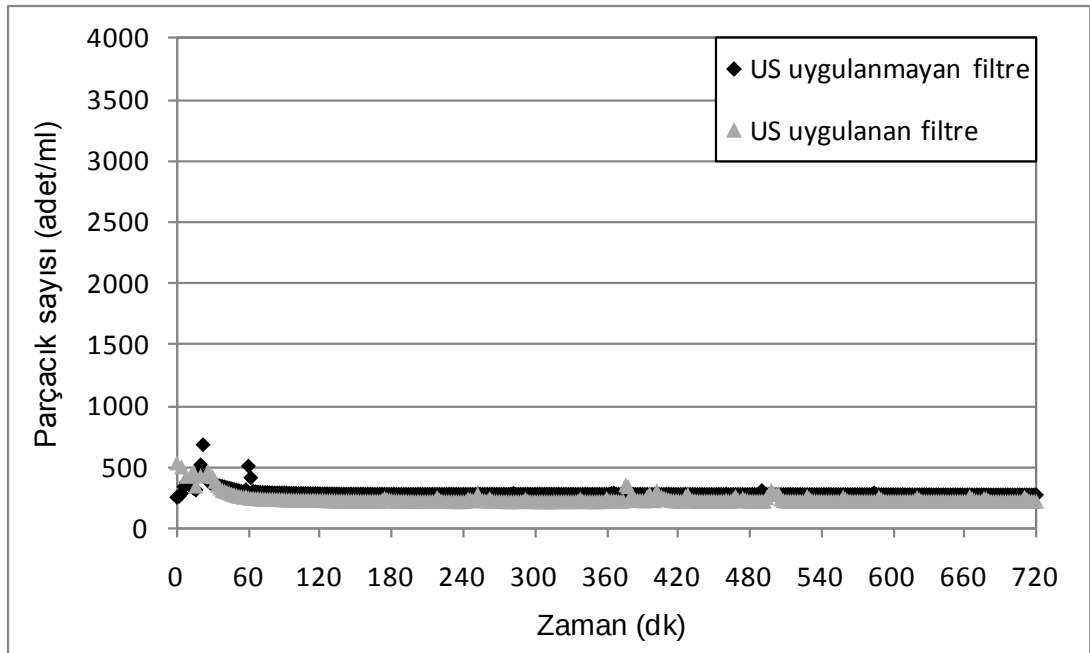
Şekil 5.12. 13.33 W/l US uygulanan filtrede oluşan yük kaybı



Şekil 5.13. 13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



Şekil 5.14. 13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2-5 µm arası parçacık sayısı değişimi

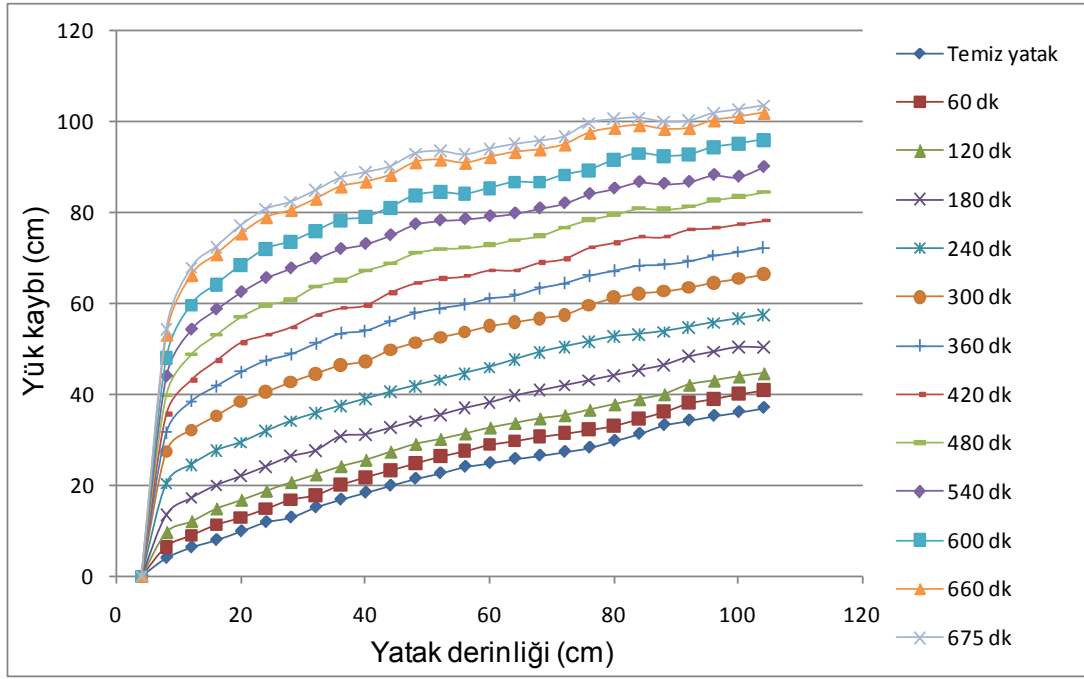


Şekil 5.15. 13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi

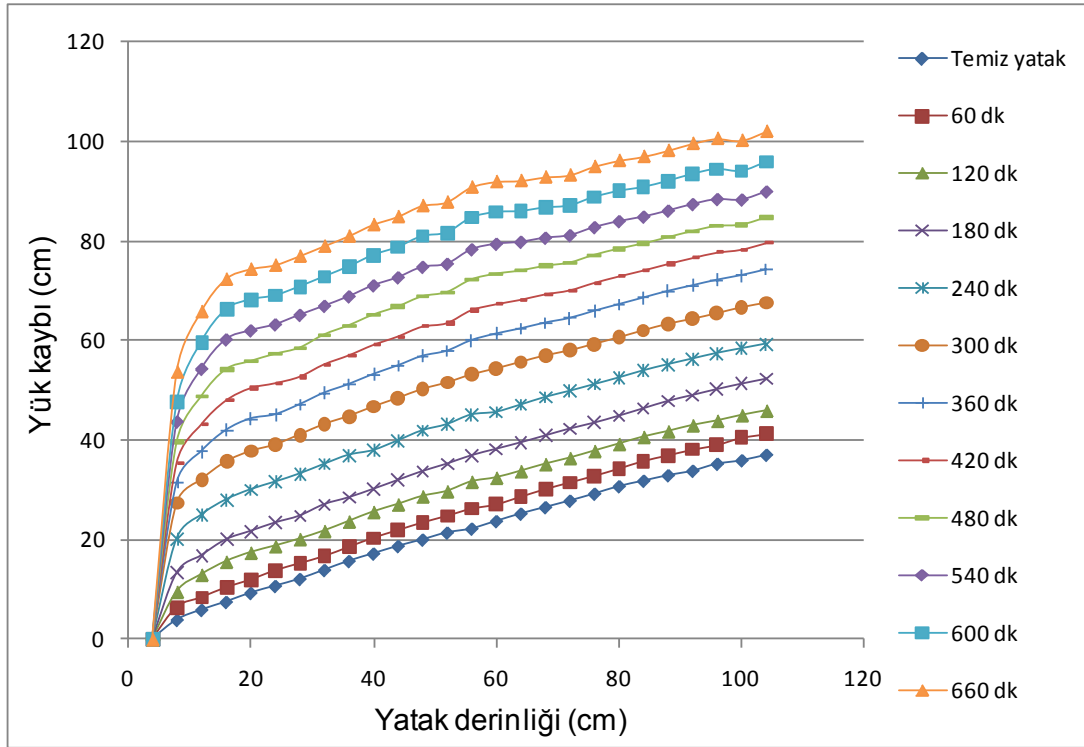
5.1.2. Yumaklaştırıcı Tipi ve Dozajının Ultrases ve Filtre Verimine Etkisi

Optimum ultrases şiddetinin tespitinin ardından, sentetik ham su için uygun yumaklaştırıcı türü ve dozajının belirlenmesi için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. US'nin yumaklaşmaya yardımcı olduğu bilinmesine rağmen yumaklaşma prosesinin büyük çoğunluğu yumaklaştırıcılar tarafından gerçekleştirilmektedir [35]. Bu nedenle yumaklaşma veriminin yüksek olması için yumaklaştırıcı dozajı doğru olarak ayarlanmalıdır.

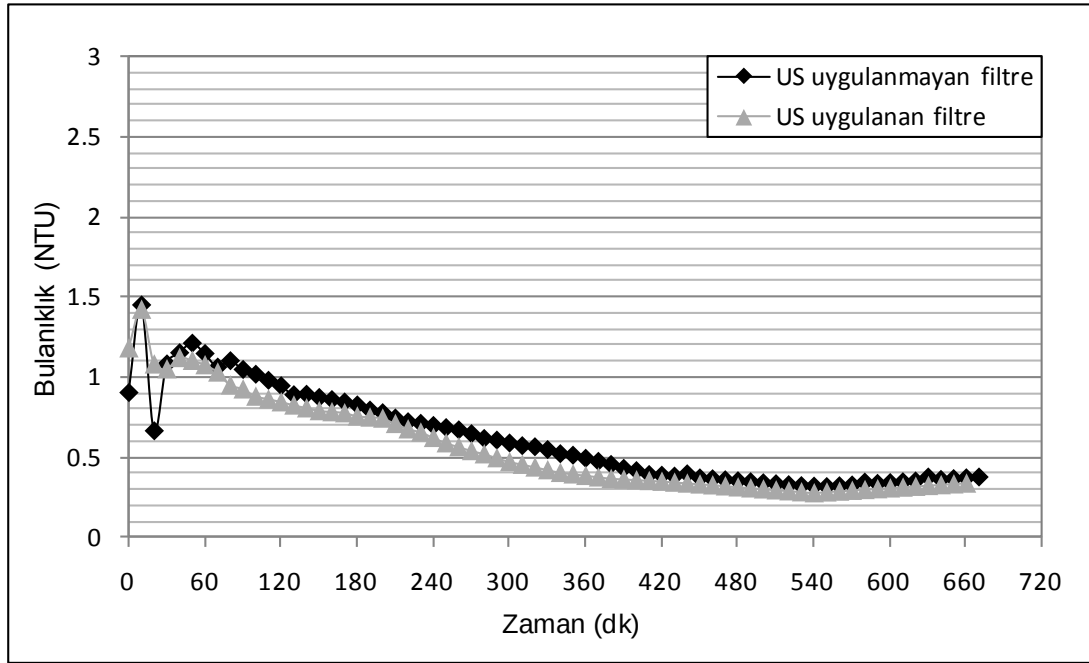
Bu aşamadaki ilk üç deneyde, giriş suyunda sırasıyla 5, 7.5 ve 10 mg/l konsantrasyonları sağlanacak şekilde FeCl_3 dozlamaları yapılmıştır. Önceki deneylerde olduğu gibi filtrelerin birisinde US uygulanırken (yumaklaştırıcıya ek olarak) diğerinde uygulanmamıştır. Bulanıklık ve parçacık giderimlerinde beklendiği üzere bir miktar iyileşme sağlanmıştır. Çıkış suyunda en düşük bulanıklık ve parçacık sayısı değerlerine 7.5 mg/l ile ulaşılmış (şekil 5.23 ve şekil 5.24–5.25) ve filtre ömrü 5 mg/l deneyine göre yaklaşık olarak yüzde 10 daha kısa olmuştur (şekil 5.21–5.22). Filtre ömrü doz artışıyla birlikte azalırken, 7.5 mg/l'den 10 mg/l'ye çıkıldığında filtre ömründe çok keskin bir düşüş yaşanmıştır (şekil 5.26–5.27). 7.5 mg/l FeCl_3 için ultrases uygulanan filtrenin çıkış suyunda bulanıklık değeri 0.19 NTU, parçacık giderim verimleri ise 2–5 μm aralığındaki ve 5 μm 'den büyük parçacıklar için sırasıyla yüzde 95.26 ve 99 olarak bulunmuştur.



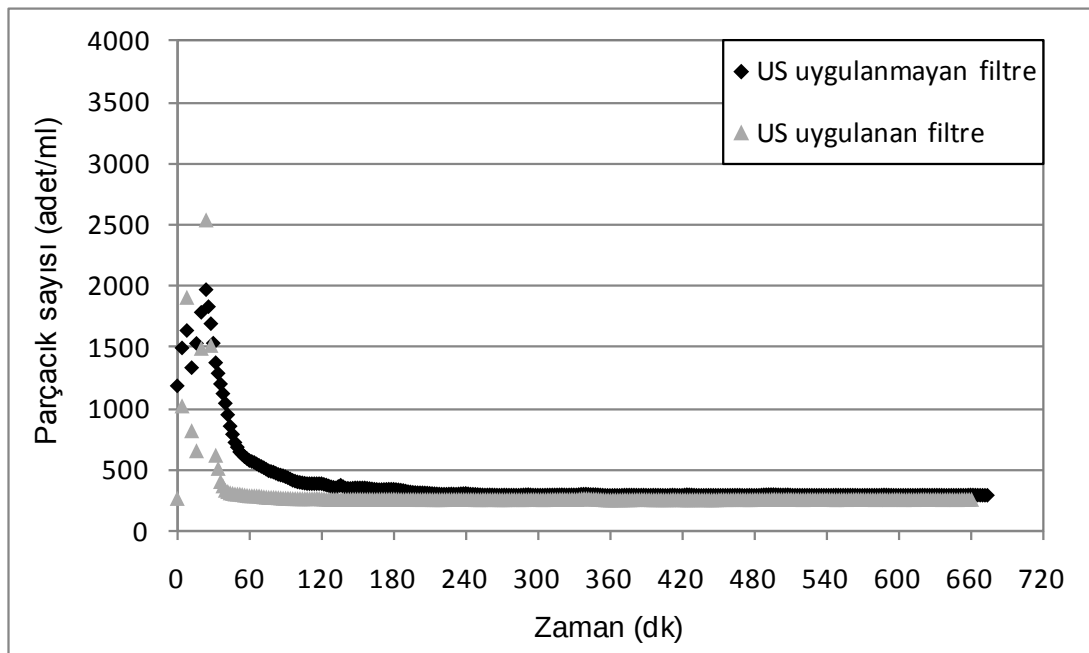
Şekil 5.16. 4.44 W/l US uygulanmadan 5 mg/l FeCl_3 ilavesiyle oluşan yük kaybı



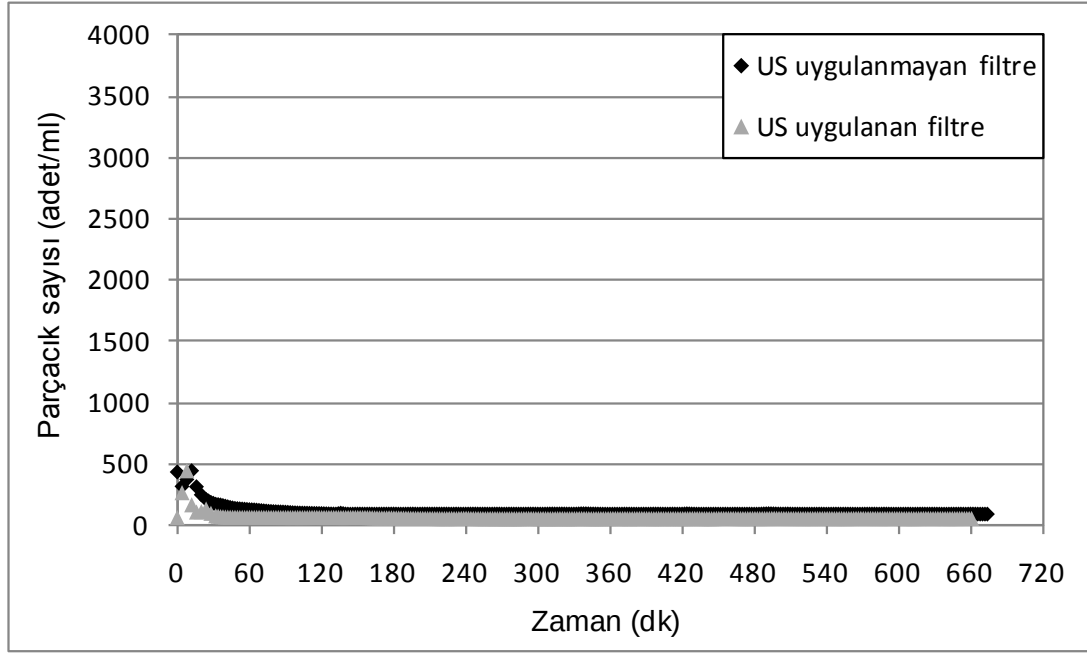
Şekil 5.17. 4.44 W/l US ve 5 mg/l FeCl_3 'ün birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı



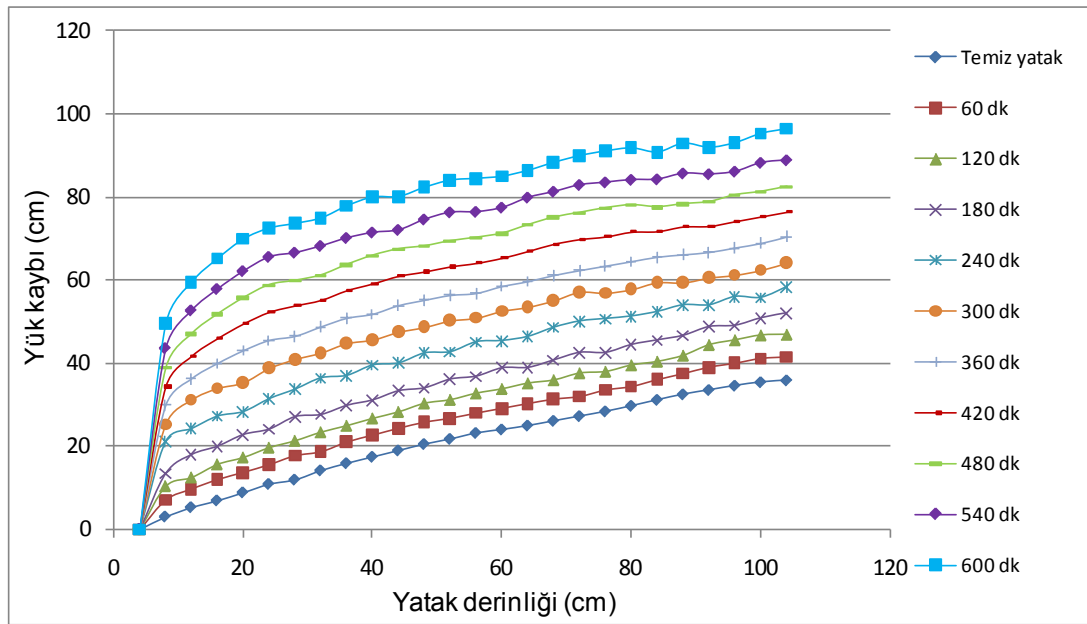
Şekil 5.18. 5 mg/l FeCl_3 ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



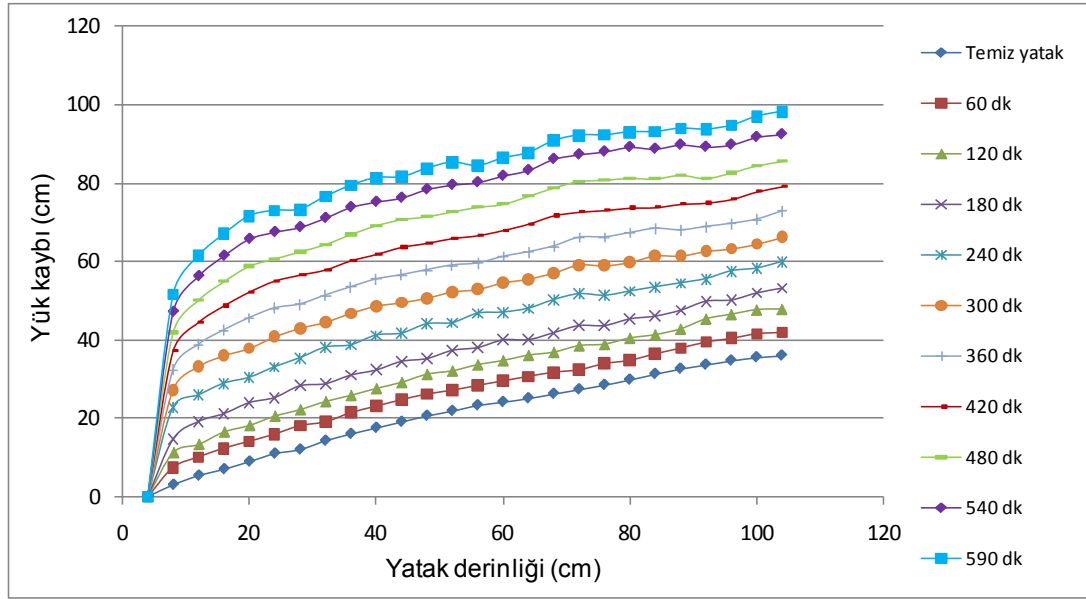
Şekil 5.19. 5 mg/l FeCl_3 ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 μm arası parçacık sayısı değişimi



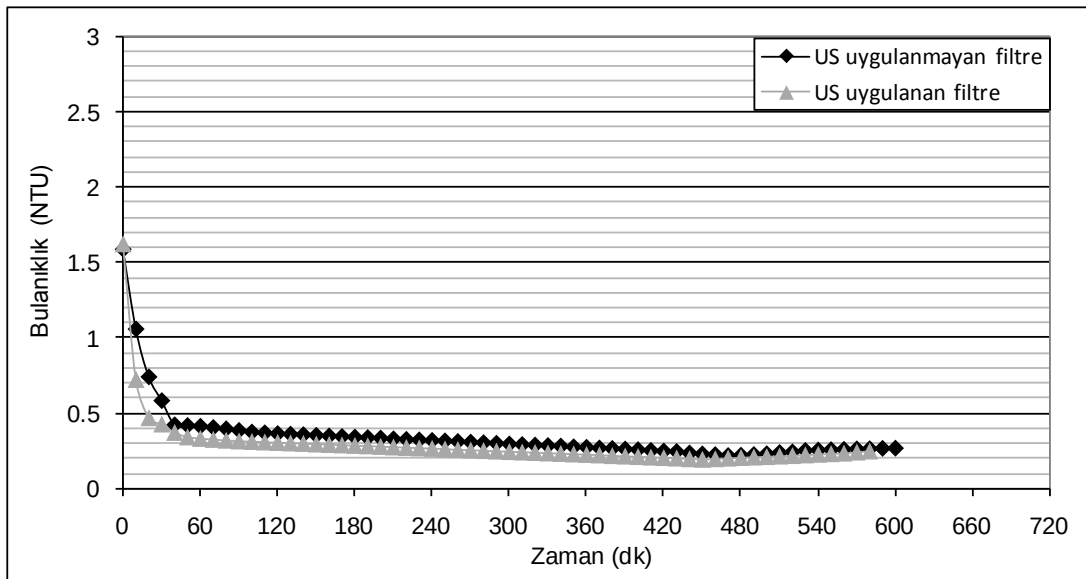
Şekil 5.20. 5 mg/l FeCl_3 ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 μm 'den büyük parçacık sayısı değişimi



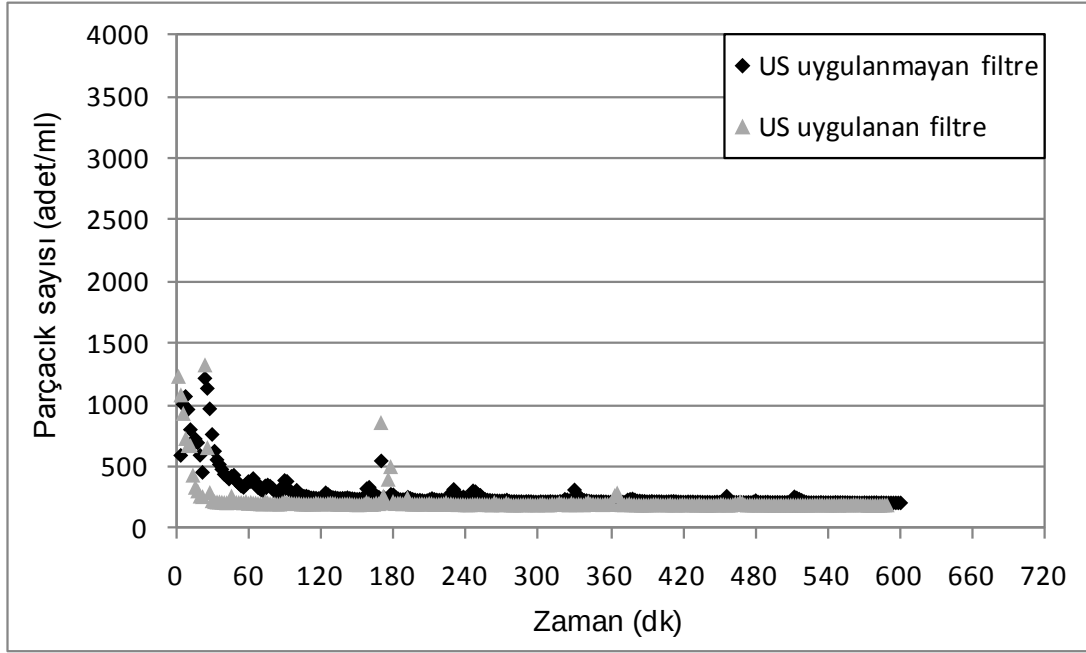
Şekil 5.21. 4.44 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l FeCl_3 ilavesiyle oluşan yük kaybı



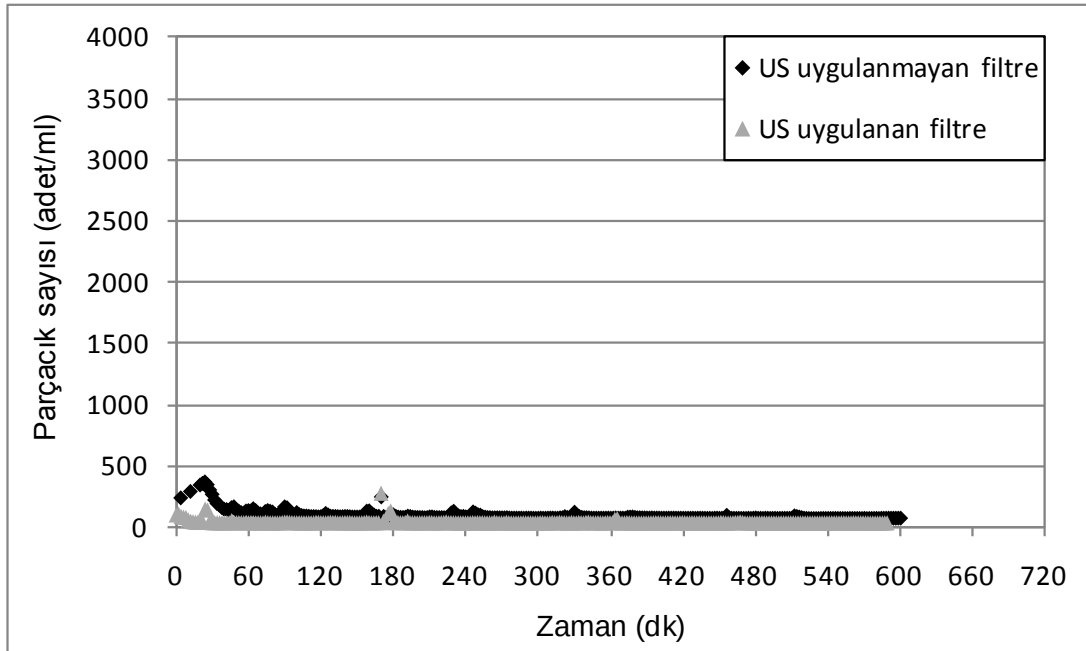
Şekil 5.22. 4.44 W/l US ve 7.5 mg/l FeCl_3 'ün birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı



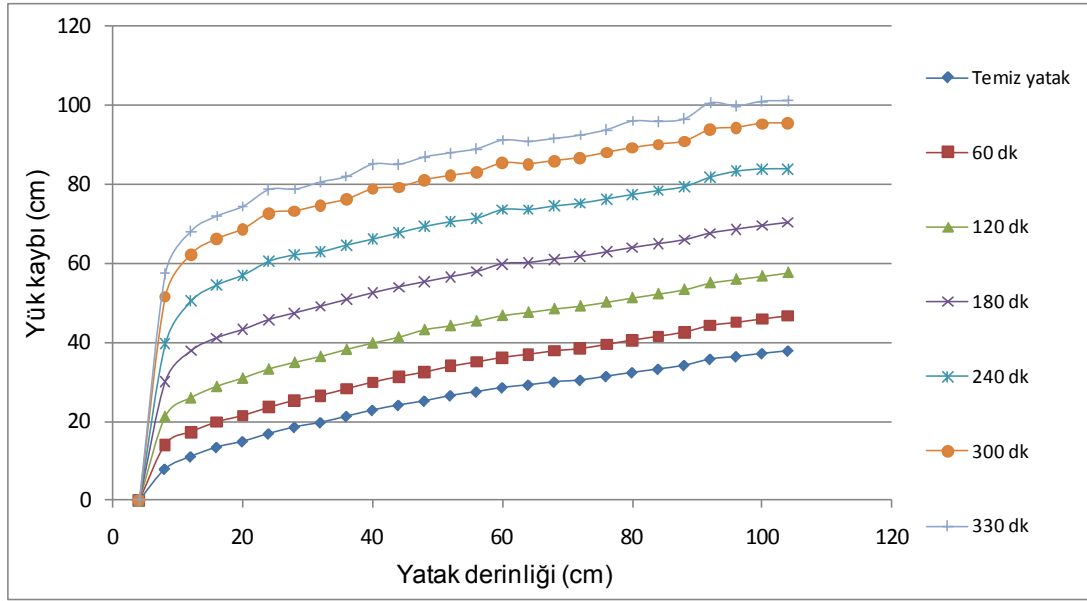
Şekil 5.23. 7.5 mg/l FeCl_3 ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



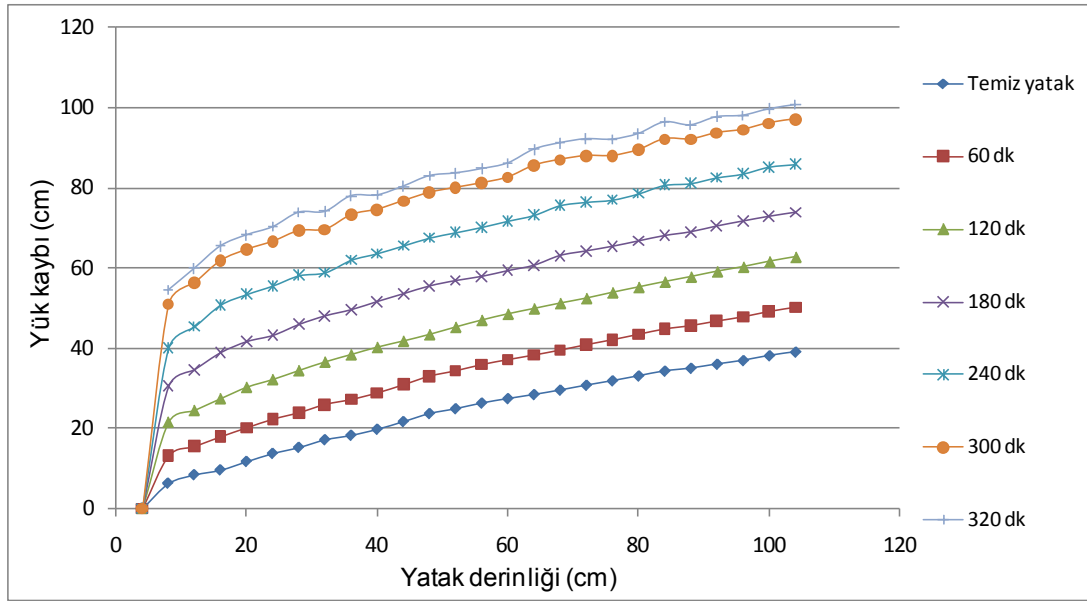
Şekil 5.24. 7.5 mg/l FeCl₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2-5 µm arası parçacık değişimi



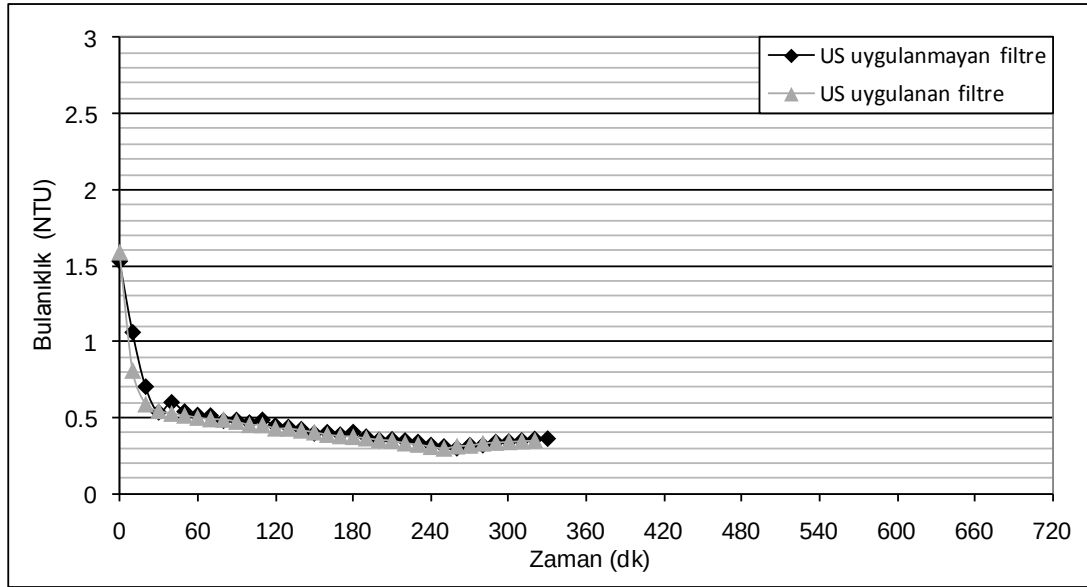
Şekil 5.25. 7.5 mg/l FeCl₃ ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık değişimi



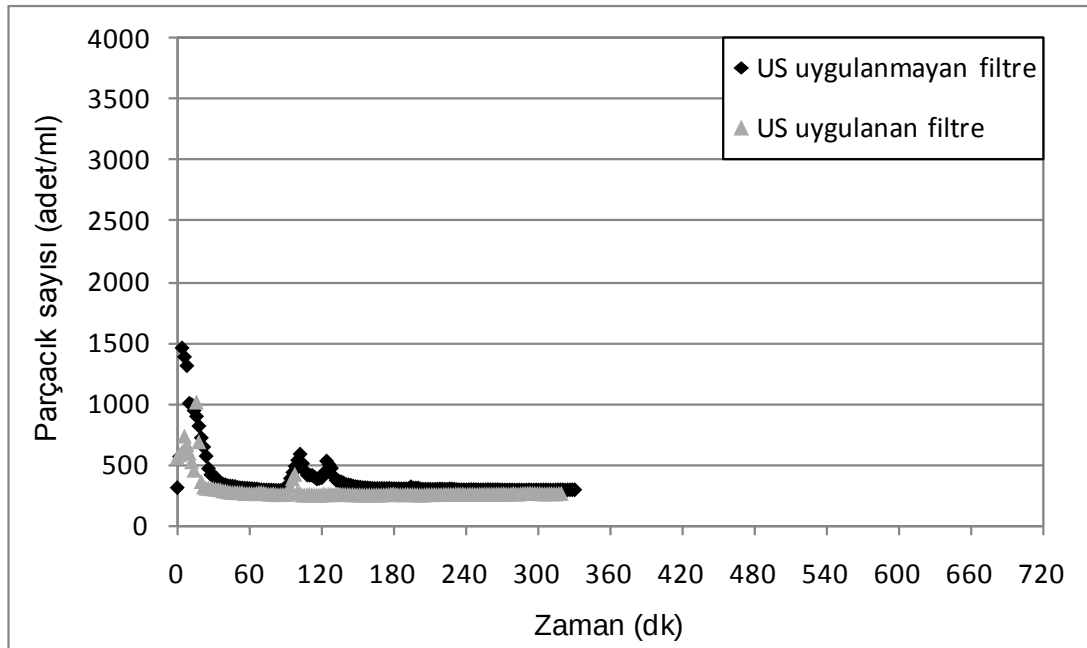
Şekil 5.26. 4.44 W/l US uygulanmadan 10 mg/l FeCl_3 ilavesiyle oluşan yük kaybı



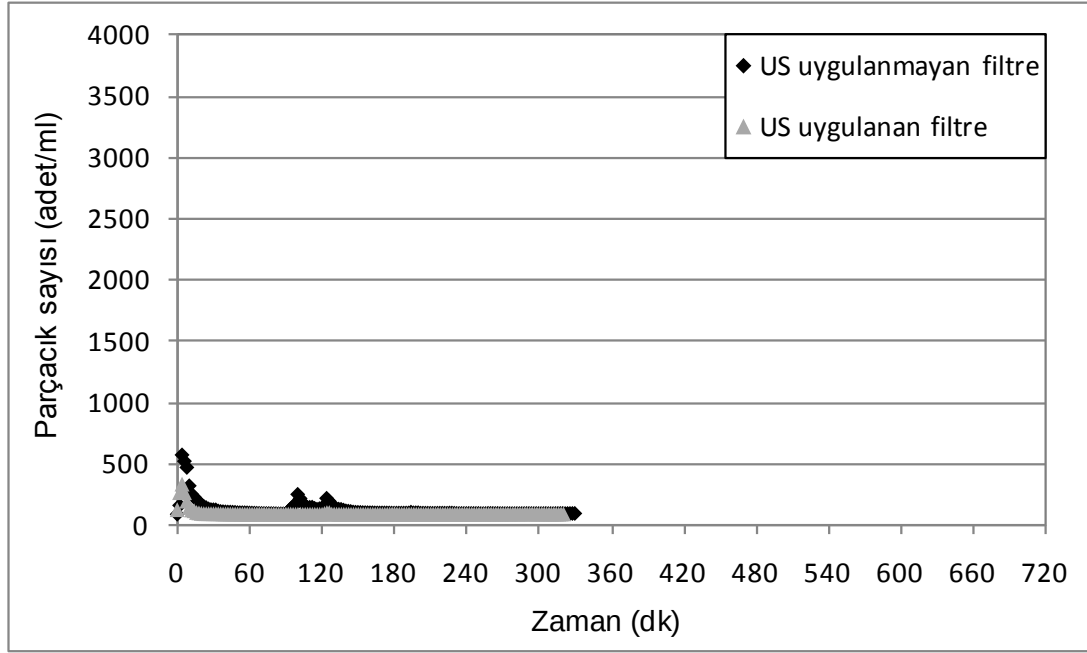
Şekil 5.27. 4.44 W/l US ve 10 mg/l FeCl_3 'ün birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı



Şekil 5.28. 10 mg/l FeCl_3 ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi

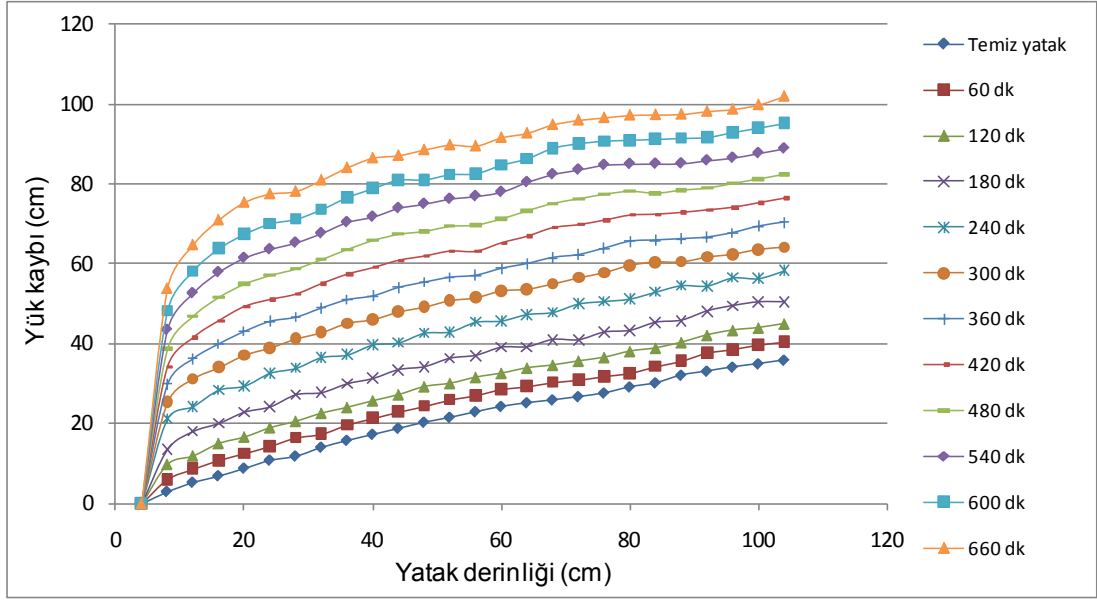


Şekil 5.29. 10 mg/l FeCl_3 ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 μm arası parçacık sayısı değişimi

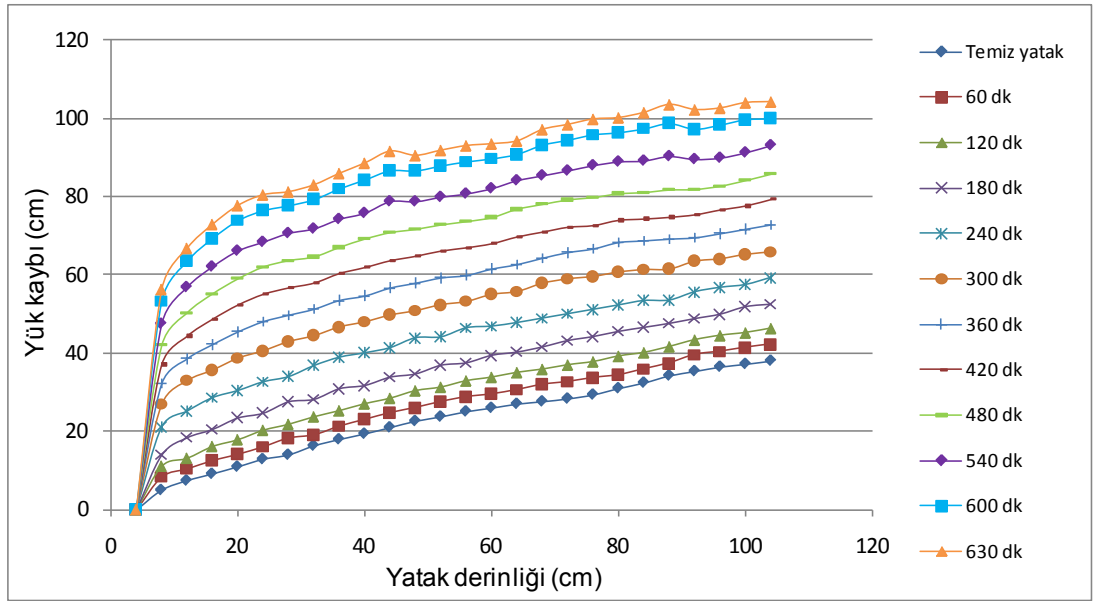


Şekil 5.30. 10 mg/l FeCl_3 ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 μm 'den büyük parçacık sayısı değişimi

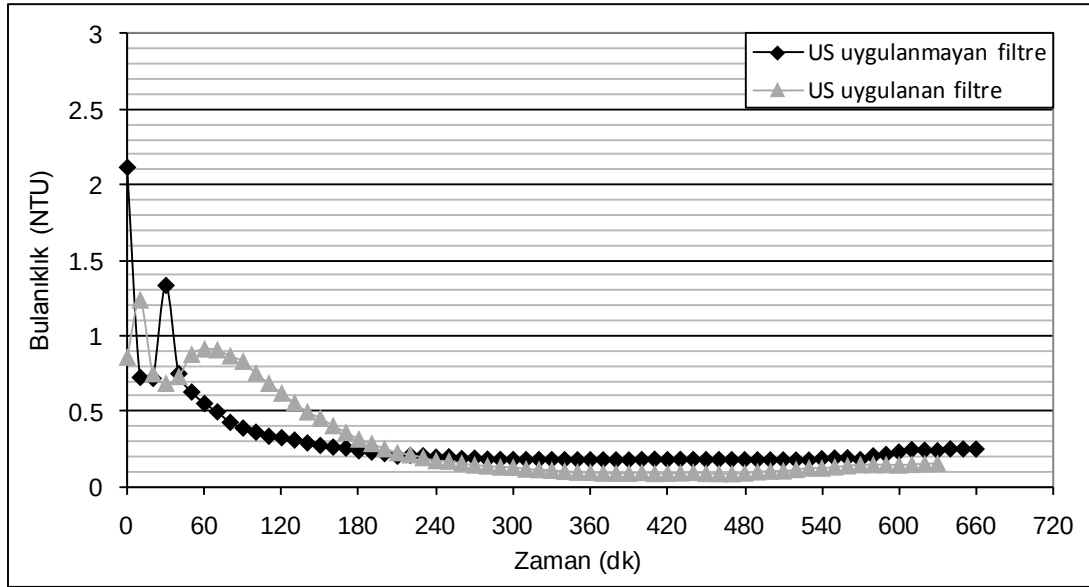
Yedinci, sekizinci ve dokuzuncu deneylerde FeCl_3 yerine aynı dozlarda $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ kullanılmıştır. Bu deneylerde, filtre ömürlerinde benzer sonuçlara ulaşılrken, FeCl_3 'e kıyasla üç dozda da, bulanıklık ve parçacık giderimlerinde daha fazla iyileşmeler gözlenmiştir (tablo 5.1). Özellikle 5 mg/l alum dozlaması ve ultrases uygulanan filtrenin çıkış suyundaki bulanıklık, 0.09 ile 0.1 olan limit değerin altında kalırken (şekil 5.33), parçacık sayılarında da 2–5 μm aralığındaki ve 5 μm 'den büyük parçacıklar için sırasıyla yüzde 99.5 ve 99.98 giderim verimlerine ulaşılmıştır (şekil 5.35).



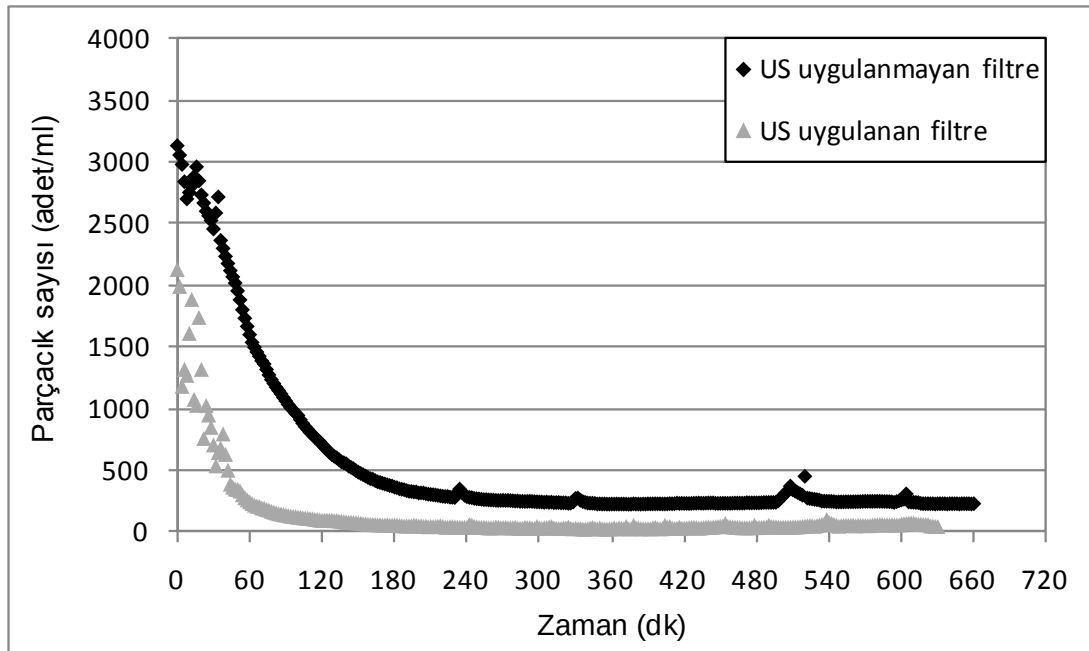
Şekil 5.31. 4.44 W/l US uygulanmadan 5 mg/l alum ilavesiyle oluşan yük kaybı



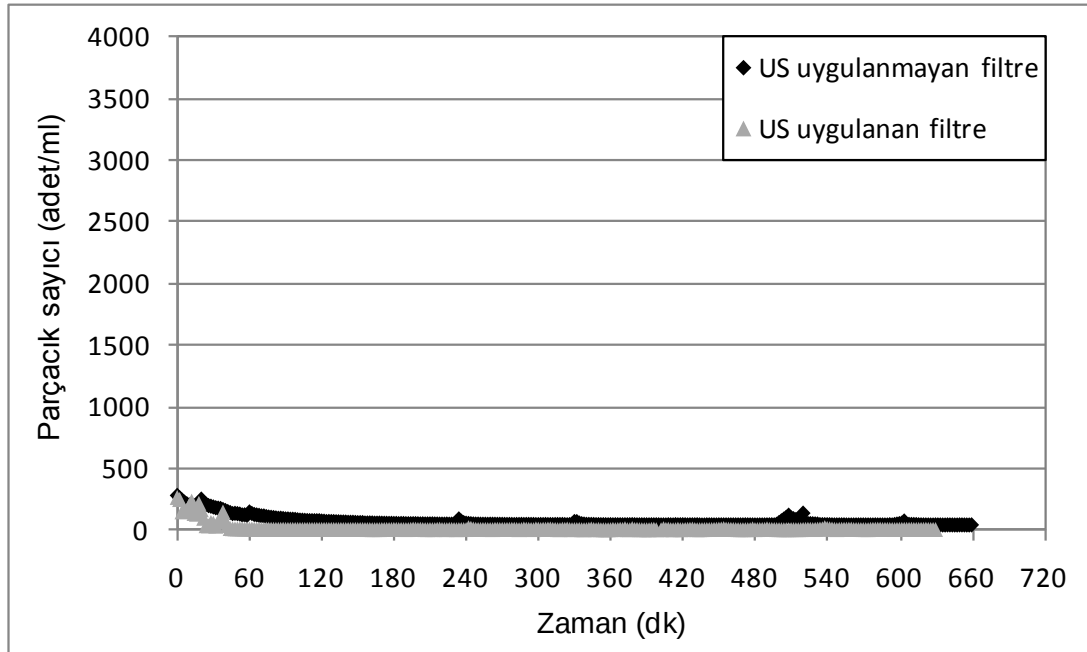
Şekil 5.32. 4.44 W/l US ve 5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı



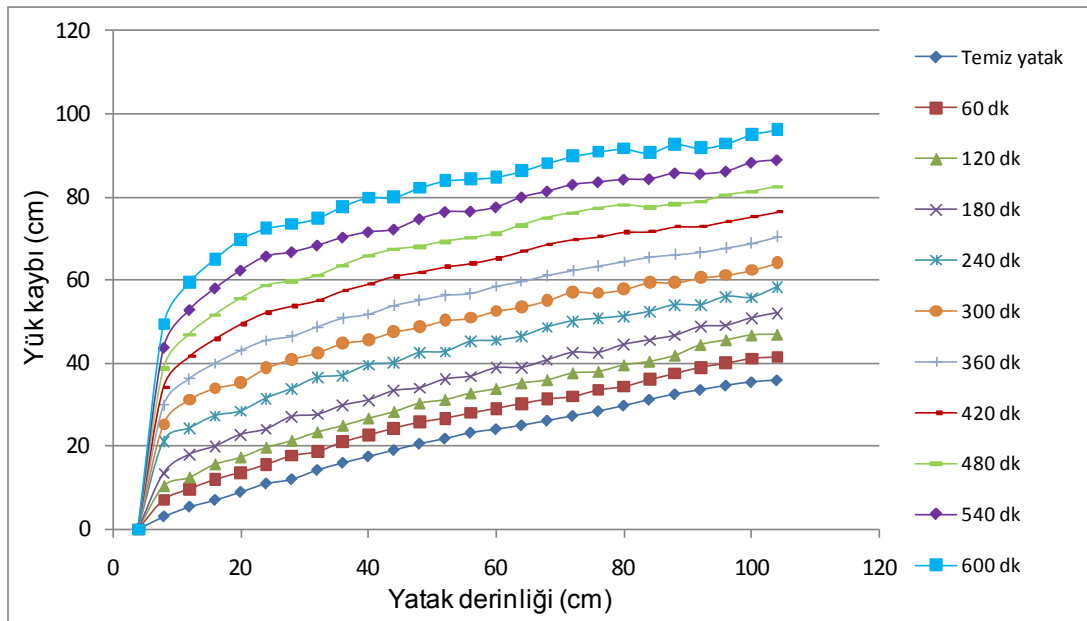
Şekil 5.33. 5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



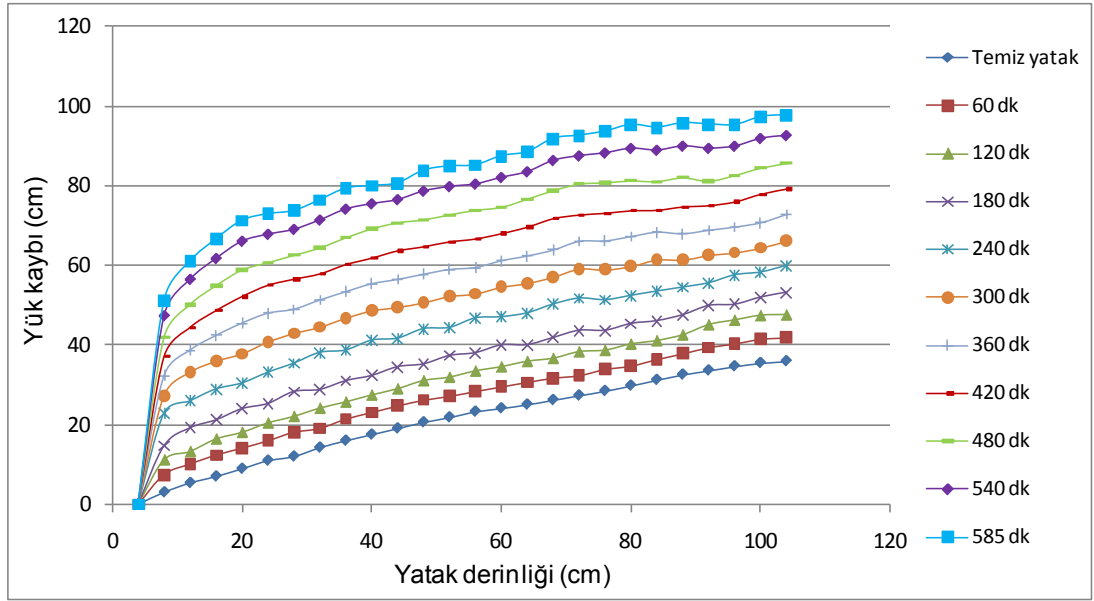
Şekil 5.34. 5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2-5 µm arası parçacık sayısı değişimi



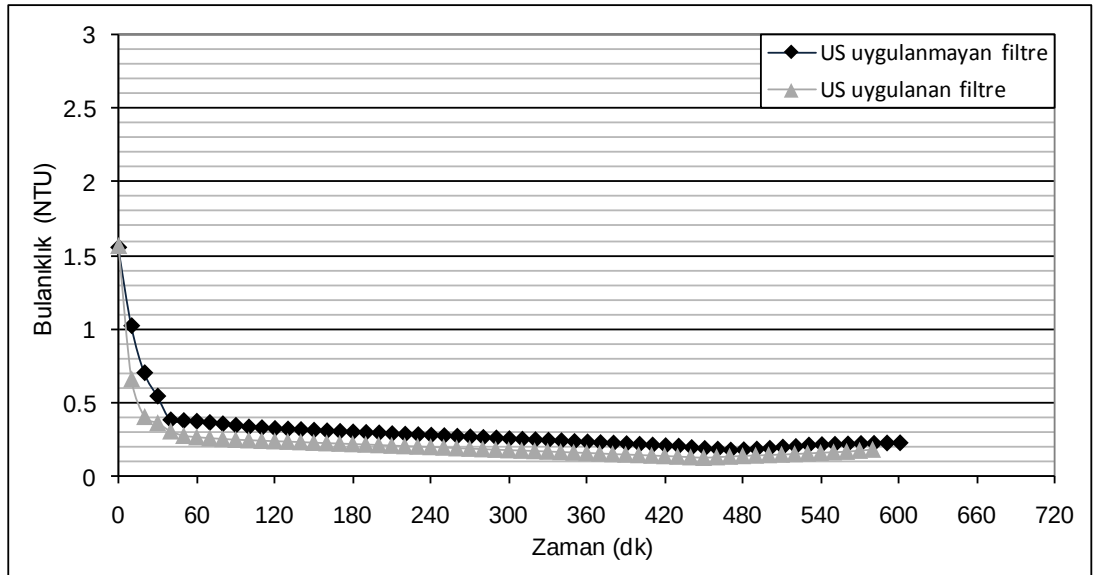
Şekil 5.35. 5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi



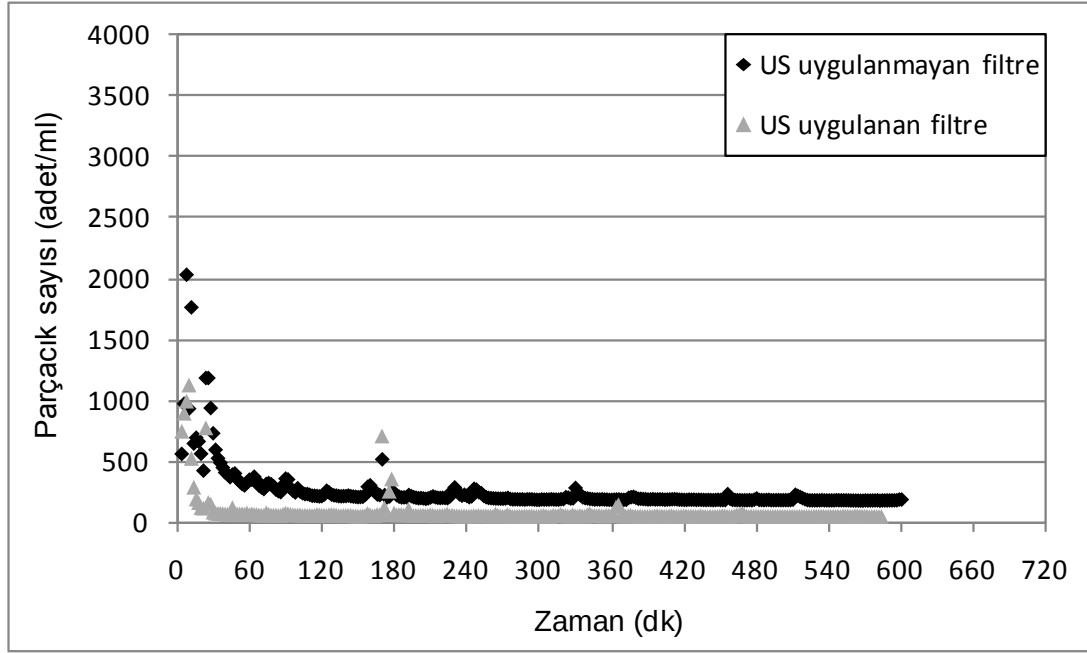
Şekil 5.36. 4.44 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l alum ilavesiyle oluşan yük kaybı



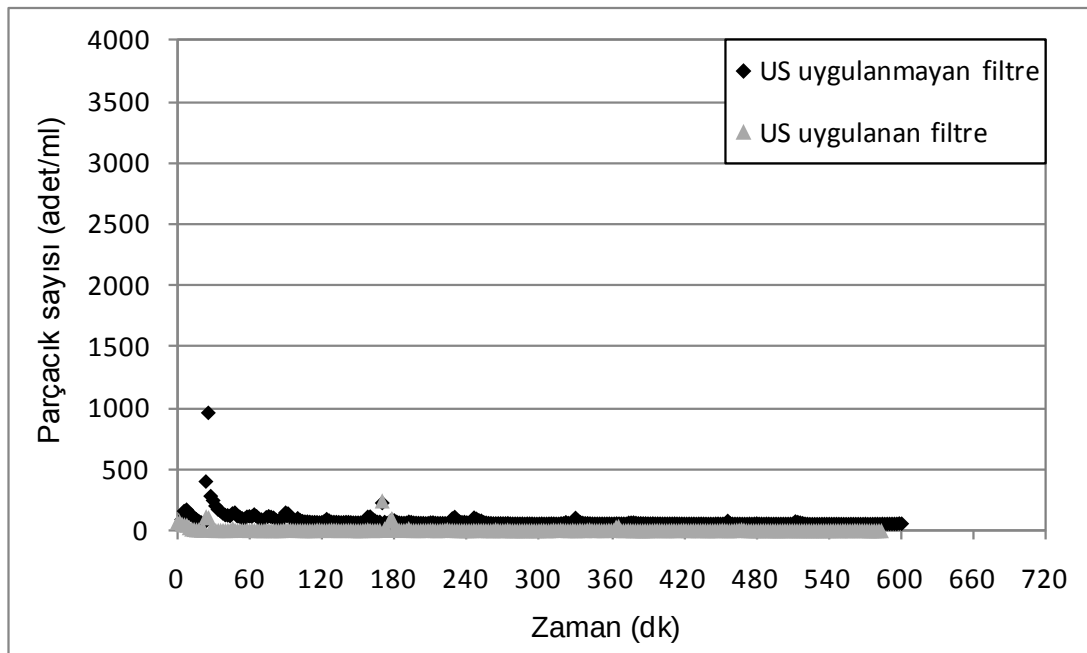
Şekil 5.37. 4.44 W/l US ve 7.5 mg/l alümin birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı



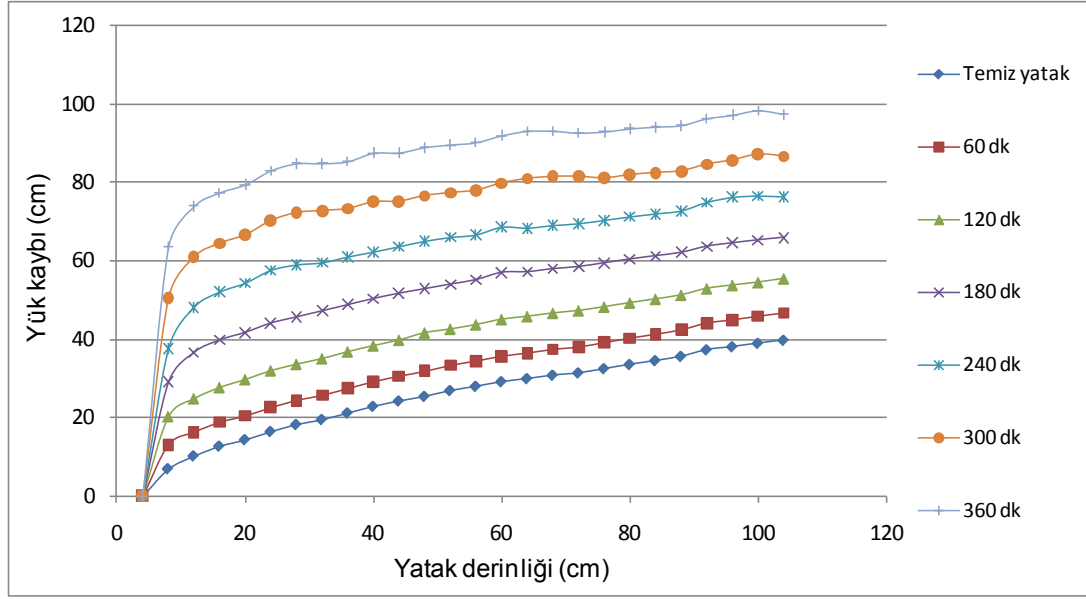
Şekil 5.38. 7.5 mg/l alümin ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



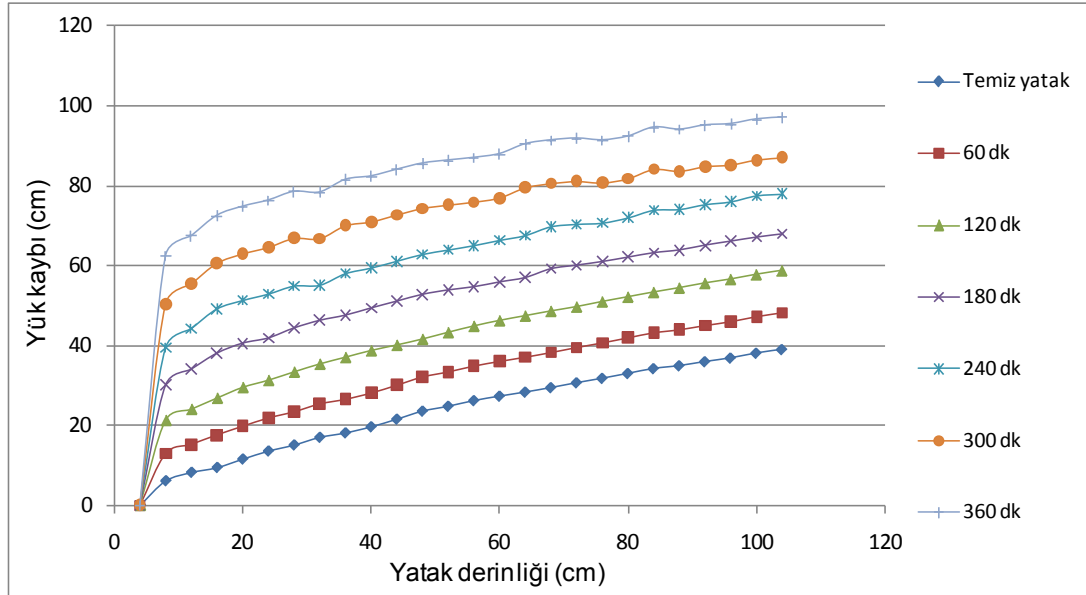
Şekil 5.39. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2-5 µm arası parçacık sayısı değişimi



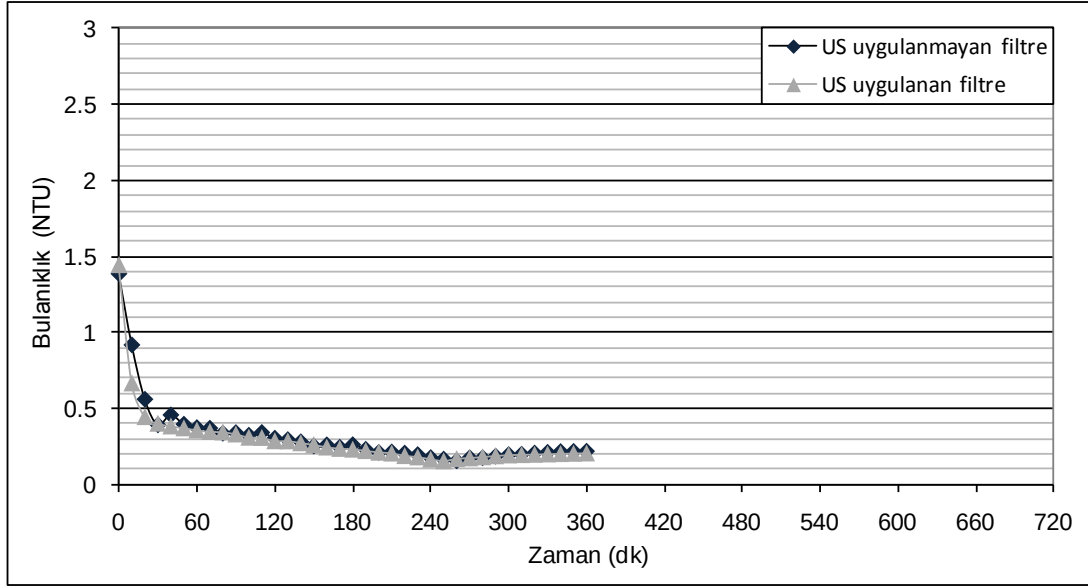
Şekil 5.40. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi



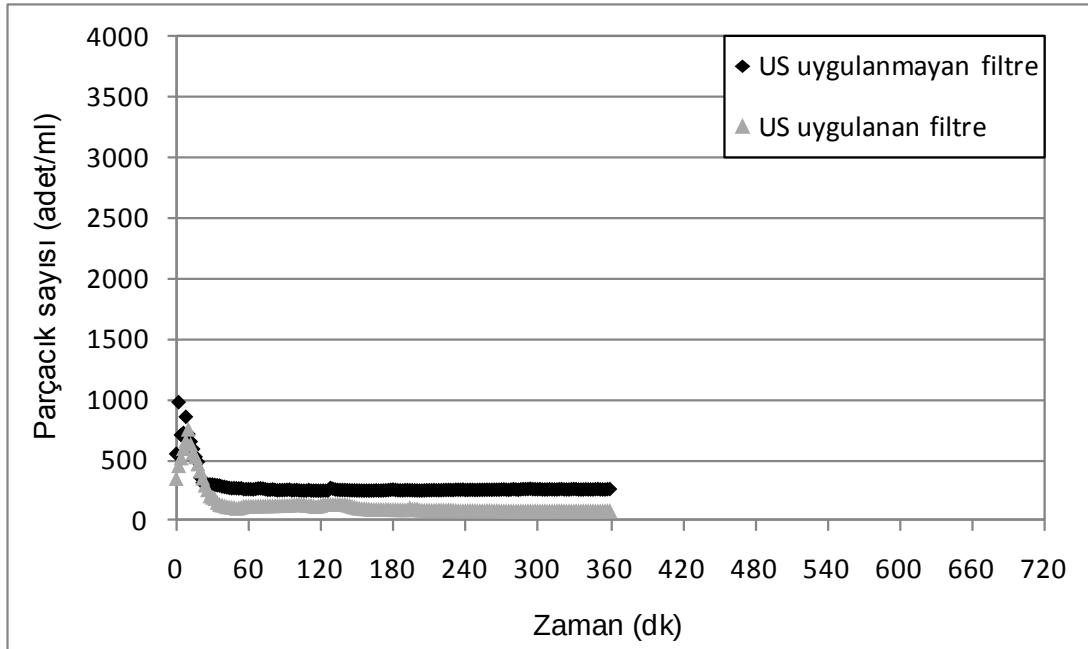
Şekil 5.41. 4.44 W/l US uygulanmadan 10 mg/l alum ilavesiyle oluşan yük kaybı



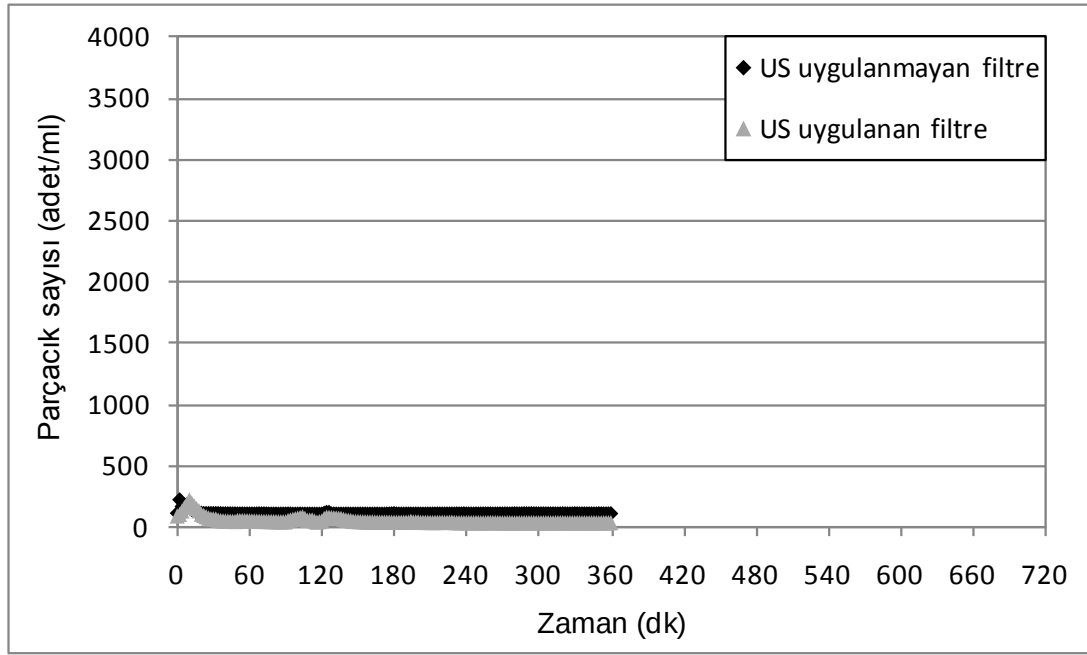
Şekil 5.42. 4.44 W/l US ve 10 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla oluşan yük kaybı



Şekil 5.43. 10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



Şekil 5.44. 10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2-5 µm arası parçacık sayısı değişimi

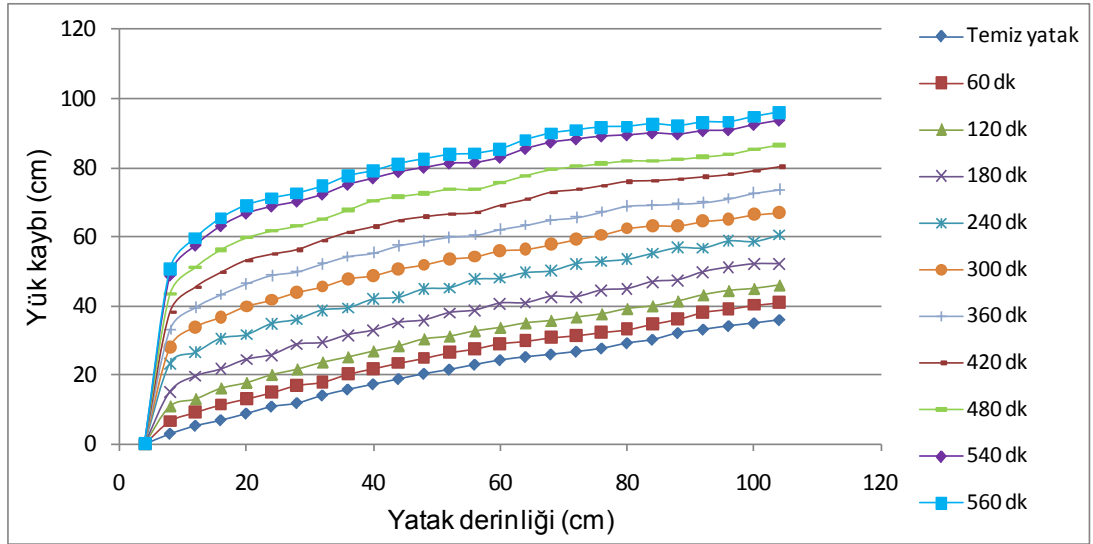


Şekil 5.45. 10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi

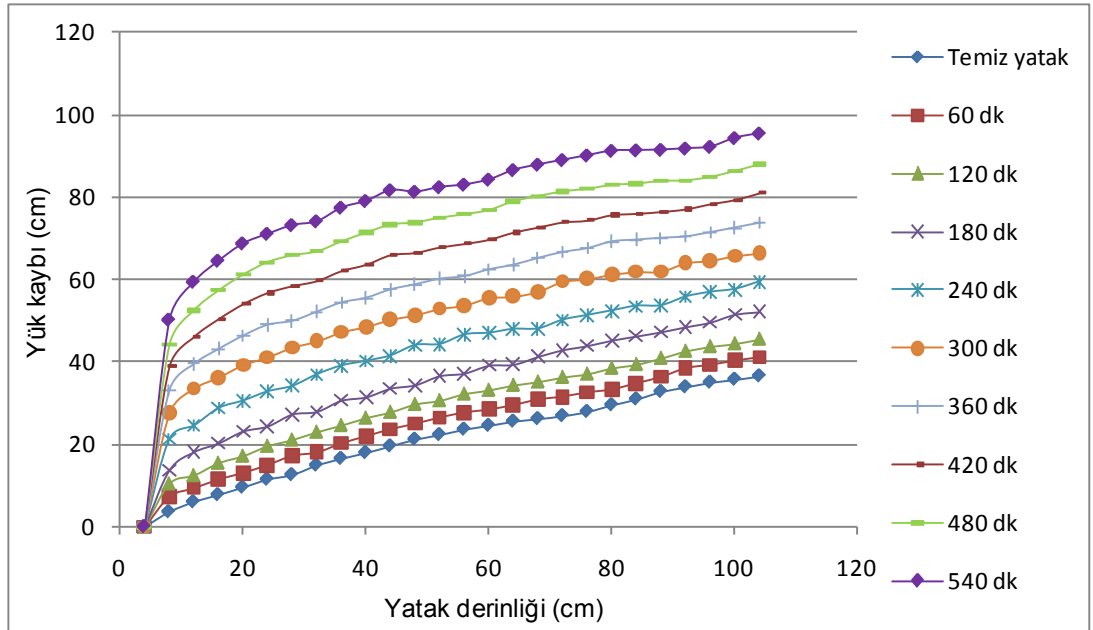
5.2. Ömerli Ham Suyu ile Yapılan Deneyler

Çalışmanın üçüncü aşamasında, Ömerli Havzası'ndan temin edilen ham su kullanılmıştır. Sentetik su ile yumaklaştırıcı seçimi için yapılan deneylerde elde edilen veriler doğrultusunda tekrar 5, 7.5 ve 10 mg/l konsantrasyonlarında alum ile çalışılmıştır. Ultrases şiddeti, çalışmanın ilk aşamasında belirlendiği üzere yine 4.44 W/l olarak seçilmiştir.

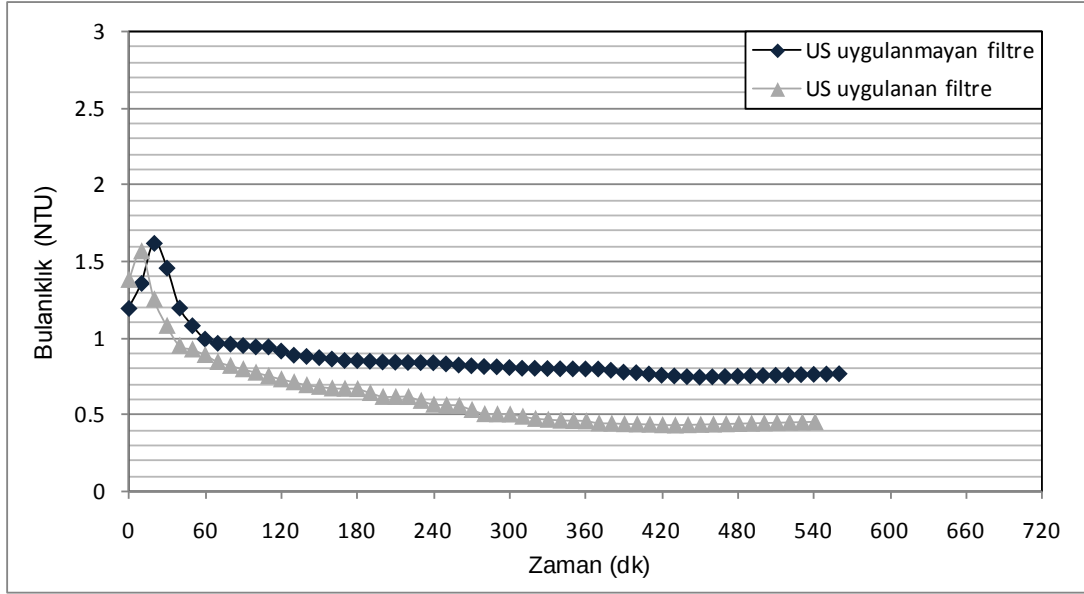
Ham suyun sentetik sudan tamamen farklı karakteristik özellikleri sebebiyle, aynı şartlarda gerçekleştirilen alum deneylerinde çıkış suyu kaliteleri ve filtre ömürlerinde düşüşler gözlenmiştir.



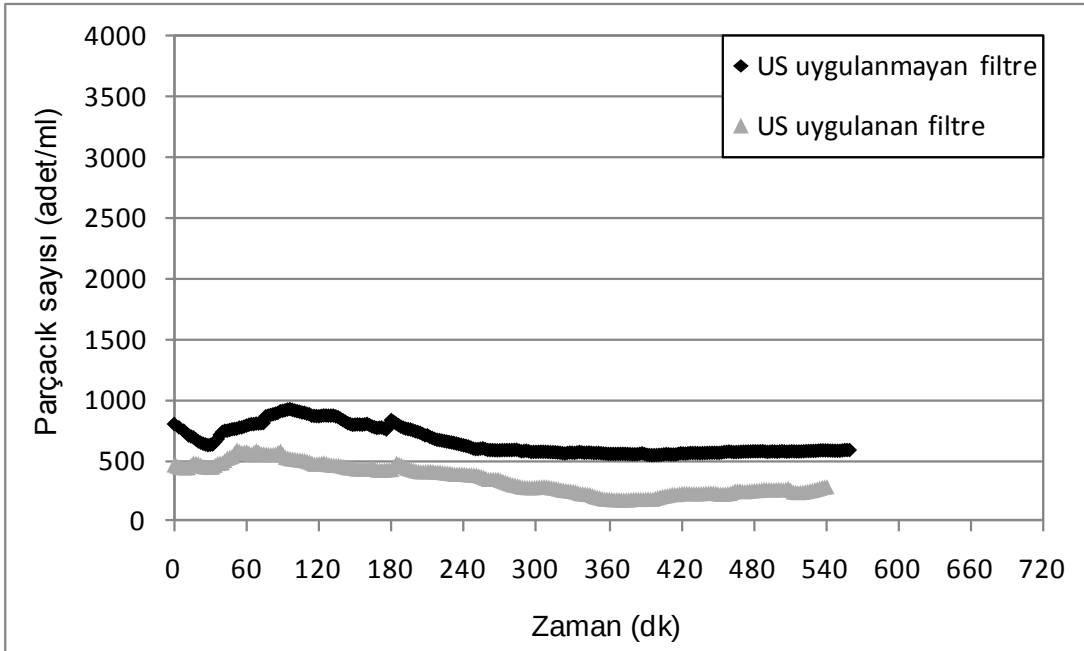
Şekil 5.46. 4.44 W/l US uygulanmadan 5 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı



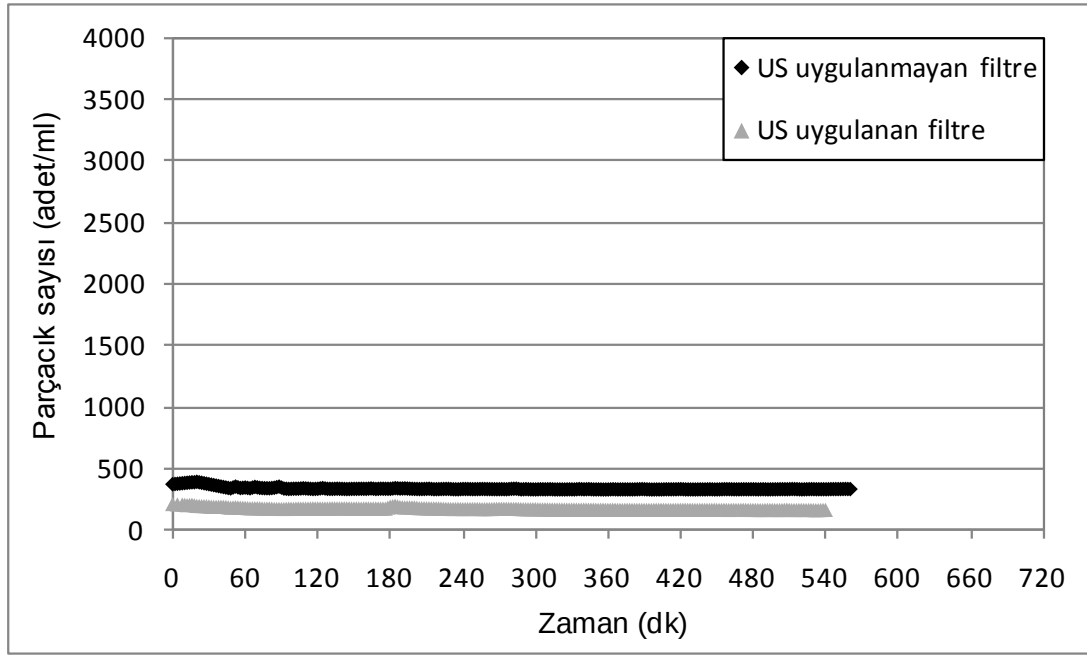
Şekil 5.47. 4.44 W/l US ve 5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı



Şekil 5.48. 5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi

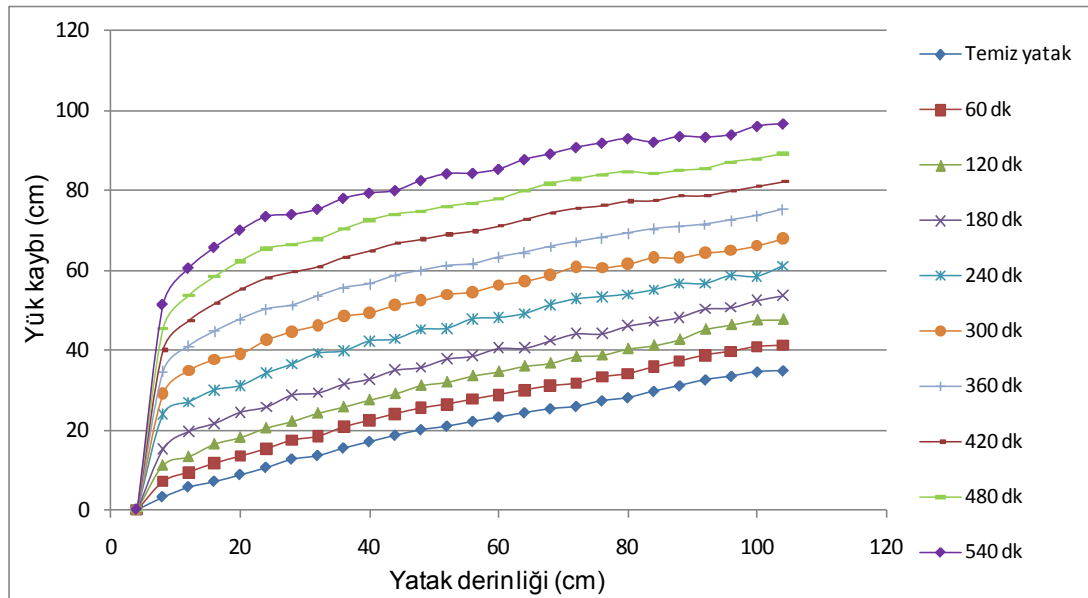


Şekil 5.49. 5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2-5 µm arası parçacık sayısı değişimi

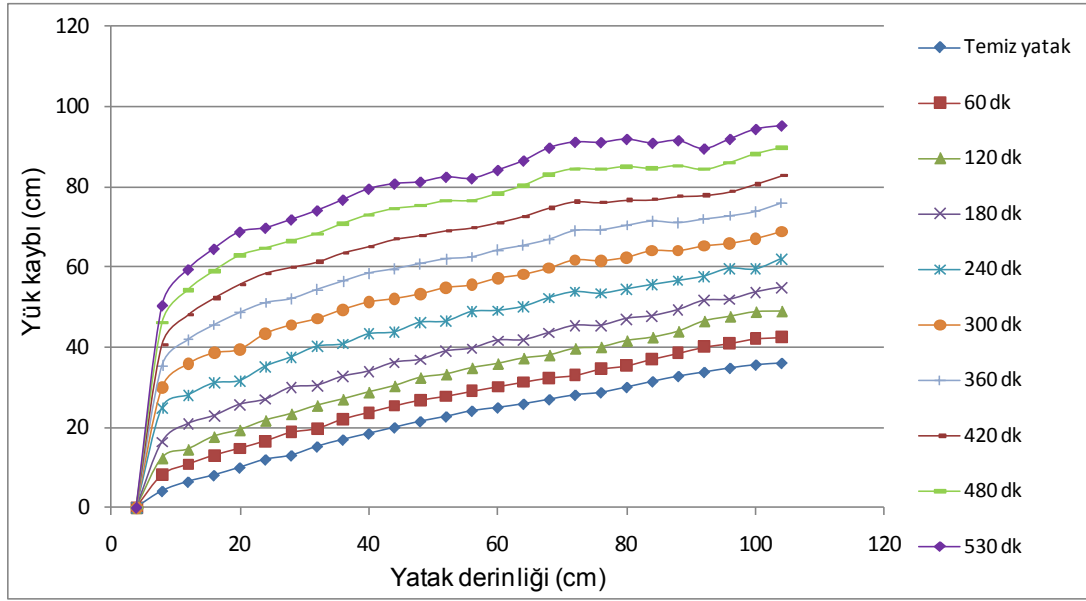


Şekil 5.50. 5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi

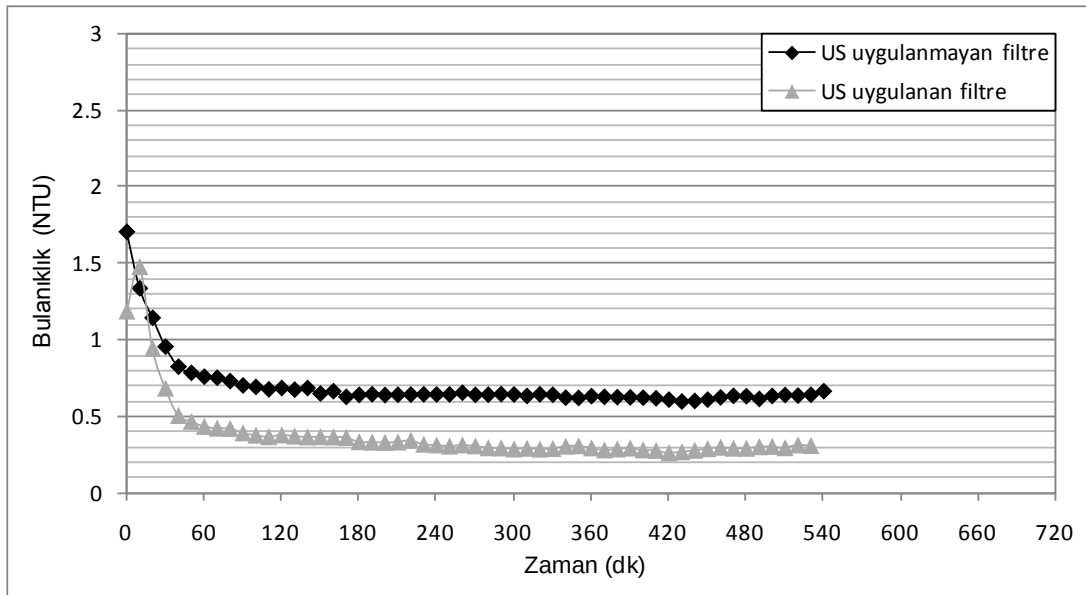
Genel olarak çıkış suyu standartları sağlanamasa da 7.5 mg/l alum konsantrasyonu ve 4.44 W/l ultrases ile yapılan deneyde ultrases uygulanan filtrenin çıkış suyunda elde edilen sonuçlar (şekil 5.53–5.55) diğer dozlarda elde edilenlere göre daha iyi durumdadır. Daha önceki deneylerde olduğu gibi 10 mg/l yumaklaştırıcı dozunda filtre ömrü oldukça kısalmıştır (şekil 5.56 ve 5.57).



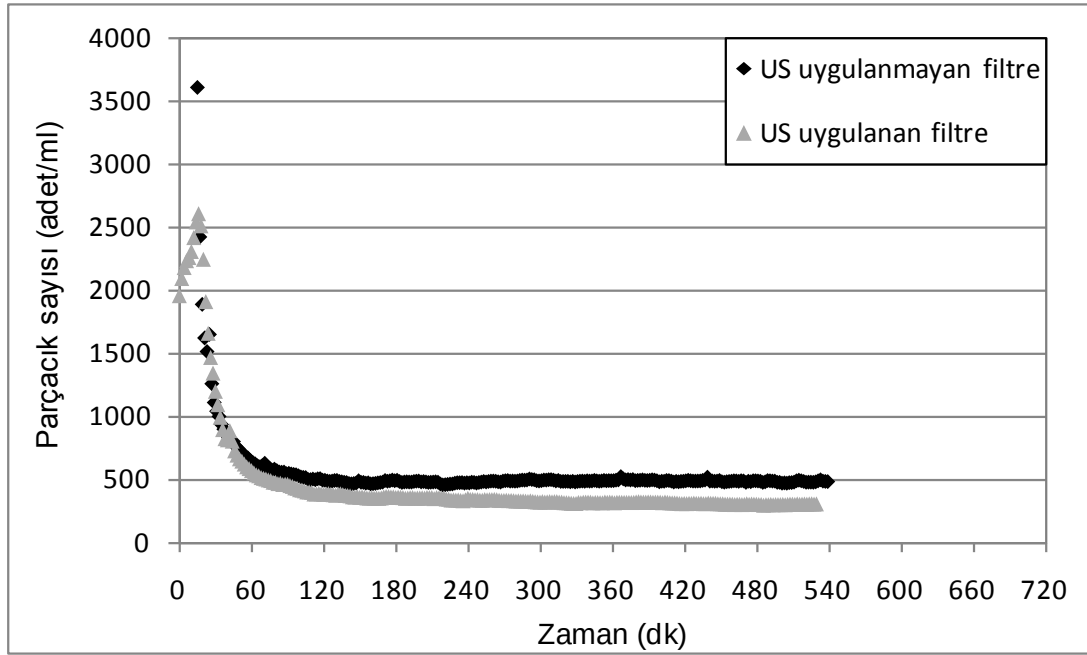
Şekil 5.51. 4.44 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı



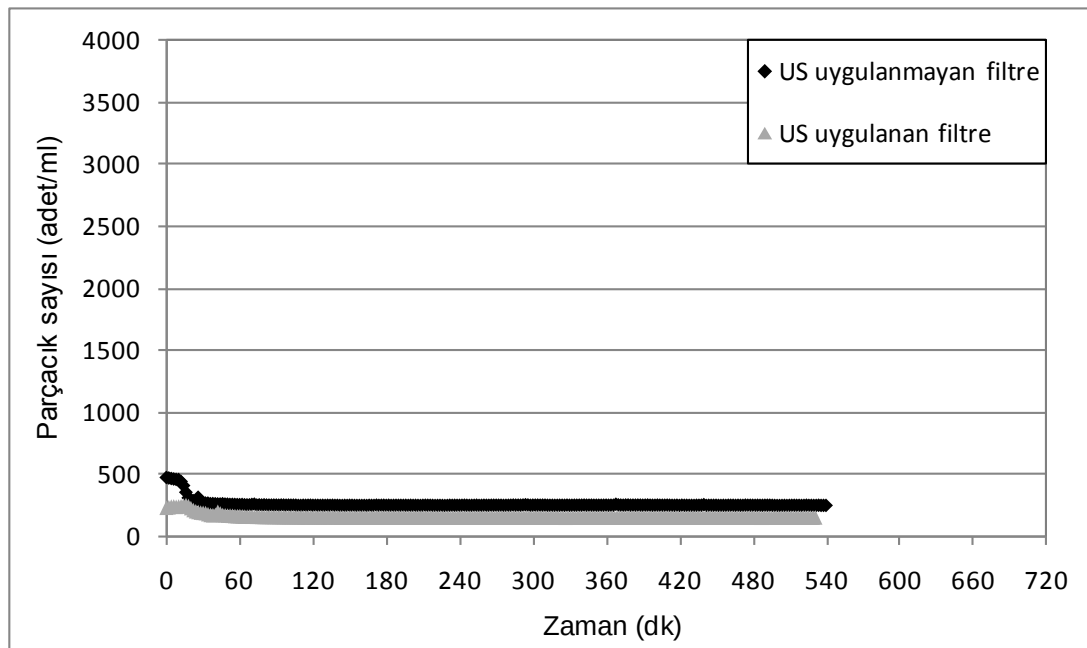
Şekil 5.52. 4.44 W/l US ve 7.5 mg/l alumin birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı



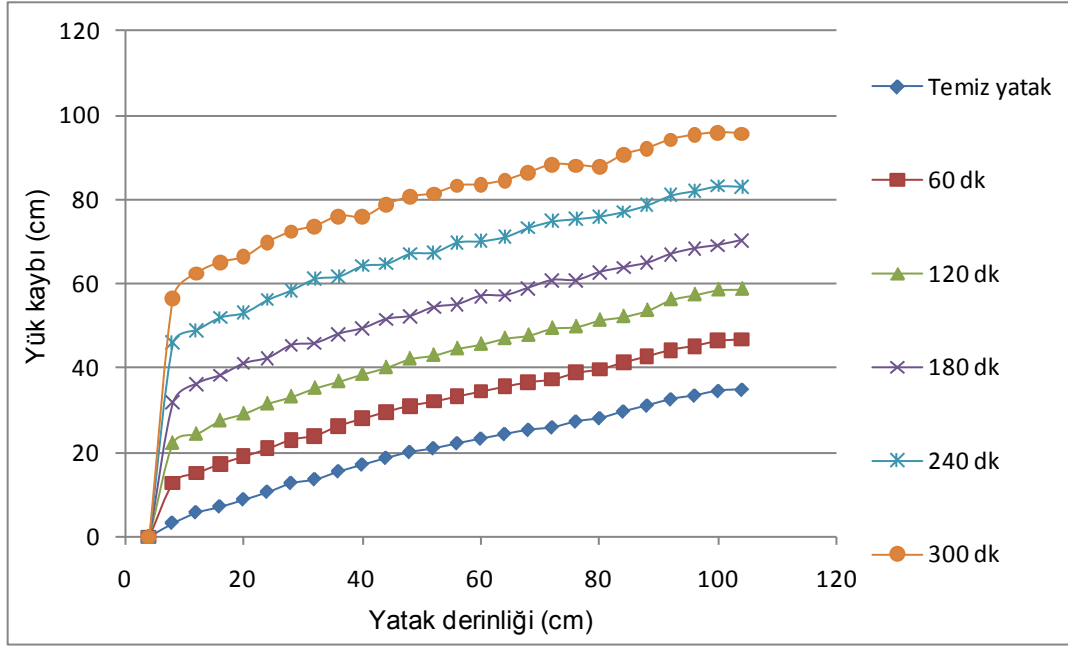
Şekil 5.53. 7.5 mg/l alumin ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



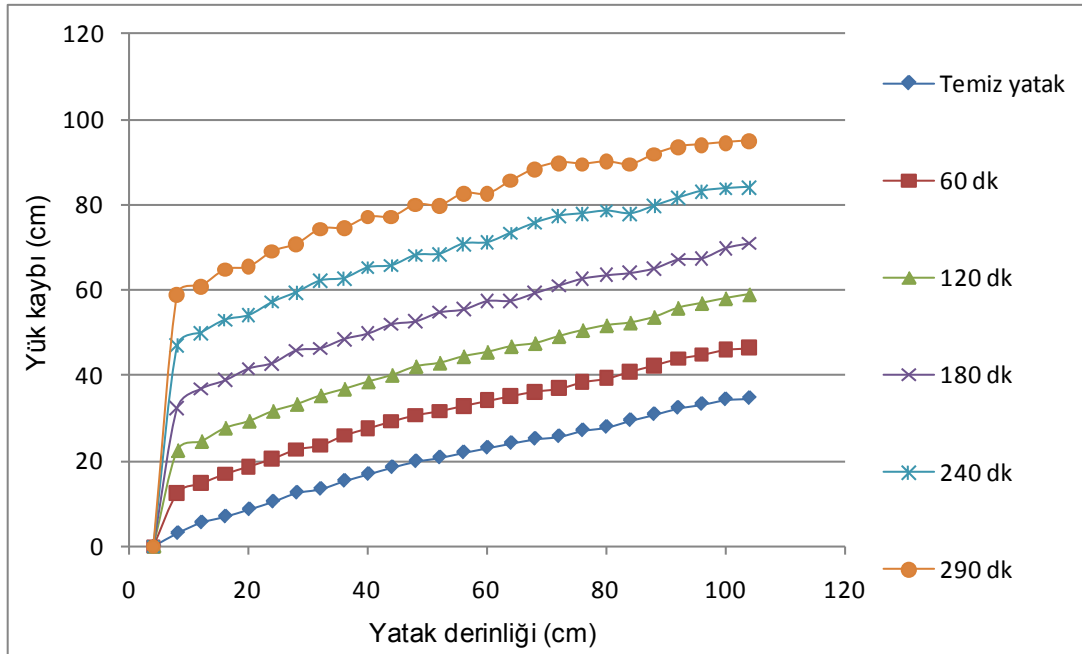
Şekil 5.54. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 2–5 µm arası parçacık sayısı değişimi



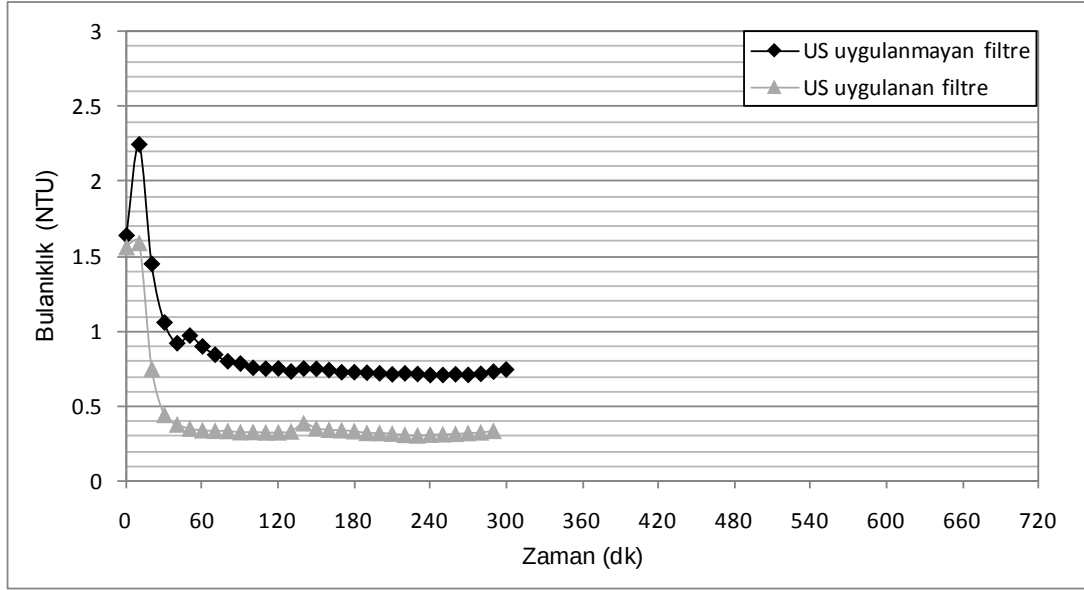
Şekil 5.55. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi



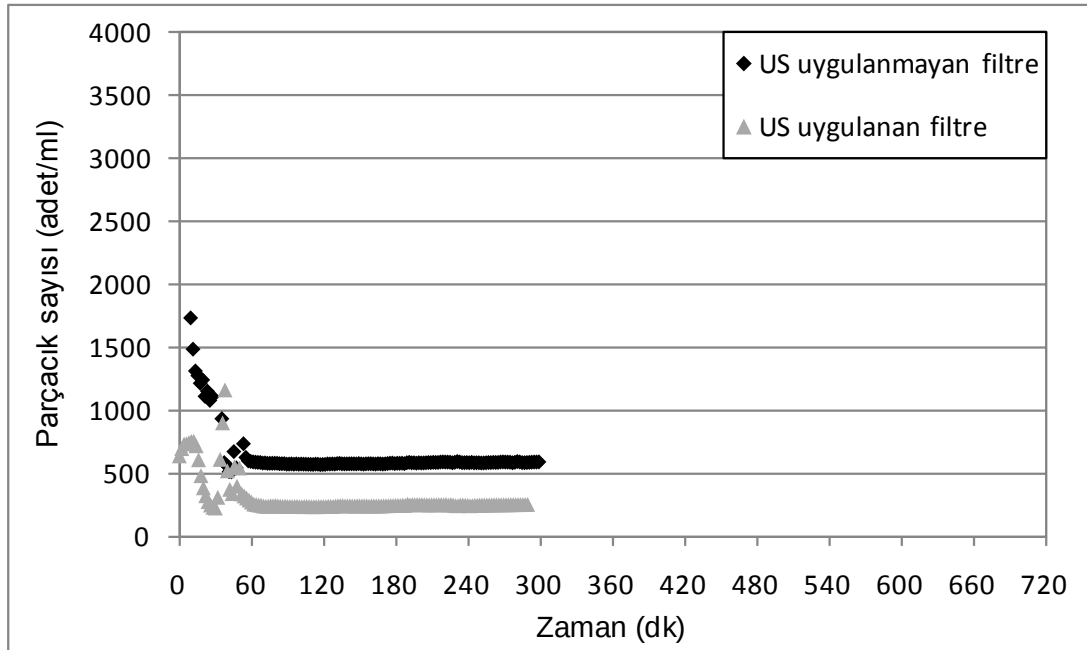
Şekil 5.56. 4.44 W/l US uygulanmadan 10 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı



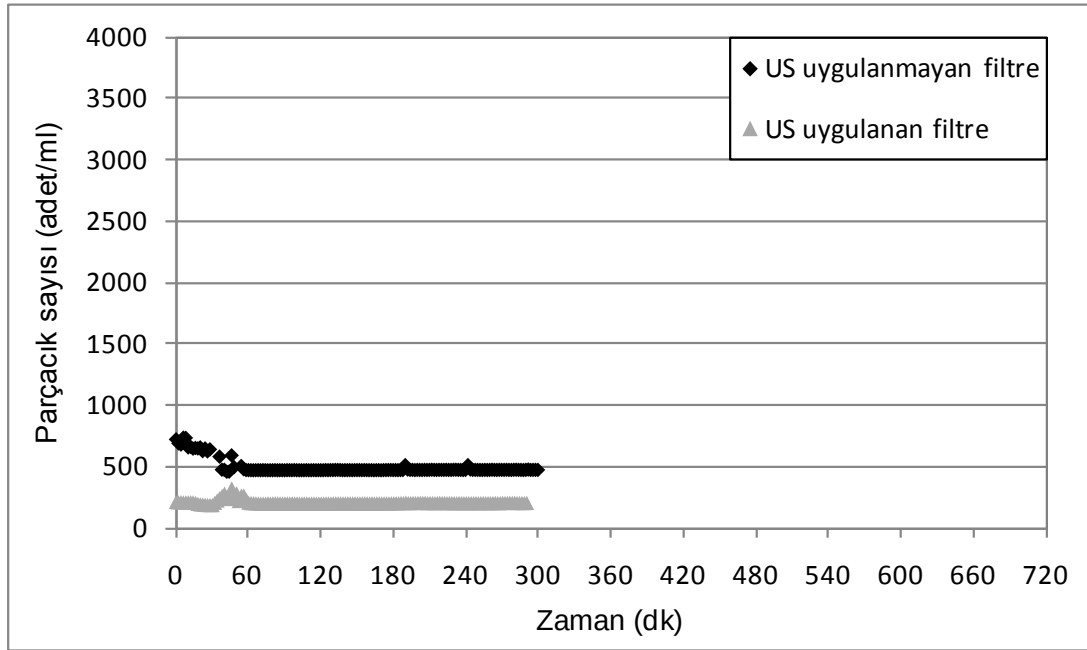
Şekil 5.57. 4.44 W/l US ve 10 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı



Şekil 5.58. 10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi

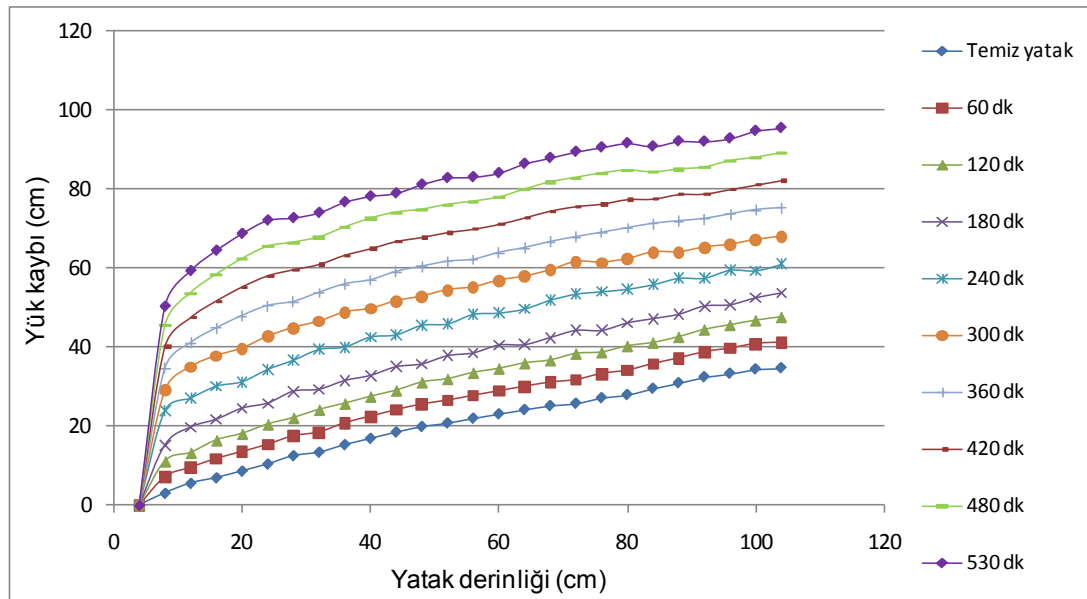


Şekil 5.59. 10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan 2-5 µm arası parçacık sayısı değişimi

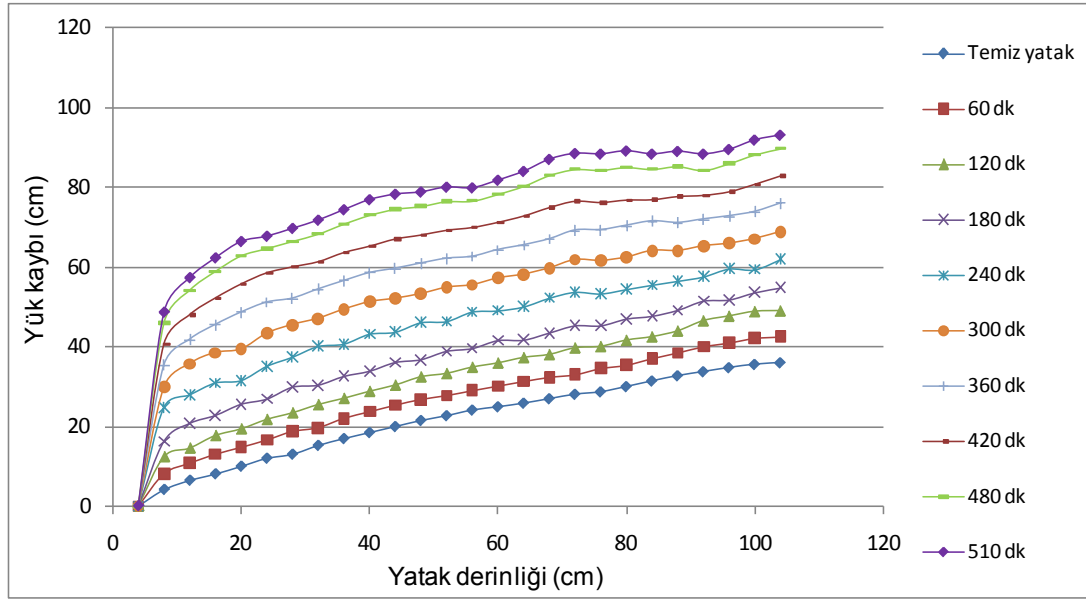


Şekil 5.60. 10 mg/l alum ilavesinden önce 4.44 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi

Çalışmanın dördüncü ve son aşamasında, bir önceki aşamada 7.5 mg/l alum konsantrasyonu ile diğer dozlara nispeten daha iyi sonuçlara ulaşılması üzerine deneyler için bu doz seçilirken, çıkış suyu standartlarına ulaşabilmek amacıyla ultrases şiddetinde artışa gidilerek, 8.89 ve 13.33 W/l US şiddetlerinde çalışılmıştır.

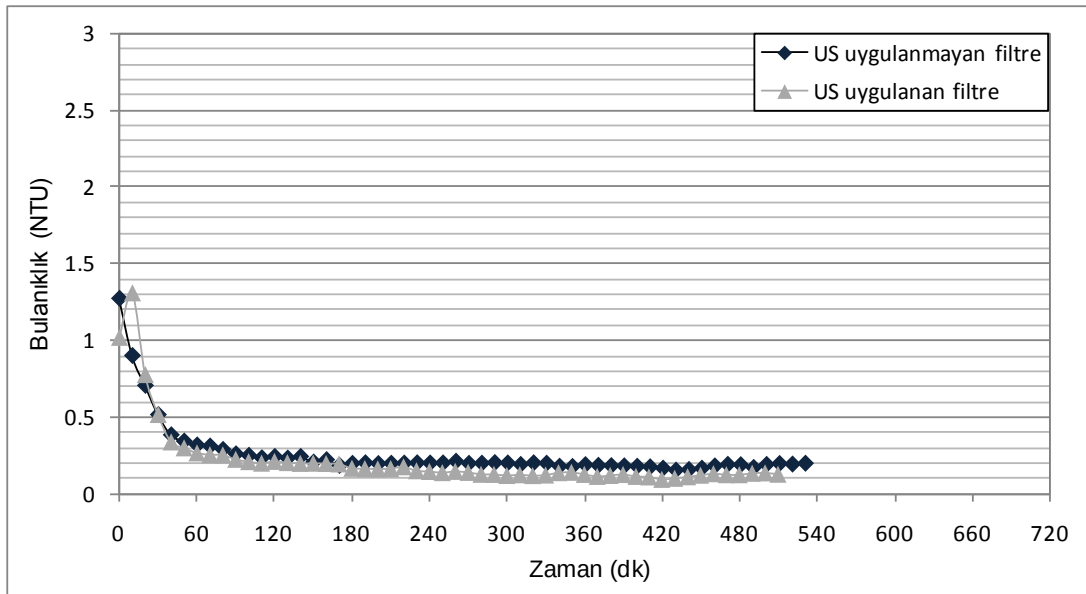


Şekil 5.61. 8.89 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı



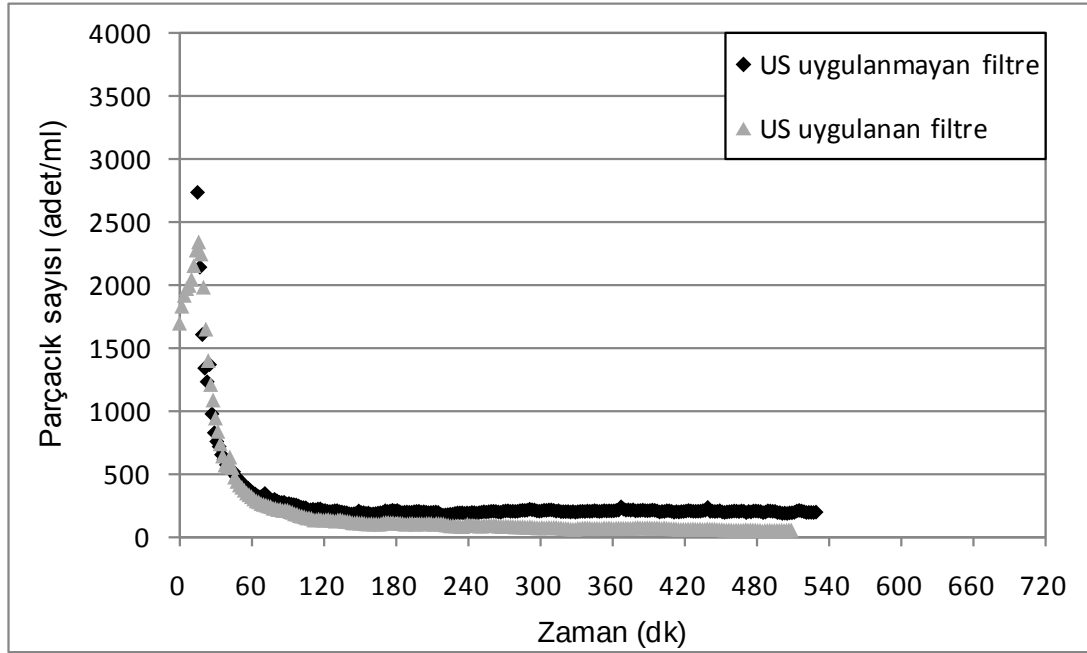
Şekil 5.62. 8.89 W/l US ve 7.5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı

Sonuçlara göre; 8.89 W/l ultrases şiddeti ve 7.5 mg/l alum kombinasyonu, incelenen çıkış suyu parametrelerinde çok az bir farkla öne çıkmaktadır. Ultrases uygulanmayan filtrelerde bulanıklık limitin üstünde kalırken, ultrases uygulanan filtrelerde çıkış suyu bulanıklıkları 8.89 ve 13.33 W/l için sırasıyla 0.09 ve 0.08 olarak, limit değerin (0.1 NTU) altında bulunmuştur.

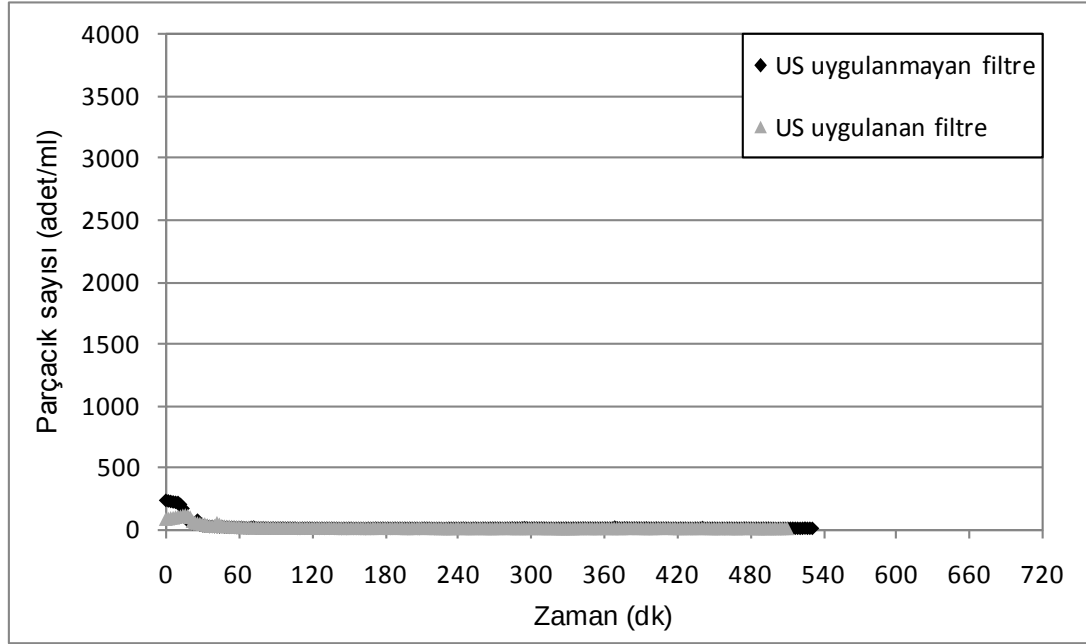


Şekil 5.63. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi

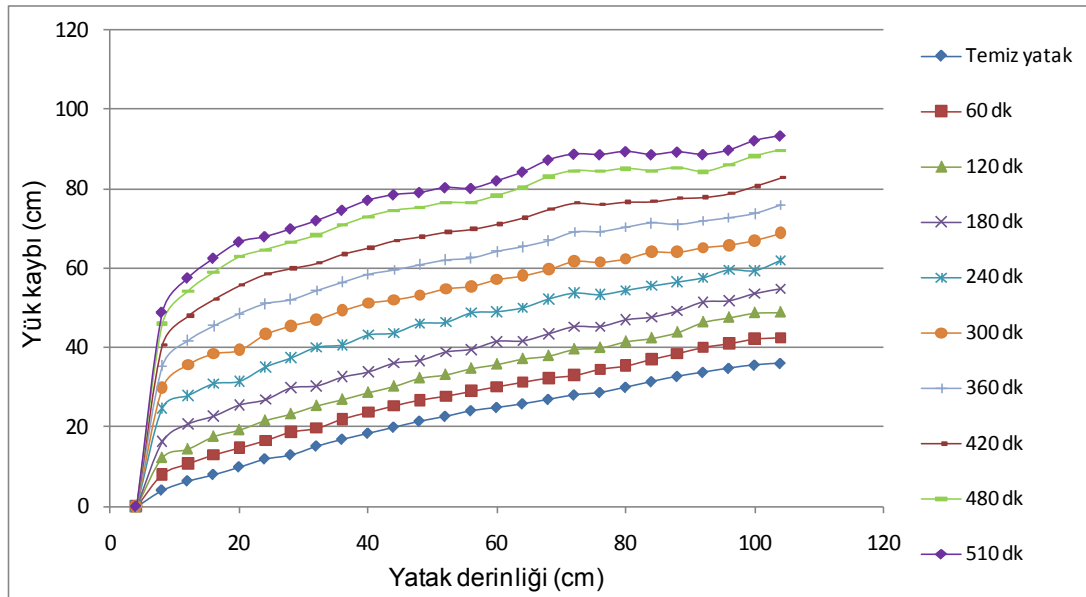
Parçacık giderme verimlerinde, ultrases uygulanmayan filtrede, iki deneyde de standarttan uzaklaşılırken (%99.99 *Cryptosporidium* (4–6 μm) ve % 99.9 *Giardia* (10–12 μm) giderme verimi) ultrases uygulanan filtrede, 2–5 μm aralığı için, 400 ve 13.33 W/l US şiddetlerinde, sırasıyla yüzde 99.21 ve 99.24, 5 μm üzeri boyutlar için ise yüzde 99.97 ve 99.95 gibi standartlara son derece yakın değerlere ulaşılmıştır (şekil 5.65 ve şekil 5.70).



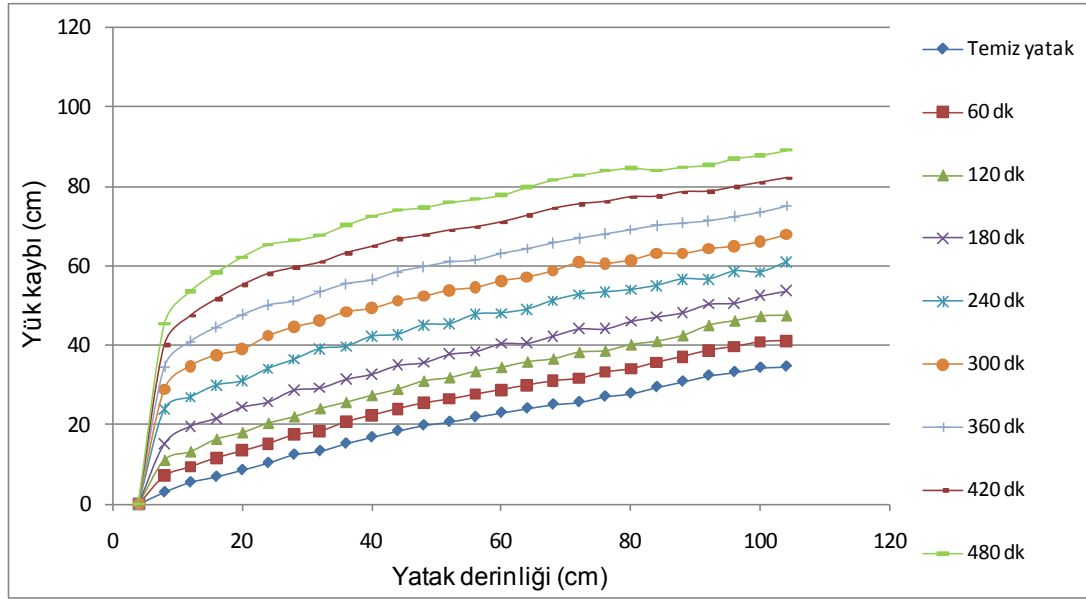
Şekil 5.64. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan 2–5 μm arası parçacık sayısı değişimi



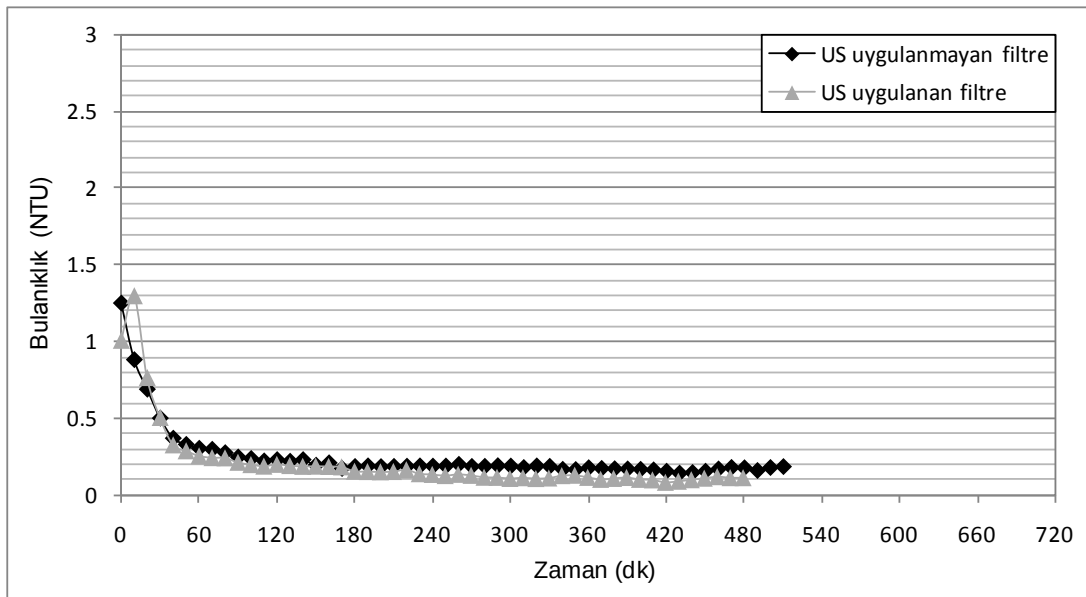
Şekil 5.65. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 8.89 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi



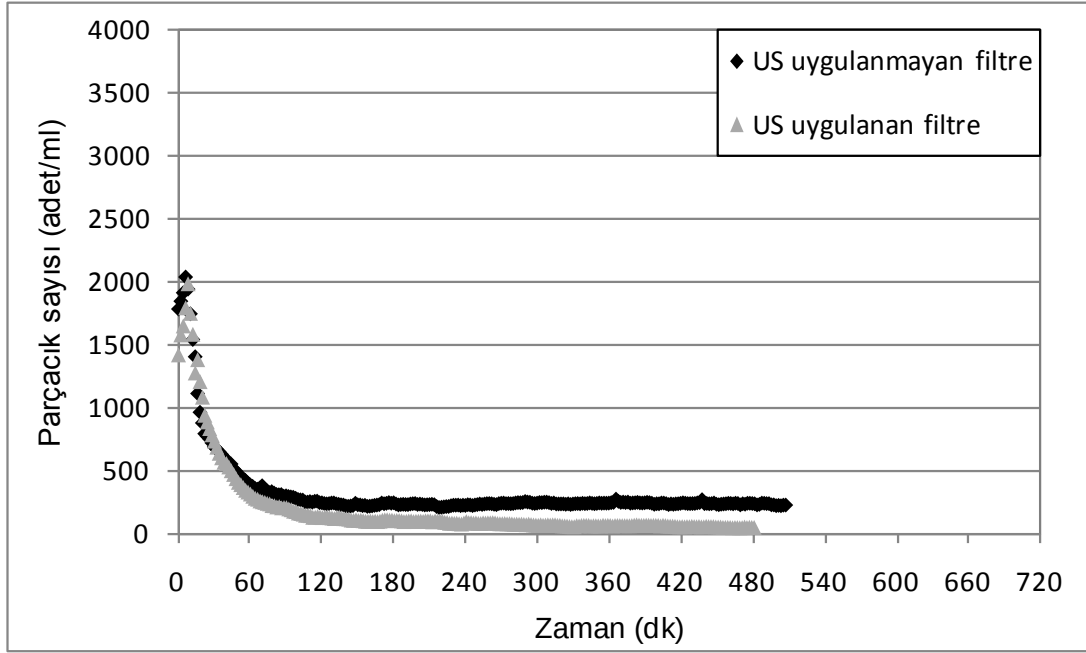
Şekil 5.66. 13.33 W/l US uygulanmadan 7.5 mg/l alum ilavesiyle ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı



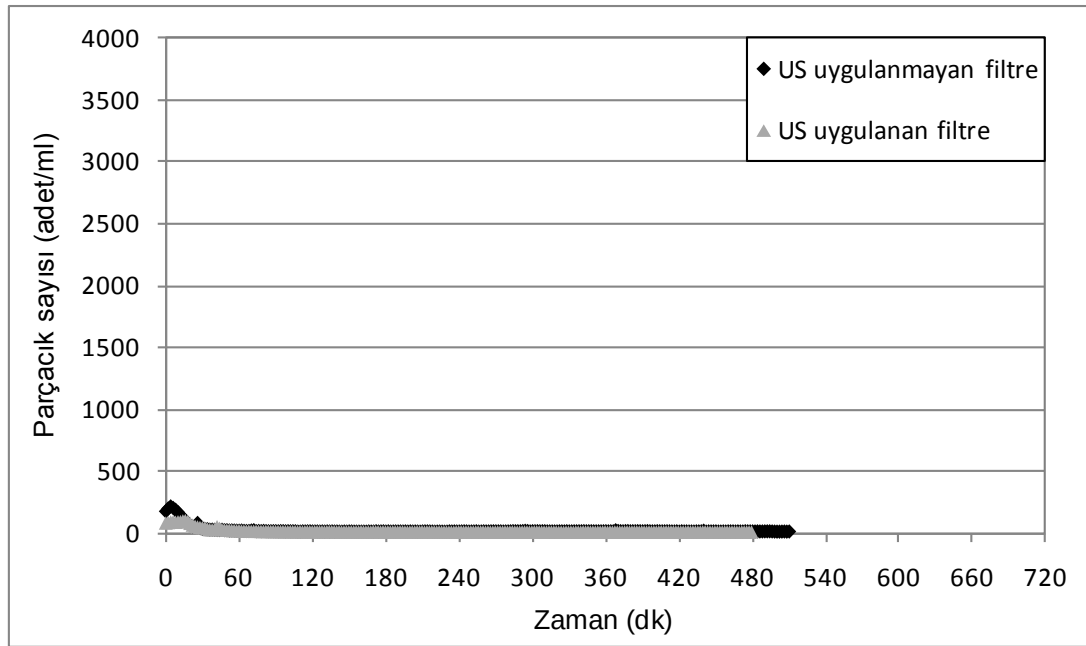
Şekil 5.67. 13.33 W/l US ve 7.5 mg/l alumun birlikte uygulanmasıyla ham su girişli filtrede oluşan yük kaybı



Şekil 5.68. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan bulanıklık değişimi



Şekil 5.69. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan 2-5 µm arası parçacık sayısı değişimi



Şekil 5.70. 7.5 mg/l alum ilavesinden önce 13.33 W/l US uygulanan ve uygulanmayan ham su girişli filtrelerde oluşan 5 µm'den büyük parçacık sayısı değişimi

Tablo 5.1. Deney sonuçları

Giriş suyu	Deney	Yumaklaştırıcı		Filtre 1 (US uygulanmayan filtre)		Filtre 2 (US uygulanan filtre)		
		FeCl ₃ ·6H ₂ O (mg/l)	Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18 H ₂ O (mg/l)	Filtre ömrü (dakika)	Bulanıklık (NTU)	Ultrases (W/l)	Filtre ömrü (dakika)	Bulanıklık (NTU)
Sentetik ham su (kaolin)	D1	-	-	720*	0.74	4.44	720*	0.57
	D2	-	-	720*	0.75	8.89	720*	0.59
	D3	-	-	720*	0.71	13.33	720*	0.63
	D4	5	-	675	0.31	4.44	660	0.28
	D5	7.5	-	600	0.22	4.44	590	0.19
	D6	10	-	330	0.30	4.44	320	0.30
	D7	-	5	660	0.17	4.44	630	0.09
	D8	-	7.5	600	0.18	4.44	585	0.13
	D9	-	10	360	0.16	4.44	360	0.15
	D10	-	5	560	0.75	4.44	540	0.43
Ömerli ham suyu	D11	-	7.5	540	0.60	4.44	530	0.26
	D12	-	10	300	0.71	4.44	290	0.31
	D13	-	7.5	530	0.16	8.89	510	0.09
	D14	-	7.5	510	0.14	13.33	480	0.08

5.3. Filtre Verimlerinin IVES Filtre İndeksi ile Karşılaştırılması

Her deney için, Ives [38] tarafından tanımlanan filtre indeksi (FI) hesaplanmıştır. Filtre indeksi, birçok araştırmacı tarafından işletme parametrelerinin filtre verimine etkisini incelemek amacıyla kullanılmıştır [39, 40].

FI aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$FI = \frac{H.C}{C_0 V_f t} \quad (5.1)$$

C : ortalama filtre çıkış suyu bulanıklığı (NTU)

C₀ : ham su bulanıklığı (NTU)

H : yük kaybı (m)

V_f : filtrasyon hızı (m/saat)

t : filtrasyon süresi

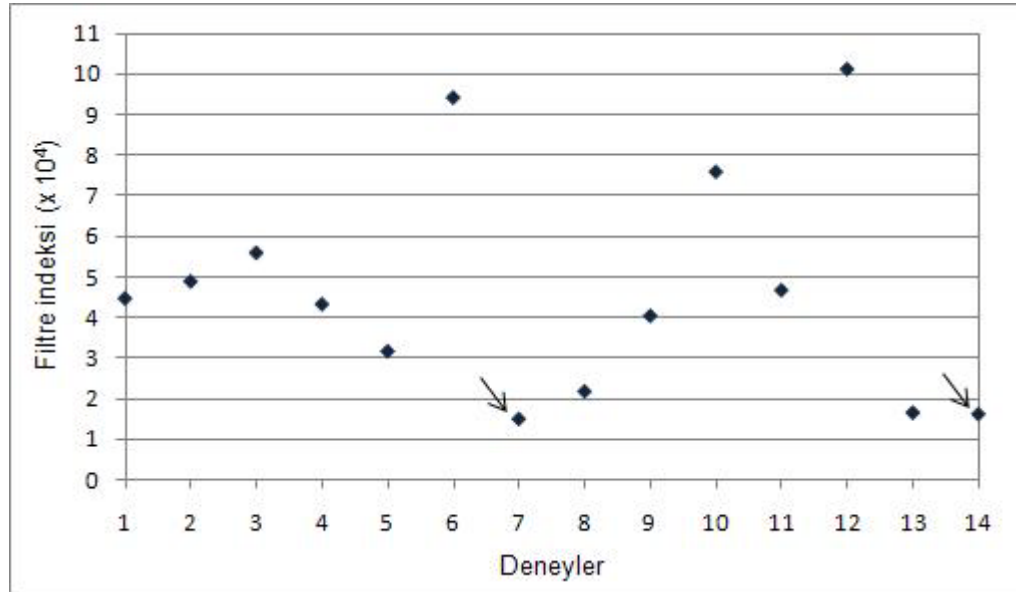
FI değeri ne kadar düşükse, filtre performansı o kadar yüksektir.

Çalışma kapsamında yapılan 14 adet deneyde ultrases uygulanan filtreler için hesaplanan filtre indeksi değerleri, tablo 5.2 ve şekil 5.71’de gösterilmiştir. Filtrasyon hızı ve ham su bulanıklığının tüm deneylerde yaklaşık olarak eşit olmaları sebebiyle yük kayıpları, ortalama filtre çıkış suyu bulanıklıkları ve filtrasyon süreleri, indeks hesabında belirleyici değişkenler olarak seçilmiştir.

Tablo 5.2. Filtre indeksleri

Deney No.	Bulanıklık (NTU)	Filtre ömrü (dakika)	Filtrasyon sonundaki yük kaybı (m)	Filtre indeksi ($\times 10^4$) (boyutsuz)
1	0.57	720*	0.565	4.47
2	0.59	720*	0.597	4.89
3	0.63	720*	0.64	5.60
4	0.28	660	1.02	4.33
5	0.19	590	0.983	3.17
6	0.3	320	1.007	9.44
7	0.09	630	1.042	1.49
8	0.13	585	0.977	2.17
9	0.15	360	0.97	4.04
10	0.43	540	0.955	7.60
11	0.26	530	0.953	4.68
12	0.31	290	0.949	10.14
13	0.09	510	0.932	1.64
14	0.08	480	0.966	1.61

*İlk üç deneydeki filtreler, tıkanmamalarına rağmen, su tankının boşalması nedeniyle 720 dakika sonunda durdurulmuştur.”



Şekil 5.71. Filtre indeksleri

Grafikteki en düşük iki filtre indeksi okla gösterilmiştir. İlk filtre indeks değeri, sentetik ham su ile yapılan ve 5 mg/l alum ile 4.44 W/l ultrasesin birlikte uygulandığı deneye, ikinci değer ise Ömerli ham suyu ile yapılan ve 7.5 mg/l alum ile 13.33 W/l ultrasesin birlikte uygulandığı deneye aittir.

Ömerli ham suyu ile yapılan son iki deneyin filtre indeks değerleri, birbirlerine oldukça yakındır. Aynı yumaklaştırıcı dozlarında, 8.89 W/l'den 13.33 W/l'ye geçildiğinde, önemli bir iyileşme sağlanamamıştır. Bu noktada, ultrases şiddetindeki artışın maliyete etkisi de göz önüne alınmalıdır.

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada ultrasesin direkt filtrasyona etkileri araştırılmıştır. Türkiye'deki içme suyu arıtma tesislerinde yaygın olarak kullanılan alüminyum sülfat ve demir klorür yumaklaştırıcılarını içeren bir pilot tesis işletilmiştir. Parçacık sayısı ve bulanıklık gibi kritik parametreler izlenerek ve yük kayıpları ölçülerek filtre verimi ölçülmüştür.

Çıkış suyu kalitesinin artırılması için yumaklaştırıcı dozajının aşırı derecede artırılması, bilindiği gibi filtre ömrünü kısaltmaktadır. Filtre ömrünün kısa olması geri yıkama ihtiyacını sıklaştırmakta, böylece temiz su şebekesinden ya da ham su rezervuarından alınan geri yıkama suyu tüketimini arttırmaktadır. Daha da önemlisi, fazla yumaklaştırıcı dozunun tıkadığı filtre yatağı, çıkış suyu kalitesinin bozulmasına da sebep olmaktadır. Çıkış suyu kalitesini standartlarda tutmak ve makul filtrasyon süreleri elde etmek için yumaklaştırma yardımcısı olarak çalışmamızda ultrases kullanılmıştır.

Ultrasesin yumaklaştırmaya yardımcı olduğu, literatürdeki bazı çalışmalarda bulunmaktadır. Ayrıca içme suyu filtrasyonunda patojen mikroorganizmaların da giderilmesine yardımcı olacaktır.

Çalışmamızdaki deney şartlarında sentetik ham su ile yapılan ilk aşama deneylerinde;

- Yumaklaştırıcı ile birlikte ultrases kullanılması filtre ömrüne belirgin olarak etki etmemekle birlikte sadece yumaklaştırıcı kullanılmasına oranla çıkış suyu bulanıklık ve parçacık giderme verimlerini arttırmıştır.
- Çıkış suyu kalitesinin ultrases şiddetine bağlı olduğu görülmüştür. Ultrases şiddetinin 4.44 W/l'den 8.89 ve 13.33 W/l'ye yükseltilmesi, çıkış suyunda bulanıklığı arttırmış, parçacık giderme verimini düşürmüştür.

- Ultrases alum ile birlikte kullanıldığında, aynı dozlarda demir klorüre göre daha iyi kalitede çıkış suyu elde edilmiştir.
- 5 mg/l alum ve 4.44 W/l ultrases birlikte kaolinli suya filtrasyon öncesinde uygulandığında en düşük filtre indeksi elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci aşamasında, İstanbul Anadolu yakasının, Avrupa yakasının bir kısmının ve Kocaeli’de Gebze ve Darıca yerleşim merkezlerinin su ihtiyacını karşılayan Ömerli Barajı’ndan alınan ham su kullanılmıştır.

Bu deneylerde alınan sonuçlara göre;

- Optimum yumaklaştırıcı miktarı ve türü olarak 7.5 mg/l alum seçilmiştir. Sadece yumaklaştırıcı kullanıldığında hem bulanıklık hem de parçacık sayısında çıkış suyunda, içme suyu standartlarına ulaşamamıştır.
- Su kalitesi standartlarına, en yakın şekilde, ancak yumaklaştırıcı ile birlikte 8.89 W/l ultrases uygulandığında ulaşılabilmiştir.
- Ultrases şiddetinin 8.89 W/l’nin üzerine çıkarılması, filtrasyon verimini etkilememiştir.

Literatürde US kullanımının optimizasyonu ile ilgili pek çok laboratuvar ölçekli çalışma yer almaktadır. Ancak, US kısıtlı etki alanı nedeniyle çok büyük su kütleleri üzerinde yeterli olamadığından büyük ölçekli uygulamalar için elverişli değildir. Ayrıca rezervuarların içerisindeki etkime süresini kontrol etmek de zordur. Ultrases problemlerinin büyük ölçekli sistemlerde kullanılabilmesi için küçük ölçekli testlerde belirlenen parametrelerin esas alınması uygun olacak ve bu problemlerin boru hatlarına kurulması US’nin daha etkili çalışmasını sağlayacaktır. Çalışmamızda pilot ölçekli bir filtrasyon ünitesinde optimum US ve yumaklaştırıcı kombinasyonu belirlenmiş olsa da, US’nin uygulandığı rezervuar US probuna yakın ölçülerde dizayn edilmiştir.

Böylece US'nin etkisinin büyük ham su rezervuarı içerisinde kaybolmasının önüne geçilmiştir.

Bu çalışmalar sonucunda ultrasesin uygulandığı aşağıdaki devam deneyleri yapılabilir.

- Farklı özelliklerde ham sular denenebilir.
- Ultrases farklı temas sürelerinde uygulanabilir.
- Bu çalışmadaki çıkış suyu parçacık sayısının takip edilmesinden farklı olarak patojen mikroorganizma sayısı ve giderimi takip edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] S. Hatukai, Y. Ben-Tzur, M. Rebhun, 1997. "Particle counts and size distribution in system design for removal of turbidity by granular deep bed filtration", *Water Science and Technology*, 36 (4), 225–230.
- [2] Y. Amirsardari, P. Williams, 1997. "Effects of ozonation and coagulation on turbidity and TOC removal by simulated direct filtration for potable water treatment", *Environmental Technology*, 18 (11), 1143–1150.
- [3] J. Hrubec, 1995. *Quality and Treatment of Drinking Water*, 83–141. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- [4] V. Eroğlu, 1995. *Su Tasfiyesi*, 72–288. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, Türkiye.
- [5] J. L. Cleasby, K. J. Ives, A. M. Saatçi, 1979. *İçmesuyu Tasfiyesinde Filtrasyon*. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, Türkiye.
- [6] L. Coccagna, O. Conio, G. Ziglio, 1998. "Particulates removal from surface water", Unpublished Research Report. AMGA, Genova, Italy.
- [7] F. L. Evans, 1972. *Ozone: Its Manufacture, Properties and Uses*. Van Nostrand Publisher, New York, USA.
- [8] W. H. Glaze, 1987. "Drinking-water treatment with ozone", *Environmental Science and Technology*, 21, 224–230.
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>, Erişim tarihi: 10.06.2011, Saat: 12:35

- [10] P. Riesz, T. Kondo, C. M. Krishna, 1990. "Sonochemistry of volatile and non-volatile solutes in aqueous solutions: e.p.r. and spin trapping studies", *Ultrasonics*, 28 (5), 295–303.
- [11] I. Hua, E. J. Thompson, 2000. "Inactivation of *Escherichia coli* by sonication at discrete ultrasonic frequencies". *Water Resources*, 34 (15), 3888–3893.
- [12] P. Riesz, D. Berdahl, L. Christman, 1985. "Free radical generation by ultrasound in aqueous and nonaqueous solutions", *Environmental Health Perspectives*, 64, 233–252.
- [13] P. Riesz, T. Kondo, 1992. "Free radical formation induced by ultrasound and its biological implications", *Free Radical Biology and Medicine*, 13, 247–270.
- [14] K. Makino, M. M. Mossoba, P. Riesz, 1982. "Chemical effects of ultrasound on aqueous solutions. Evidence of $\cdot\text{OH}$ and $\cdot\text{H}$ by spin trapping", *Journal of the American Chemical Society*, 104 (12), 3537–3539.
- [15] K. S. Suslick, 1990. "Sonochemistry", *Science*, 247, 1439–1445.
- [16] R. A. Brizzolara, E. R. Holm, D. M. Stamper, 2006. *Disinfection of Water by Ultrasound: Application to Ballast Water Treatment*. US Navy Survivability, Structures and Materials Department, Maryland, USA.
- [17] H. Kunio, M. Hiroshi, 2002. "Ultrasonic water treatment by using squeeze-film effect: water treatment systems consisting of ultrasonic sterilizing cells in series and parallel", *Nippon Kikai Gakkai Kankyo Kogaku Sogo Shinpojiumu Koen Ronbunshu*, 12, 309–310.

- [18] A. J. Rachwal, M. J. Bauer, J. T. West, 1988. “Advanced techniques for upgrading large scale slow sand filters”, *Slow Sand Filtration—Recent Developments in Water Treatment Technology*. Horwood Publishing, Chichester, UK.
- [19] T. J. Mason, A. Tiehm, 2001. *Advances in Sonochemistry – First Edition, Volume 6: Ultrasound in Environmental Protection*. JAI Press, Connecticut, USA.
- [20] G. Scherba, R. M. Weigel, and W. D. O'Brien Jr., 1991. “Quantitative assessment of the germicidal efficacy of ultrasonic energy”, *Applied and Environmental Microbiology*, 57 (7), 2079–2084.
- [21] M. Nakanishi, S. Mukai, I. Kimata, M. Iseki, Y. Maeda, 2001. “Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts in drinking water by high-intensity ultrasonic waves”. In *Proceedings of AWWA Annual Conference*, Washington, DC, USA.
- [22] S. S. Phull, A. P. Newman, J. P. Lorimer, B. Pollet, T. J. Mason, 1997. “The development and evaluation of ultrasound in the biocidal treatment of water”, *Ultrasonics Sonochemistry*, 4 (2), 157–164.
- [23] J. Thacker, 1973. “An approach to the mechanism of killing of cells in suspension by ultrasound”, *Biochimica et Biophysica Acta*, 304, 240–248.
- [24] G. R. Burlison, T. M. Murray, M. Pollard, 1975. “Inactivation of viruses and bacteria by ozone, with and without sonication”, *Applied Microbiology*, 29 (4), 340–344.
- [25] E. Dahi, 1976. “Physicochemical aspects of disinfection of water by means of ultrasound and ozone”, *Water Resources*, 10, 677–684.

- [26] E. N. Ali, S. A. Muyibi, H. M. Salleh, M. Z. Alam, M. R. M. Salleh, 2010. "Production of natural coagulant from moringa oleifera seed for application in treatment of low turbidity water", *Water Resource and Protection*, 2 (3), 259–266.
- [27] A. Ndabigengesere, K. S. Narasiah, B. G. Talbot, 1995. "Active agents and mechanism of coagulant of turbid waters using *Moringa oleifera*", *Water Research*, 29 (2), 703–710.
- [28] S. A. Muyibi, L. M. Evison, 1995. "Optimizing physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Moringa oleifera* seeds", *Water Research*, 29 (12), 2689–2695.
- [29] T. Okuda, A. U. Baes, W. Nishijima, M. Okada, 1999. "Improvement of extraction method of coagulation active components from *Moringa oleifera* seed", *Water Research*, 33 (15), 3373–3378.
- [30] AWWA, 1990. *Water Quality and Treatment – Fourth Edition*. McGraw–Hill, New York, USA.
- [31] C.–J. Chuang, K.–Y. Li, 1997. "Effect of coagulant dosage and grain size on the performance of direct filtration", *Separation and Purification Technology*, 12 (3), 229–241.
- [32] F. Amini, H. V. Truong, 1998. "Effect of filter media particle size distribution on filtration efficiency", *Water Quality Research Journal of Canada*, 33 (4), 589–594.
- [33] US EPA, 2001a. *Occurrence Assessment for the Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment and Filter Backwash Recycling Rule*. Office of Ground Water and Drinking Water.

- [34] A. M. Saatçi, E. Yüksel, M. Eyvaz, H. Deniz, T. S. Aktaş, 2010. “Pre-ozonation–coagulant interactions in direct filtration”, *Water Quality Research Journal of Canada*, 45 (3), 317–326.
- [35] G. Zhang, P. Zhang, F. Maohong, 2009. “Ultrasound–enhanced coagulation for *Microcystis aeruginosa* removal”, *Ultrasonics Sonochemistry*, 16 (3), 334–338.
- [36] H., Hao, W. Wu, Y. Chen, J. Tang, Q. Wu, 2004. “Cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation at 20 kHz and 1.7 MHz”, *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 39 (6), 1435–1446.
- [37] L. Henga, N. Juna, H. Wen–jieb, L. Guibaia, 2009. “Algae removal by ultrasonic irradiation–coagulation”, *Desalination*, 239 (1–3), 191–197.
- [38] K. J. Ives, 1978. “A new concept of filterability”, *Water Science and Technology*, 10 (5), 123–137.
- [39] A. Amirtharajah, S. L. Trusler, 1986. “Destabilization of particles by turbulent rapid mixing”, *Journal of Environmental Engineering*, 112 (6), 1085–1108.
- [40] S.–F. Kang, C.–C. Shieh, T.–H. Chiang, 1999. “Filtration performance of a plastic–sand dual–media filter”, *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 34 (7), 1533–1552.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında İstanbul’da doğan Mehmet Buğra ZENGİ, ilk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı. 2008 yılında Kocaeli Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenimini tamamladı. 2008–2009 yılı güz döneminde Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Çevre Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans programına kabul edildi. Halen yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.