

DOĞAL TAŞ ATIKSULARININ FLOKÜLASYON/KOAGÜLASYON
YÖNTEMİYLE ARITILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYŞE MİNE ALPTEKİN

Danışman
Doç. Dr. Bahri ERSOY

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2006

“Bu tez çalışması “031.MUH.02” numaralı proje olarak A.K.Ü BAPK tarafından desteklenmiştir.”

T.C.
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞAL TAŞ ATIKSULARININ FLOKÜLASYON/KOAGÜLASYON
YÖNTEMİYLE ARITILMASI

AYŞE MİNE ALPTEKİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman
Doç. Dr. Bahri ERSOY

AFYONKARAHİSAR
2006

ONAY SAYFASI

.....'nın yüksek lisans tezi olarak hazırladığı

“.....” başlıklı bu çalışma, lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

... / ... /

Jüri Üyesi :
(Başkan)

Jüri Üyesi :
(Danışman)

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nunGün
vesayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
FORMÜLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Flokülasyon.....	4
2.1.1 Flokülasyonun Tanımı ve Flokülant Türleri.....	4
2.1.2 Flokülasyon Mekanizmaları.....	7
2.1.2.1 Polimer Köprü Teşekkülü ile Flokülasyon.....	7
2.1.2.2 Elektrostatik Yük Yamama (Electrostatic Charge Patch) Yöntemiyle Flokülasyon.....	8
2.1.3 Flokülantın Tane Yüzeyine Adsorplanması.....	9
2.1.3.1 Elektrostatik Adsorplanma	9
2.1.3.2 Kovalent Bağı Oluşumu ile Adsorplanma (iyon köprüsü).....	10
2.1.3.3 Hidrojen Bağı Oluşumu ile Adsorplanma.....	10
2.1.4. Flokülasyona Etki Eden Parametreler.....	11
2.1.4.1 Flokülant Tipi.....	12
2.1.4.2 Süspansiyon pH'sı, Sıcaklığı ve İyonik Şiddeti	12
2.1.4.3 Flokülant Dozajı.....	13
2.1.4.4 Süspansiyon Karıştırma Hızı ve Karıştırma Süresi.....	14
2.1.4.5 Süspansiyondaki Katı/Sıvı Oranı, Katının Tane Boyutu ve Tane Şekli.....	14
2.2 Koagülasyon.....	15
2.2.1 Koagülasyonun Tanımı ve Koagülant Türleri.....	15

2.2.2 Koagülasyon Mekanizmaları.....	17
2.2.2.1 Yük Nötralizasyonu ile Koagülasyon.....	17
2.2.2.2 Süpürme Koagülasyonu (Sweep Coagulation).....	18
3. MALZEME ve METOT	19
3.1 Malzeme.....	19
3.1.1 Flokülantlar, Koagülantlar ve Diğer Kimyasallar.....	19
3.1.2 Fabrikadan Alınan Orijinal Mermer ve Traverten Atıksu Numuneleri.....	20
3.1.3 Flokülasyon/Koagülasyon Deneylerinde Kullanılan Çeşme Suyunun ve Saf Suyun Özellikleri.....	20
3.1.4 Orijinal Haldeki Mermer ve Traverten Atıksularının Özellikleri.....	21
3.2 Doğal Taşların Özelliklerinin Belirlenmesi.....	21
3.2.1 Mermer ve Traverten Tozlarının Mineralojik (XRD), Tane Boyut Dağılımı ve Kimyasal Analizleri.....	21
3.2.2 Mermer ve Traverten Tozlarının Yüzey Elektriksel Özelliklerinin Tespiti	23
3.3. Metot.....	24
3.3.1 Flokülasyon Testleri.....	24
3.3.2 Koagülasyon Testleri.....	26
3.3.3 Koagülasyon + Flokülasyon Testleri.....	27
3.3.4 Bulanıklık Ölçümü.....	27
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	28
4.1 Mermer ve Traverten Tozunun pH'ya Göre Zeta Potansiyeli.....	28
4.2 Mermer Süspansiyonunun Flokülasyonu	28
4.2.1 Flokülant tipinin (Katyonik, Anyonik, Noniyonik) Flokülasyona Etkisi.....	28
4.2.2 Flokülant Mol Ağırlığının Flokülasyona Etkisi.....	32
4.2.3 Flokülant Yük Yoğunluğunun (Anyoniklik Derecesinin) Flokülasyona Etkisi.....	35
4.2.4 pH'nın Flokülasyona Etkisi.....	38
4.3 Traverten Süspansiyonunun Flokülasyonu.....	40

4.3.1 Flokölant Tipinin (Katyonik, Anyonik, Noniyonik) Flokölasyona Etkisi.....	40
4.3.2 Flokölant Mol Ağırlığının Flokölasyona Etkisi.....	43
4.3.3 Flokölant Yük Yoğunluğunun (Anyoniklik Derecesinin) Flokölasyona Etkisi.....	46
4.3.4 pH'nın Flokölasyona Etkisi.....	49
4.4 Traverten Süspansiyonunun Koagölasyonu.....	52
4.4.1 Koagölant Tipinin Koagölasyona Etkisi.....	52
4.4.2 pH'nın Koagölasyona Etkisi.....	54
4.5 Koagölant Katkısının Traverten Süspansiyonunun Flokölasyonuna Etkisi (Koagölasyon+Flokölasyon).....	57
5. SONUÇLAR.....	63
KAYNAKLAR.....	66
EKLER	
TEŞEKKÜR	
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Bu çalışmada, doğal taşların işlenmesi sırasında açığa çıkan süspansiyon halindeki mermer ve traverten gibi doğal taş (DT) atıksularının flokülasyon ve koagülasyon yöntemleriyle arıtılması işleminde flokülasyon ve koagülasyon mekanizmalarının açıklanmasına çalışılmıştır. Deneylede, poliakrilamid (PAA) esaslı anyonik, katyonik ve noniyonik flokülantlar ile çeşitli koagülantlar kullanılmıştır. Orijinal haldeki DT atık suyunu temsilen ise mermer ve traverten süspansiyonu kullanılmıştır. DT atık sularının arıtım performansları ise topaklanmış (floküle veya koagüle olmuş) süspansiyonun çökelme hızı ile çökelme sonrası ortaya çıkan temiz suyun bulanıklık verileri kullanılarak değerlendirilmiştir.

İlk aşamada, mermer ve traverten tozlarının pH'ya bağlı zeta-potansiyel ölçümleri, mineralojik, kimyasal ve tane boyut analizleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise flokülasyon, koagülasyon ve “koagülasyon+flokülasyon” metotları ile DT atıksularında çökelme (sedimentasyon) testleri yapılmıştır. Çökeltme testleri kapsamında, flokülant tipinin, molekül ağırlığının, anyoniklik derecesinin, dozajın ve süspansiyon pH'sının DT süspansiyonunun flokülasyonu üzerine etkileri incelenmiştir. Bunun sonucunda flokülasyonda etkin olan mekanizma ve flokülasyon için optimum şartlar belirlenmiştir. Daha sonra traverten süspansiyonunda, koagülant tipi, dozaj ve pH parametreleri üzerinde çalışılmış ve bunların sonucunda koagülasyon mekanizmaları ortaya çıkartılmıştır. Bunlara ilave olarak traverten süspansiyonuna “koagülasyon+flokülasyon” metotları uygulanmıştır. Sonuç olarak flokülasyon ve koagülasyon gibi topaklanma (aggregation) teknikleri kullanılarak, DT atık sularının arıtılması için en iyi yöntem ve şartlar belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mermer, Traverten, Atıksu, Flokülasyon, Koagülasyon, Çökelme Hızı, Bulanıklık, Polimer (Flokülant)

ABSTRACT

In this study, flocculation and coagulation mechanisms in purification of natural stone (i.e., marble and travertine) wastewaters in suspension form resulting from processing of natural stones have been tried to explain. In the experiments, polyacrylamide based anionic, cationic and nonionic flocculants and different type coagulants were used and two different types of natural stone suspensions (NSS), marble suspension and travertine suspension, were used as representative samples for original natural stone wastewaters. Purification performances of NSS were assessed under the data of settling rate of flocculated suspension and that of turbidity of clean water obtained after each settling test.

In the first step, zeta potential measurements of marble and travertine powders in water versus pH and their mineralogical, chemical and particle size analysis were done. In the second step, sedimentation tests using flocculation, coagulation and "coagulation + flocculation" methods have been applied on the NSS. In the scope of sedimentation tests, firstly the effects of flocculant type, molecular weight, charge density (anionicity degree), and dosage and suspension pH on flocculation of natural stone suspensions (NSS) were investigated. Consequently, optimum conditions and dominant mechanism for their flocculation were determined. Then, coagulant type, dosage and pH parameters were studied on travertine suspension, and accordingly, coagulation mechanism(s) of NSS were determined. In addition, "coagulation and flocculation" method has been applied on travertine suspension. As a result, the best method or methods and condition(s) to clarify natural stone wastewaters using aggregation techniques such as flocculation and coagulation were determined.

Key words: Marble, Travertine, Wastewater, Flocculation, Coagulation, Settling Rate, Turbidity, Polymer (Flocculant)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>sayfa</u>
1.1 Mermer Atıksu Arıtma Tesisi.....	2
2.1 Poliakrilamid (PAA) esaslı non-iyonik flokülantın yapısı.....	5
2.2 PAA esaslı anyonik flokülantın (Na-Poliakrilat) yapısı.....	5
2.3 PAA esaslı katyonik bir flokülant olan Kuaterneraminli Poliakrilamid'in yapısı.....	6
2.4 Polimer köprü teşekkülü ile askıda katı tanelerin flokülasyonu.....	8
2.5 Elektrostatik yük yamaması (Electrostatic charge patch) yöntemiyle flokülasyon.....	9
2.6 Anyonik flokülantın pozitif yüklü katı yüzeyine elektrostatik çekim kuvvetleri yardımıyla adsorplanması.....	10
2.7 Süspansiyondaki katı partikül (mineral) yüzeyindeki Ca^{+2} iyonu ile anyonik flokülant arasındaki kovalent bağ (katyonik köprü) oluşumu.....	10
2.8 Polimer molekülü ile mineral arasında H-bağı oluşumu.....	11
2.9 Flokülantın iyoniklik derecesinin flokülant yapısına etkisi.....	12
2.10 Aşırı flokülant dozajında tanelerin yeniden disperse hale gelmesi (flokülantların sterik engel oluşturması).....	14
2.11 Bir süspansiyondaki disperse partiküllerin koagülasyonu.....	15
2.12 Yük Nötralizasyonu ile koagülasyon.....	17
2.13 Süpürme Koagülasyonu (Sweep Coagulation).....	18
3.1 Akşehir Siyah Mermerin XRD pikleri (K=Kalsit).....	22
3.2 Denizli Traverten tozunun XRD pikleri (K=Kalsit).....	22
3.3 Zeta Metre Cihazı.....	24
3.4 Flokülant katkısı öncesi mermer tozu süspansiyonu.....	25
3.5 Flokülant katkısı sonrası 15 dk beklemiş numune	25
3.6 Flokülasyon ve Koagülasyon deneylerinin şeması.....	26
3.7 Türbidimetre Cihazı.....	27
4.1 Mermer ve traverten tozunun pH'ya göre zeta potansiyel eğrileri.....	28
4.2 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5'da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında dozaja bağlı çökme hızı eğrileri.....	29

4.3	Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında dozaja bağlı bulanıklık eğrileri.....	31
4.4	Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında zamana göre sabit dozajda (1.5 mg/L) ara yüzey yüksekliği eğrileri.....	32
4.5	Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülantlar varlığında dozaja bağlı çökeltme hızı eğrileri.....	33
4.6	Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülantlar varlığında dozaja bağlı bulanıklık eğrileri.....	34
4.7	Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülantlar varlığında zamana göre sabit dozajda (1.5 mg/L) ara yüzey yüksekliği eğrileri.....	35
4.8	Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlar varlığında dozaja bağlı çökeltme hızı eğrileri.....	36
4.9	Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlar varlığında dozaja bağlı bulanıklık eğrileri.....	37
4.10	Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da, sabit dozajda (1.5 mg/L), değişik yük yoğunluğundaki flokülantlar varlığında zamana göre ara yüzey yüksekliği eğrileri.....	38
4.11	Mermer tozu süspansiyonunun, 1.5 mg/L sabit flokülant dozajında pH’a bağlı çökeltme hızının değişimi eğrileri.....	39
4.12	Mermer tozu süspansiyonunun 1.5 mg/L sabit flokülant dozajında pH’a bağlı bulanıklık değişimi eğrileri.....	40
4.13	Traverten tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında dozaja bağlı çökeltme hızı eğrileri.....	41
4.14	Traverten tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında dozaja bağlı bulanıklık eğrileri.....	42
4.15	Traverten tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülant katkısıyla yapılan flokülasyon da zamana göre sabit dozajda (1.5 mg/L) ara yüzey yüksekliği eğrileri.....	43
4.16	pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülant ilavesi ile yapılan flokülasyon da dozaja bağlı çökeltme hızı eğrileri.....	44

4.17	pH 7.5'da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülant ilavesi ile yapılan flokülasyon da dozaja bağlı bulanıklık eğrileri.....	45
4.18	pH 7.5'da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülant ilavesi ile yapılan flokülasyon da zamana göre sabit dozajda (1.5 mg/L) ara yüzey yüksekliği eğrileri.....	46
4.19	pH 7.5'da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlarla yapılan flokülasyonda dozaja bağlı çökelme hızı eğrileri.....	47
4.20	pH 7.5'da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlarla yapılan flokülasyonda dozaja bağlı bulanıklık eğrileri.....	48
4.21	pH 7.5'da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlarla yapılan flokülasyonda sabit dozajda (1.5 mg/L) zamana göre ara yüzey yüksekliği eğrileri.....	49
4.22	1.5 mg/L sabit flokülant dozajında değişik pH'larda yapılan flokülasyonda pH'a göre çökelme hızı eğrileri.....	50
4.23	1.5 mg/L sabit flokülant dozajında değişik pH'larda yapılan flokülasyonda pH'a göre bulanıklık eğrileri.....	51
4.24	pH 7.5'da her bir koagülant (Alüm, AlCl ₃ , FeCl ₃) varlığında dozaja göre çökelme hızı (Vs) eğrileri.....	52
4.25	pH 7.5'da her bir koagülant (Alüm, AlCl ₃ , FeCl ₃) varlığında dozaja göre bulanıklık eğrileri.....	53
4.26	pH 7.5'da ve 50 mg/L dozajda her bir koagülant (AlCl ₃ , Alüm, FeCl ₃) varlığında zamana göre ara yüzey yüksekliği eğrileri.....	53
4.27	50 mg/L sabit dozajda her bir koagülant varlığında pH'da göre çökelme hızı eğrileri.....	54
4.28	50 mg/L sabit dozajda her bir koagülant varlığında pH'ya bağlı bulanıklık eğrileri.....	55
4.29	pH 9'da 1.3 mg/L sabit spk 508 varlığında koagülant dozajına göre çökelme hızı eğrileri.....	57
4.30	pH 9'da 1.3 mg/L sabit spk 508 varlığında değişik koagülant dozajına göre elde edilen bulanıklık eğrileri.....	59
4.31	pH 9'da spk 508 ile yapılan flokülasyon da dozaja göre çökelme hızı eğrisi....	60
4.32	pH 9'da spk 508 ile yapılan flokülasyonda dozaja göre bulanıklık eğrisi.....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>sayfa</u>
2.1 Flokülantların Molekül Ağırlıklarına Göre Sınıflandırılması.....	7
3.1 Deneylede Kullanılan Flokülantlar ve Özellikleri.....	19
3.2 Deneylede Kullanılan Koagülantlar ve Özellikleri.....	20
3.3 Orijinal Haldeki Mermer ve Traverten Atıksularının Özellikleri	21
3.4 Traverten ve Mermer Tozunun Kimyasal Analiz Sonuçları.....	23

FORMÜLLER DİZİNİ

<u>Formül</u>	<u>sayfa</u>
2.1 Süspansiyon pH'sının Flokülasyona Etkisi.....	13

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

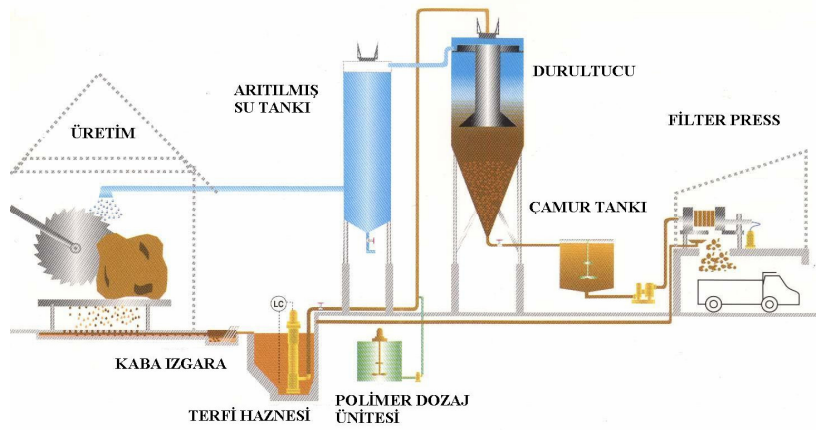
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
Any.	Anyonik
DT	Doğal Taş
Kat.	Katyonik
Non.	Non iyonik
NTU	Nepheleometric Turbidity Unit
PAA	Poliakrilamid
PAK	Polialüminyum Klorit
POE	Polietilen Oksitler
PVA	Polivinil Alkol
VdW	Van der Walls
XRD	X-Ray Diffraction

GİRİŞ

Türkiye'nin mermer şehri olan Afyonkarahisar ve bölgesindeki işletmelerde doğal taş (mermer, traverten vb.) blok ve plakalarının işlenmesi (kesilmesi ve parlatılması) sırasında ortaya çıkan doğal taş (DT) tozu miktarının yılda yaklaşık 150.000 ton civarında olduğu tahmin edilmektedir (Ersoy 2003). Önenç'in (2001) çalışmasına göre 1 m³'lük (yaklaşık 3 ton ağırlığında) bir blok'un işlenmesi sırasında açığa çıkan toz miktarı, bloktan elde edilecek plaka kalınlığına bağlı olarak, blok ağırlığının %30-40'ı arasında değişmektedir (Önenç 2001). Mermer işletmelerinde ince boyutlu toz atıklar katrak veya S/T gibi blok mermer kesiminden, yan kesme ve baş kesme makinelerinin kullanımından ve bunun yanında silme ve cilalama işlemlerinden ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen bu tozların iri boyutlu olanları (0.1–2 mm) atık havuzuna giderken kanallarda yerçekimi (gravitasyon) kuvvetiyle kendiliğinden çökmektedir. Daha ince boyutlu (<0.1 mm) olanlar ise su içerisinde askıda kalmaktadır. Askıda kalan bu ince boyutlu mermer tozları ise genelde çöktürme tankında flokülant veya koagülant ilavesiyle çöktürülebilmekte ve böylece katı tanelerden arındırılmış veya askıda katı miktarı en aza indirilmiş temiz su elde edilebilmektedir. Elde edilen bu temiz su ise yeniden mermer işlenmesinde kullanılabilir. İyi bir arıtma yapılamaması durumunda sistemde yeniden kullanılan bu su içerisinde koloidal boyutlu (<1µm) katı partiküller bulunabilmekte, bu da özellikle cilalama işlemlerini olumsuz etkileyebilmekte ve bunun yanında borularda tıkanmalara sebep olmaktadır (Acar 2001). Bunu engellemek için uygulanan arıtmaların başında flokülasyon yöntemiyle çöktürme (sedimentasyon) gelmektedir. Şekil 1.1'de flokülasyon yöntemi ile çalışan bir DT atıksu arıtma tesisi görülmektedir.

Genel olarak atıksuların çöktürme işleminde flokülasyondan başka koagülasyon yöntemi de uygulanabilmektedir ancak ağırlıklı olarak flokülasyon yöntemi tercih edilmektedir. Koagülasyon ve flokülasyon terimleri kelime manası olarak esasen aynı şeyi ifade etmekte olup herhangi bir sıvı içerisinde çökmeden askıda duran ve bu nedenle bulanıklığa sebep olan koloidal boyutlu katı tanelerin bir araya getirilmesi (kümeleşmesi) demektir. Koagülasyonda bu kümeleşme işlemi ortama katılan çok değerlikli inorganik elektrolitler (koagülantlar) yardımı ile

gerçekleşirken, flokülasyonda ise bu kümeleşme işlemi ortama katılan yüksek molekül ağırlıklı organik elektrolitler diğer adıyla polimerler veya flokülantlar ile gerçekleştirilmektedir. Flokülant veya koagülant ilavesinden sonra kümeleşen askıda katı maddeler yerçekimi etkisi ile dibe çökmekte ve arındırılmış su yüzeyden alınmaktadır. Sulardaki ve sanayi atıksularındaki bulanıklığın giderilmesinde koagülasyon veya flokülasyon veya bu iki yöntemin kombinasyonu olan “koagülasyon+flokülasyon” yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1.1 Mermer atık su arıtma tesisi.

DT atıksularının flokülasyon veya koagülasyon yöntemiyle arıtılmasında incelenen iki önemli parametre vardır. Bunlar, floküle olmuş katı partiküllerin çökme hızı ve çökme sonrası temiz suyun bulanıklığıdır. İyi bir arıtım için çökme hızının yüksek, bulanıklığında düşük olması gerekir. Çökme hızının en iyi olduğu şartlar (flokülant/koagülant tipi, ortam pH'sı vb.) bir çok kez bulanıklık için de en iyi sonucu (en az bulanıklık) vermemektedir ki bu durum koagülasyon ve/veya flokülasyon mekanizmasının zannedildiğinden daha kompleks olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Literatürdeki birçok çalışma bu hususu desteklemektedir (Werneke 1979, Gregory 1989, Ersoy 2005). Koagülasyon ve/veya flokülasyon uygulanan tesis için bulanıklık veya çökme hızından hangisi daha önemli ise o daha ön planda tutularak koagülasyon/flokülasyon şartları optimize edilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan Alüm, Demir Klorür ve Alüminyum Klorür en yaygın kullanılan koagülantlar olup su ve atıksulardaki humik asit vb. tür organik kolloidlerden kaynaklanan bulanıklığın giderilmesinde (Franceschi et all. 2002, Gabelich et all. 2002, Gregory et all. 1997, Cheng 2002, Özbelge vd. 2002), tekstil atık suyundan (Kim et all. 2003) ve çeşitli kimyasal proses atık suyundaki (Al-Malack et all. 1999, Poon and Chu 1999) kolloidal boyutlu katılardan kaynaklanan bulanıklığın giderilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca bu tür koagülantlar farklı kil süspansiyonlarının (Ching et all. 1994, Pierre and Ma 1997, Pierre and Ma 1999) ve mineral süspansiyonlarının (Özkan ve Yekeler 2004) koagülasyonunda da kullanılmaktadır.

Doğal taş atıksularının arıtılması (bulanıklığın giderilmesi) konusunda literatürde daha önce de birkaç çalışma yapılmış olup bu çalışmalar tamamen flokülasyon yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve uygulanan yöntem farklılığının ve koagülasyon yönteminin etkisi konusunda bir çalışma yapılmamıştır (Seyrankaya vd. 2000, Ersoy 2005, Bayraktar vd. 1996). Bayraktar vd.'nin (1996) yaptığı çalışmada flokülant tipinin flokülasyona etkisi, Ersoy'da (2005) anyoniklik derecesinin flokülasyona etkisi, Seyrankaya vd.'nin (2000) yaptığı çalışmada ise beyaz mermer kullanılarak flokülant mol ağırlığının flokülasyona etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada ise iki farklı doğal taş türü (mermer ve traverten) atıksuyuna flokülasyon yöntemi uygulanarak, flokülant tipinin (Any., Kat., Non.), flokülant mol ağırlığının (düşük, orta, yüksek), flokülant yük yoğunluğunun ve süspansiyon pH'sının etkileri daha detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca traverten süspansiyonuna koagülasyon yöntemi uygulanarak, koagülant tipinin ve süspansiyon pH'sının koagülasyona etkisi incelenmiştir. Bunlara ek olarak yine traverten süspansiyonuna bu iki yöntemin kombinasyonu olan "koagülasyon +flokülasyon" yöntemi uygulanmıştır. Özellikle koagülasyon ve "koagülasyon+flokülasyon" yöntemlerinin DT atıksularına uygulanması hususunda literatürde çalışmalara rastlanmamış olup bu bakımdan da bu çalışma literatüre önemli bir katkı sağlamış olacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Flokülasyon

2.1.1 Flokülasyonun Tanımı ve Flokülant Türleri

Flokülantlar organik esaslı polimerler veya polielektrolitlerdir. En önemli özellikleri çok yüksek molekül ağırlığına sahip olmalarıdır (molekül ağırlıkları 20.000.000'a kadar çıkabilmektedir).

Flokülantlar genel olarak 3 şekilde sınıflandırılabilir.

- 1- Flokülant kaynağına göre sınıflandırma
- 2- İyonizasyon durumuna göre sınıflandırma
- 3- Molekül ağırlığına göre sınıflandırma

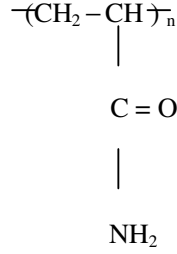
1-Flokülant Kaynağına Göre Sınıflandırma: Flokülantlar kaynağına göre 2 sınıfa ayrılır.

a-) Doğal Flokülantlar: Nişasta, reçine, aljinat (deniz yosunu) veya çeşitli bitki ve sebze tohumlarından elde edilen doğal organik maddelerdir (Gregory 1989). Fakat bunların molekül ağırlıkları sentetik flokülantlara göre çok düşük ve flokülasyon kabiliyeti daha zayıftır. Bu yüzden pratikte en çok kullanılanlar aşağıda anlatılan sentetik flokülantlardır.

b-) Sentetik Flokülantlar: Sentetik flokülantlar sıvı, emülsiyon veya katı (granül) olarak üç farklı fiziksel formda üretilebilmektedir. Mermer atık su arıtımında genelde katı granül haldeki sentetik flokülantlar kullanılmaktadır. Sentetik olarak elde edilen en önemli ve en yaygın flokülant poliakrilamid (PAA) ve onun türevleridir. PAA akrilamidin sulu polimerizasyonu ile elde edilmektedir. (Şekil 2.1, 2.2 ve 2.3).

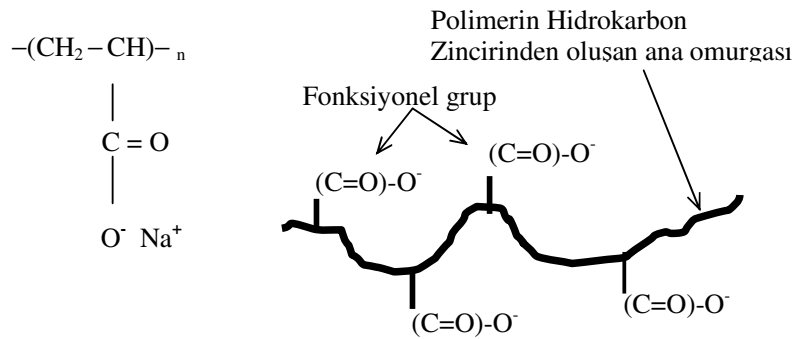
2- İyonizasyon Durumuna Göre Sınıflandırma: Flokülantlar İyonizasyon durumuna göre 3 sınıfa ayrılır.

a-) Non-İyonik Flokülantlar: Non-iyonik flokülantlardan en önemli ve en yaygın kullanılanı PAA esaslı flokülantlardır (Şekil 2.1). Bundan başka kullanılabilir diğer tür non-iyonik flokülantlar da Polivinil alkol (PVA), Polietilen oksitlerdir (PEO) (Gregory 1989).



Şekil 2.1 Poliakrilamid (PAA) esaslı non-iyonik flokülantın yapısı

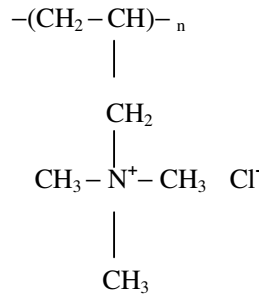
b-) Anyonik Flokülantlar: Diğer birçok arıtma tesislerinde olduğu gibi mermer atıksularının (süspansiyonunun) flokülasyonunda da genellikle yüksek molekül ağırlıklı anyonik flokülantlar kullanılmaktadır. Yukarıda da ifade edildiği gibi günümüzde en çok kullanılan flokülant olan poliakrilamid (PAA) esas itibariyle iyonik olmayan (non- iyonik) bir flokülant olup anyonik tip flokülantlar (mesela sodyum poliakrilat) bu poliakrilamidin bazı amid gruplarının (-NH₂) bazik ortamda (mesela NaOH ile) hidroliziyle veya akrilikasit (CH₂=CHOOH) ile kopolimerizasyonu (bir arada polimerleşmesi) sonucu elde edilebilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 PAA esaslı anyonik flokülantın (Na-Poliakrilat) yapısı

Gerek hidroliz ve gerekse kopolimerizasyon reaksiyonları kontrol edilebilmekte olup, bu sayede istenilen anyoniklik derecesinde (negatif yük yoğunluğunda) ve istenilen molekül ağırlığında flokülant elde edilebilmektedir (Gregory 1989). Anyonik flokülantlar anyoniklik derecesine göre Zayıf Anyonik, Orta Anyonik ve Güçlü Anyonik flokülant gibi sınıflara da ayrılabilirler. PAA esaslı bu anyonik flokülantlardan başka kullanılacak anyonik flokülantlar ise şöyle sıralanabilir; Sodyum polystren sülfonat, Akrilamido-metilpropan ve Sülfonik asitin kopolimerizasyonundan elde edilen ürünlerdir.

c-) Katyonik Flokülantlar: Poliakrilamid'den anyonik flokülant türetildiği gibi uygun bir katyonik monomer (genellikle dimetil-aminoetil akrilat veya metil akrilat gibi akrilamidin amin türevleri) ile kopolimerizasyonu sonucu katyonik PAA yani katyonik tür flokülant elde edilebilir. Flokülantın yapısına giren bu amin türevleri polimerizasyon sonucu kuaterner amin formuna dönüşmektedir. PAA esaslı katyonik bir flokülant olan Kuaterneraminli Poliakrilamid'in kimyasal formülü Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3 PAA esaslı katyonik bir flokülant olan Kuaterneraminli Poliakrilamid'in yapısı

Anyonik PAA de olduğu gibi katyoniklerde de polimerizasyon reaksiyonları kontrol edilerek istenilen katyoniklik derecesinde ve molekül ağırlığında PAA elde edilebilir. PAA esaslı bu flokülantlardan başka kullanılacak katyonikler: Polietilen amin, Polidialydimetilamonyum klorit (Catfloc) (Gregory 1989). Katyonik flokülantlar katyoniklik derecesine göre Zayıf katyonik, Orta katyonik ve Güçlü katyonik gibi sınıflara ayrılabilirler.

3- Flokülanların Molekül Ağırlıklarına Göre Sınıflandırılması: Flokülanlar molekül ağırlıklarına göre Çizelge 2.1'deki gibi sınıflandırılırlar.

Çizelge 2.1 Flokülanların Molekül Ağırlıklarına Göre Sınıflandırılması

Molekül Ağırlığı	Genel Tanımlama
10 milyon ve üstü	Çok yüksek
1 – 10 milyon	Yüksek
200.000 – 1 milyon	Orta
100.000 – 200.000	Düşük
50.000 – 100.000	Çok düşük
50.000'den az	Çok çok düşük

2.1.2 Flokülyasyon Mekanizmaları

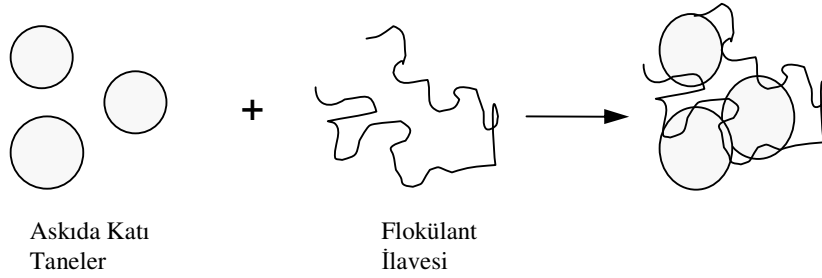
Flokülyasyonda iki mekanizmadan söz etmek mümkündür;

- I) Polimer köprü teşekkülü ile flokülyasyon (köprülenme flokülyasyonu)
- II) Elektrostatik yük yamama (Electrostatic charge patch) yöntemiyle flokülyasyon.

2.1.2.1 Polimer Köprü Teşekkülü İle Flokülyasyon

Flokülyasyon işleminin ağırlıklı olarak polimer köprü teşekkülü mekanizmasıyla gerçekleşebileceği söylenebilir. Uzun zincirli (yüksek molekül ağırlıklı) polimerler bu zincirleri sayesinde birden fazla tane üzerine adsorplanabilmekte ve böylece taneler arasında bir köprü teşekkül ederek taneler birbirlerine bağlanmakta yani flok oluşturmaktadır (Şekil 2.4). Flokülyasyonda polimer köprüsü teşekkülü fikri ilk kez Ruehrwein and Ward (1952) tarafından ortaya atılmış ve bu tarihten sonra da büyük kabul görmüştür. Köprü teşekkülü ile flokülyasyon oluşumu için polimerlerin oldukça yüksek molekül ağırlıklarında (genellikle birkaç milyon değerinde) olmaları gerekir (Gregory 1989). Bu yüksek molekül ağırlığı sebebiyle bir tane üzerine birkaç noktadan adsorplanabilmektedir. Bu yöntemle elde edilen floklar büyük boyutlu olup çökme hızları yüksektir. Literatürde, kalsit mineralinin flokülyasyonu konusunda yapılan çalışmalara göre şu değerlendirmeyi yapmak

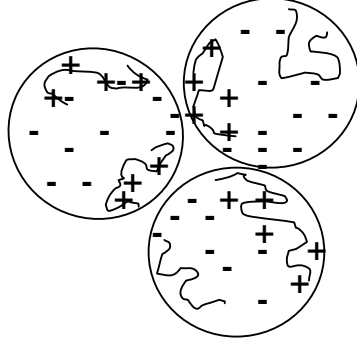
mümkündür (Yarar 2001, Friend and Kitchener 1973); süspansiyon pH'sının 6'dan büyük olduğu şartlarda hem mermer tozunun ve hem de yüksek molekül ağırlıklı anyonik polimerlerin aynı yüzey yüküne sahip olmasına rağmen iyi bir flokülasyon meydana gelmekte olup bu durum polimer köprü teşekkülü ile flokülasyon mekanizmasının sistemde etkin bir rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 2.4 Polimer köprü teşekkülü ile askıda katı tanelerin flokülasyonu

2.1.2.2 Elektrostatik Yük Yamama (Electrostatic Charge Patch) Mekanizması ile Flokülasyon

Polimerlerin kullanıldığı flokülasyon proseslerinde yukarıda açıklanan polimer teşekkülü ile flokülasyondan başka bir yöntem daha ortaya konmuş ve buna da “Elektrostatik Yük Yamama (Electrostatic Charge Patch)” yöntemi denilmiştir (Gregory 1973). Bir süspansiyonda ortamda mesela negatif yüzey yüküne sahip katı taneler ile ona zıt yüklü kuvvetli katyonik polimer molekülleri olduğunu düşünelim. Bu yonteme göre katyonik polimer elektrostatik çekim kuvvetleriyle tane yüzeyinin sadece bir bölümü üzerine adsorplanarak (yani tane üzerine adeta yamanmış olarak) o kısmın yüzey yükünü tersine çevirir ve pozitif yapar. Sonra tanenin bu pozitif kısmı ile bir başka tanenin negatif kısmı arasındaki elektrostatik çekim kuvvetiyle taneler bir araya gelerek flok oluştururlar (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Elektrostatik yük yamaması (Electrostatic charge patch) yöntemiyle flokülasyon.

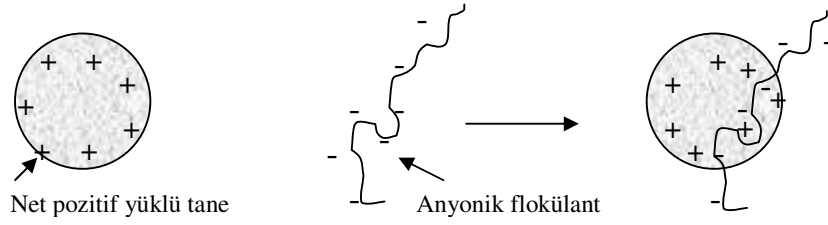
2.1.3 Flokülantın Tane Yüzeyine Adsorplanması

Bir polimer molekülünün süspansiyondaki herhangi bir katı yüzeyine adsorpsiyonu şartlara bağlı olarak şu üç bağ yapma mekanizmasından biri veya birkaçı ile gerçekleşmektedir (Gregory 1989, Stutzmann and Siffert 1997, Somasundaran and Das 1998);

I) Elektrostatik bağ, II) Hidrojen bağ III) Kovalent bağ

2.1.3.1 Elektrostatik Adsorplanma (iyon köprüsü ile)

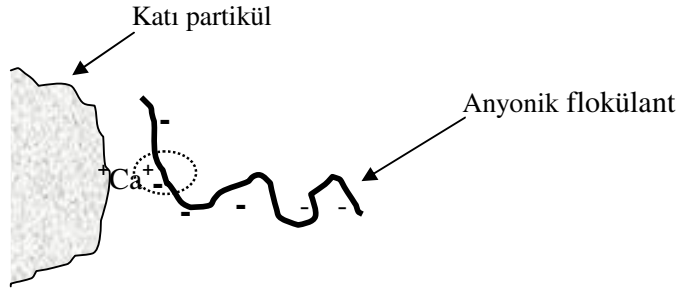
Özellikle iyonik (katyonik veya anyonik) polimerlerin kendisine zıt yüklü taneler arasındaki elektrostatik çekim kuvvetleri aracılığıyla meydana gelen bir bağ türüdür (Şekil 2.6). Bunun yanında süspansiyon pH'sına bağlı olarak (düşük ve yüksek pH'larda) iyonik olmayan (non-iyonik) polimerlerin yapısında da, hidroliz reaksiyonları sonucu iyonizasyon meydana gelebilmektedir (Gregory 1989, Ateşok 1988). Bu sebeple orijinal haliyle non-iyonik formdaki polimer ile tane yüzeyi arasında da elektrostatik etkileşim mümkündür.



Şekil 2.6 Anyonik flokülantın pozitif yüklü katı yüzeyine elektrostatik çekim kuvvetleri yardımıyla adsorplanması

2.1.3.2 Kovalent Bağ Oluşumu ile Adsorplanma

Mineral (veya katı tane) yüzeyindeki çok valanslı metal iyonları mesela Ca^{+2} ile polimer zincirindeki negatif yüke sahip aktif gruplar arasında güçlü bir kovalent bağı oluşumuyla polimer adsorpsiyonu gerçekleşebilir (Stutzmann and Siffert 1997, Somasundaran and Das 1998). Literatürde özellikle kaolenitin poliakrilamid (PAA) ile flokülasyonunun izahatında PAA ile kaolenit yüzeyindeki Ca^{+2} iyonları arasında böyle bir bağ oluşumu ifade edilmektedir (Şekil 2.7) (Stutzmann and Siffert 1997). Bu tür bağ oluşumunun yine $CaCO_3$ ile anyonik flokülantlar arasında da gerçekleştiği ifade edilmektedir (Yarar 2001).

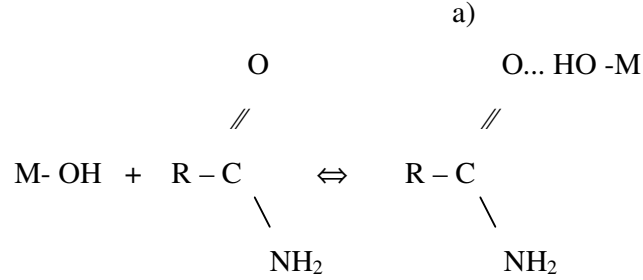


Şekil 2.7 Süspansiyondaki katı partikül (mineral) yüzeyindeki Ca^{+2} iyonu ile anyonik flokülant arasındaki kovalent bağ (katyonik köprü) oluşumu.

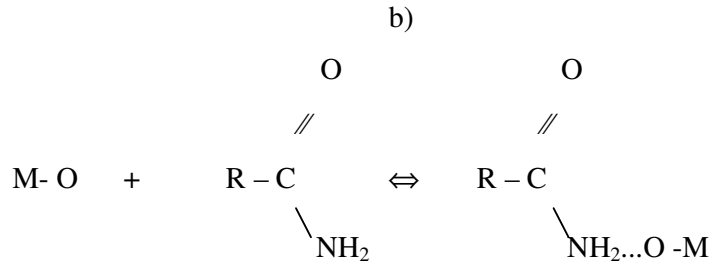
2.1.3.3 Hidrojen Bağı Oluşumu ile Adsorplanma

Polimer molekülü ve mineral yüzeyi arasında oluşan hidrojen bağı (H-bağı) iki şekilde gerçekleşebilir (Stutzmann and Siffert 1997, Ateşok 1988, Werneke 1979):

I) Polimerin karbonil (-C = O) grubundaki oksijen ile mineralin yüzey hidroksilleri (OH) veya yüzeydeki su molekülleri arasında oluşan H bağı. (Şekil 2.8 a).



II) Polimerin “-NH₂” (amid) grubundaki H ile mineral yüzeyindeki oksijenler arasında oluşan H bağı. (Şekil 2.8 b).



Şekil 2.8 Polimer molekülü ile mineral arasında H-bağı oluşumu

Hidrojen bağı özellikle non-iyonik polimerlerin adsorpsiyonunda ve polimer-tane arasındaki elektrostatik itme kuvvetlerinin çok yüksek olmadığı ortamlarda daha etkin olarak ortaya çıkmaktadır.

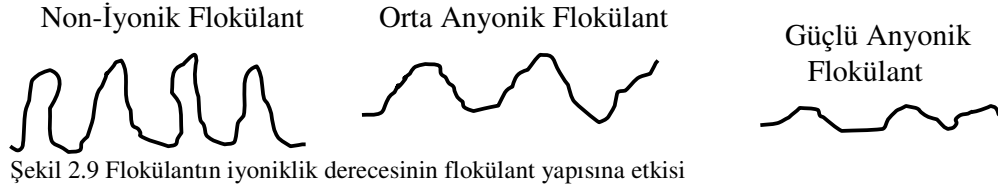
2.1.4 Flokülasyona Etki Eden Parametreler

1. Flokülant Tipi
2. Süspansiyon pH'sı, Sıcaklığı ve İyonik Şiddeti
3. Flokülant Dozajı

4. Süspansiyonun Karıştırma Hızı
5. Süspansiyondaki Katı/Sıvı Oranı, Katının Tane Boyutu ve Tane Şekli

2.1.4.1 Flokülant Tipi

Molekül ağırlığı yüksek (polimer zincir uzunluğu fazla olan) flokülantlar daha büyük boyutlu fakat daha poroz yapıda flokların oluşmasını sağlarken, düşük molekül ağırlıklı flokülantlar nispeten daha küçük boyutlu fakat daha sağlam (daha az poroz) floklar oluşturur (Gregory 1973, Hogg 2000). İyonik flokülantlar için sahip oldukları anyoniklik ve katyoniklik dereceleri yani yük yoğunlukları dolaylı olarak flokülantların aktivasyonunda önemli rol oynamaktadır. Örneğin non-iyonik formdaki bir polimer ortamda daha yumaklaşmış kıvrımlı halde bulunurken iyoniklik derecesi arttığında polimerler daha düz ve uzun bir hal almaktadır (Şekil 2.9). Bu durum ise taneler arasında köprü oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Stutzmann and Siffert 1997).

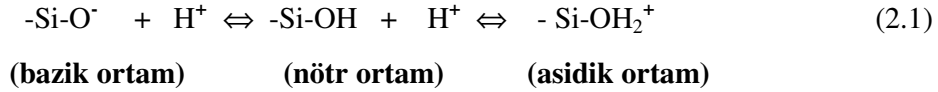


2.1.4.2 Süspansiyon pH'sı, Sıcaklığı ve İyonik Şiddeti

Süspansiyon pH'sının iki yönden büyük önemi vardır. Birincisi, pH flokülantın ortamdaki aktivasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi non-iyonik formdaki bir polimer bile asidik ve bazik pH'larda (+) veya (-) yükler kazanabilir. Yani iyonik (yükü) forma dönüşebilir (Gregory 1973, Ateşok 1988) ve bu polimer ile katı tane arasında elektrostatik etkileşimi artırabilir. İkincisi, pH süspansiyondaki katı tanelerin yüzey elektrik yükü kazanıp kazanmayacağı üzerinde doğrudan belirleyicidir (Formül 2.1). Şöyle ki özellikle

katı tane yüzeylerindeki metal oksitler ortamdaki H⁺ ve OH⁻ iyonları ile reaksiyona girmekte ve böylece tanelerin yüzey yükleri veya zeta potansiyelleri bu reaksiyonlar sonucu oluşmaktadır. Mesela kuvars taneleri sulu ortamda doğal halde negatif yüke ve zeta potansiyele sahiptir. Eğer ortamın pH'sı azaltılıp H⁺ iyonları artırılırsa mesela pH=2 civarına getirilirse bu H⁺ iyonları ile kuvarsın arasındaki etkileşimden dolayı kuvars tanelerinin zeta potansiyeli sıfır olur. Bu da taneler arasındaki itme kuvvetlerinin ortadan kalkması ve flokülasyonun daha kolay hale gelmesi demektir.

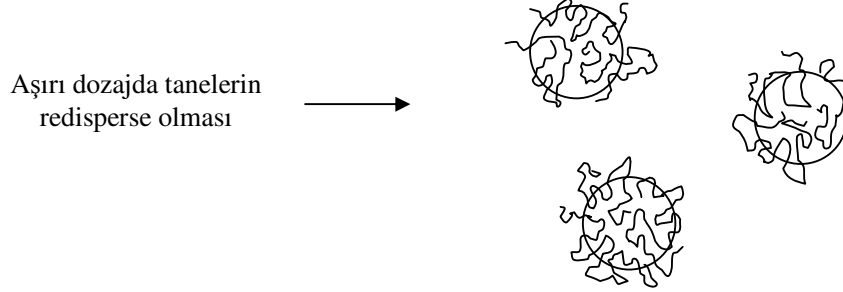
Süspansiyon sıcaklığı flokülant molekülünün aktivasyonunu etkilemekte ve ayrıca flokülantların her sıcaklıkta sıvıda meydana getirdiği vizkozite farklı olmaktadır (Ciba Specialty Chemicals 2003). Diğer yandan polimerin katı tane üzerine adsorpsiyonu sırasında ortam sıcaklığı bazen olumlu bazen de olumsuz etki yaptığı ifade edilmektedir (Ateşok 1988).



2.1.4.3 Flokülant Dozajı

Literatürde bir süspansiyondaki disperse olmuş katı partiküllerin en iyi şekilde flokülasyonunu sağlamak için gerekli flokülant dozajının (optimum dozaj), katının yüzey alanının yarısını kaplayacak miktardaki dozaj olduğu ifade edilmektedir (Somasundaran and Das 1998). Şayet ortama bu dozajdan daha fazla miktarda flokülant verilirse yani taneler üzerine fazla miktarda flokülant adsorplanırsa o zaman taneler arasında köprü oluşumu engellenir. Çünkü Şekil 2.10'da görüldüğü üzere tanelerin yüzeyinde, bir başka tane yüzeyine adsorplanmış flokülant zincirinin bir kısmının bu tane üzerine de tutunabilmesi (adsorplanabilmesi) için yeterince boşluk kalmamakta ve bu da flokülasyonu engellemektedir. Bu durum flokülantların aşırı dozajda sterik engeli olarak da bilinmektedir. Diğer yandan

süspansiyona optimum dozajdan daha düşük miktarda flokülant verilmesi de yine flokülasyon işlemini olumsuz yönde etkileyecektir.



Şekil 2.10 Aşırı flokülant dozajında tanelerin yeniden disperse hale gelmesi (flokülantların sterik engel oluşturması)

2.1.4.4 Süspansiyon Karıştırma Hızı ve Karıştırma Süresi

Süspansiyona uygulanan yüksek karıştırma hızı ve bunun sonucunda ortaya çıkan güçlü kesme kuvvetleri, oluşmuş floklar üzerinde olumsuz etki yapmakta ve flokların parçalanarak küçülmesine neden olmaktadır. Parçalanmış bu flokların ise yeniden bir araya gelmesi daha zor olmaktadır. Bu sebeple floklar üzerinde olumsuz etki yapmayacak optimum bir karıştırma hızının uygulanması gerekir. En uygun karıştırma süresi optimum flokülant dozajının elde edilebilmesi için, diğer bir ifade ile tane yüzey alanının yarısının flokülant ile kaplanabilmesi için gerekli olan süredir. Bu sürenin fazla tutulması flokülantların tane yüzeyinde artmasını ve dolayısıyla sterik engel nedeniyle flokülasyonu engellemektedir (Somasundaran and Das 1998). Bu sürenin gereğinden az olması da flokülant moleküllerinin süspansiyondaki tüm katı tanelerine ulaşabilme şansını azaltacağından flokülasyonu olumsuz yönde etkileyecektir.

2.1.4.5 Süspansiyondaki Katı/Sıvı Oranı, Katının Tane Boyutu ve Tane Şekli

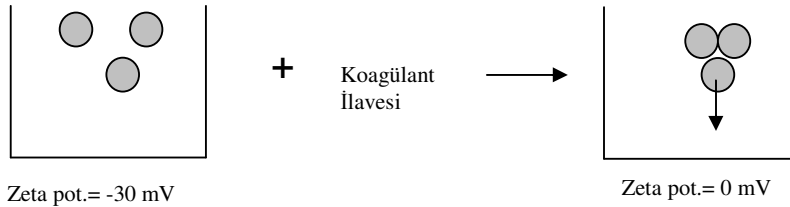
Süspansiyondaki katıların tane boyutu ne kadar küçük ve porozite oranı ne kadar yüksek olursa yüzey alanları da o oranda artacağından bu durum doğrudan

flokülant tüketimini de etkileyecektir. Dolayısıyla optimum flokülant dozajı belirlenirken katının tane boyut veya spesifik yüzey alanı analizinin de bilinmesi gereklidir (Somasundaran and Das 1999).

2.2 Koagülasyon

2.2.1 Koagülasyonun Tanımı ve Koagülant Türleri

Bir sıvı içerisinde disperse halde bulunan katı taneleri genellikle belirli bir yüzey elektrik yüküne ve zeta potansiyele sahiptir (Çelik and Ersoy 2004). Aynı elektrik yükünü taşıyan taneler, elektrostatik olarak birbirlerini itmekteler ve böylece çökmeden askıda durabilmektedirler. Tanelerin bir araya gelmesine diğer bir engel ise tanelerin yüzeylerine adsorplanmış su tabakasıdır. Bu su tabakası da tanelerin birbirlerine iyice yakınlaşmasına engel olmakta ve taneler arasındaki Van Der Walls (VdW) çekim kuvvetlerinin etkinliğini azaltmaktadır (Gregory 1989). Ortama ilave edilecek bir kısım inorganik elektrolitler yani $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, $AlCl_3$, $FeCl_3$, $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$ gibi koagülantlar yardımıyla katı tanelerinin zeta potansiyelleri sıfıra veya sıfıra yakın bir değere indirilerek aralarındaki elektriksel çift tabaka (EÇT) itme kuvvetleri (yani elektrostatik itme kuvvetleri) yok edilebilir veya azaltılabilir. Böylece taneler arasındaki VdW çekim kuvvetleri egemen hale gelerek taneleri bir araya getirir ve bu işleme de koagülasyon denir (Şekil 2.11). Koagüle olmuş yani topaklanmış bu taneler ise yerçekimi kuvvetinin etkisiyle çöktürülebilmektedir.



Şekil 2.11 Bir süspansiyondaki disperse partiküllerin koagülasyonu

Bir katının su içerisindeki yüzey yükü ve dolayısıyla zeta potansiyeli şu sebeplerden kaynaklanabilir (Çelik ve Ersoy 2004).

- 1-Tane yüzeylerindeki karboksil (-COOH), hidroksil (-OH), amin (-NH₂) gibi fonksiyonel grupların iyonizasyonundan (dissosiasyonundan).
- 2-Katının kristal yapısını oluşturan latis iyonlarının tercihli çözünmesinden
- 3-Kristal yapının oluşumu sırasında yüksek valanslı (Si⁺⁴ gibi) katyonlar yerine düşük valanslı (Al⁺³ gibi) katyonların geçmesinden.
- 4-Boyut küçültme işlemleri (kırma-öğütme) sırasında meydana gelen bağ kırılmalarından ve kristal yapı kusurlarından.
- 5-Süspansiyondaki bir kısım iyonların tercihli adsorpsiyonundan (spesifik adsorpsiyonundan).

En yaygın kullanılan koagülantlar; Alüm (Al(SO₄)₃.16H₂O), demir klorür (FeCl₃.6 H₂O) ve alüminyum klorür (AlCl₃) olup bunlardan başka sönmüş kireç (Ca(OH)₂), Mg(OH)₂, Mg₂CO₃, sodyum alüminat (NaAlO₂) ve FeSO₄'dır. Bunlardan en yaygın kullanılanları aşağıda kısaca tanıtılmaktadır.

Alüm: Kısaca alüm olarak ifade edilen bileşiğin kimyasal formülü (Al₂(SO₄)₃.18H₂O)'dur. Suda kolayca çözünebilir. Alüm ile koagülasyon düşük pH'larda (pH< 4) genellikle yük nötralizasyonu ile gerçekleşirken, nötral pH'larda (pH: 6-8) sıyırma (sweep) mekanizmasıyla gerçekleşmektedir. Çünkü düşük pH'larda süspansiyonda bol miktarda serbest Al⁺³ iyonları bulunurken orta ve yüksek pH'larda hidroksilli Al bileşiği olan Al(OH)₃ çökeleği oluşur(Gregory 1989, Zeta-Meter Inc. 1993). Diğer yandan süspansiyona giren alüm dozajının da süspansiyon pH'sı üzerinde ve dolayısıyla da çökelek oluşumunda etkili olduğu ve 30 mg/L den daha yüksek dozajlarda genellikle sıyırma mekanizmasının etkili olduğu ifade edilmektedir (Zeta- Meter Inc. 1993).

Polialüminyum klorit: Polialüminyum klorit (PAK) alüminyum kloritin kontrollü şartlar altında kısmi nötralizasyonu ve polimerizasyonu ile elde edilmektedir (Gregory 1989). Eğer yük nötralizasyonu ile koagülasyon söz konusu ise PAK kullanımı daha avantajlı olabilir. Yaklaşık kimyasal formülü [Al(OH)₁₅(SO₄)_{0.125}Cl_{1.25}]_n dir (İpekoğlu 1997).

Demir Klorit ve Demir Sülfat: Klorürlü bileşikleri $FeCl_3$ veya $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ve sülfatlı olanları ise $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ kimyasal formülüne sahiptir ve genellikle granül halde üretilir. Alüm'e oranla kullanımı daha azdır.

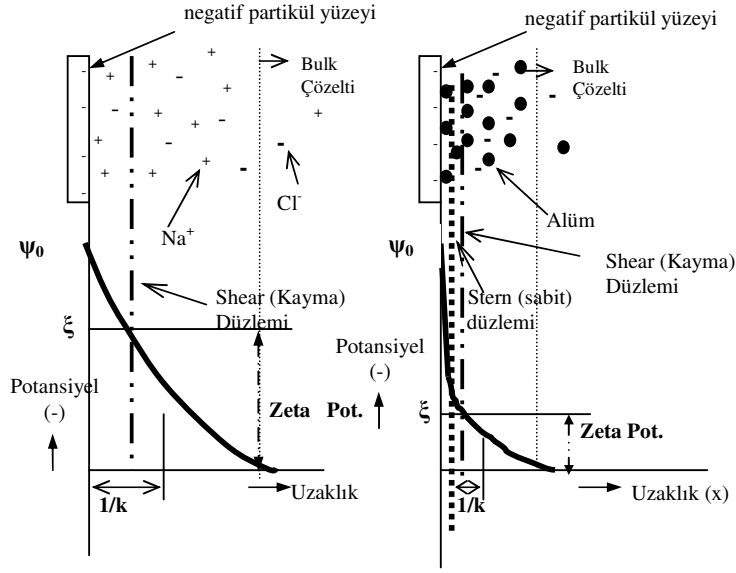
2.2.2 Koagülasyon Mekanizmaları

2 çeşit koagülasyon mekanizması vardır.

- 1- Yük nötralizasyonu ile koagülasyon
- 2- Süpürme koagülasyonu (Sweep coagulation)

2.2.2.1 Yük Nötralizasyonu ile Koagülasyon

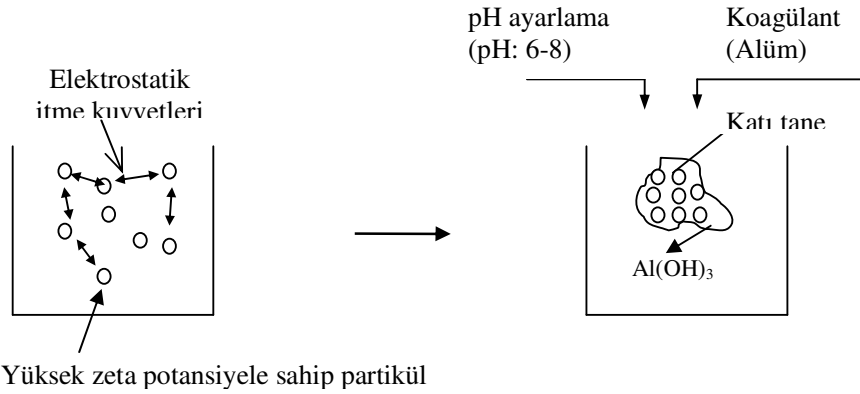
Mesela kil taneleri su içerisinde negatif bir yüzey yüküne ve zeta potansiyele sahiptir. Ortama bir koagülant mesela Alüm ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) ilave edildiğinde süspansiyonun pH'sına da bağlı olarak ortaya çıkan serbest haldeki Al^{+3} iyonları hem tane yüzeyindeki negatif yük merkezlerine adsorplanarak (yük nötralizasyonu) ve hem de tanenin elektriksel çift tabakasını bastırarak tanenin zeta potansiyelini düşürür (Şekil 2.12). Zeta potansiyeli azalan veya sıfır olan tanelerin itme gücü de azalacağından taneler arasındaki VdW çekim kuvvetleri baskın hale gelecek ve böylece taneler topaklanabileceklerdir.



Şekil 2.12 Yük Nötralizasyonu ile koagülasyon

2.2.2.2 Süpürme Koagülasyonu (Sweep Coagulation)

Diğer yandan bu yük nötralizasyonu ve elektriksel çift tabakanın bastırılması mekanizmalarından hariç olarak Alüm gibi koagülantların neden olduğu bir başka mekanizma daha vardır. Alüm özellikle bazik ve nötral pH'larda $Al(OH)_3$ gibi suda çözünmeyen çökelekler oluşturur. Bu çökelekler oluşurken taneleri de beraberinde tutarak bir arada çöklerler (Şekil 2.13). Buna sıyırma veya süpürme manasına "sweep" koagülasyon denilmektedir (Gregory 1989).



Şekil 2.13 Süpürme Koagülasyonu (Sweep Coagulation)

3- MALZEME VE METOT

3.1 Malzeme

3.1.1 Flokülantlar, Koagülantlar ve Diğer Kimyasallar

Kullanılan flokülantlar Ciba Speciality Chemical üretici firmasının Türkiye distribütörü olan Süperkim Kimya A.Ş.'den temin edilmiş olup özellikleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan koagülantların özellikleri de Çizelge 3.2'de verilmiştir. pH ayarlamalarında 1 M NaOH ve 1 M HNO₃ çözeltileri kullanılmıştır. İncö-Lab marka pH-Metre ile pH ölçümleri, Velp-115 Türbidimeter marka türbidimetre cihazı ile de bulanıklık ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan flokülantlar ve özellikleri

Tipi	Flokülant Firma Kodu	Mol Ağırlığı	Anyoniklik veya Katyoniklik Derecesi	Fiziksel form
Anyonik	SPK 502	Yüksek	%18	Toz
Anyonik	SPK 508	Yüksek	%28	Toz
Anyonik	SPK 1111	Yüksek	%34	Toz
Anyonik	SPK 504	Yüksek	%40	Toz
Anyonik	SPK 505	Orta	%25	Toz
Anyonik	SPK 506	Düşük	%20	Toz
Non İyonik	Magnofloc 351	Yüksek	-	Toz
Katyonik	SPK 375	Yüksek	%60	Toz

Çizelge 3.2 Deneyde kullanılan koagülantlar ve özellikleri

Adı	Kimyasal Formülü	Mol Ağırlığı (g/mol)	Safılık Derecesi	Markası
Alüminyum Klorür	$AlCl_3$	133,34	%98'in üstünde	Merck
Demir Klorür (Hidrate)	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	270,33	%99'in üstünde	Merck
Alüm	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$	630,39	%98'in üstünde	Fluka

3.1.2 Fabrika'dan Alınan Orijinal Mermer ve Traverten Atıksu Numuneleri

Deneylerde kullanılan Traverten tozu Afyonkarahisar'da faaliyet gösteren Tureks Traverten A.Ş. fabrikasından, Akşehir Siyah Mermer tozu ise yine Afyon'da faaliyet gösteren Gürel Mermer Fabrikasından temin edilmiştir. Numuneler fabrikanın atık su havuzundan orijinal şekilde süspansiyon halinde alınmış laboratuarda serilerek oda sıcaklığında kurutulmuş ve 0.1mm'lik elekten geçirilmiştir.

3.1.3 Flokülasyon/Koagülasyon Deneylerinde Kullanılan Çeşme Suyunun ve Saf Suyun Özellikleri

Koagülant ve flokülant stok çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan saf suyun pH'sı 6.2, iletkenliği 10 μ mhos/cm'dir. Flokülasyon, koagülasyon ve "flokülasyon+koagülasyon" testlerinde kullanılan çeşme suyunun pH'sı 7.3–7.5, bulanıklığı 0.3 NTU, iletkenliği 1330–1450 μ mhos/cm'dir.

3.1.4 Orjinal Haldeki Mermer ve Traverten Atıksularının Özellikleri

Orjinal haldeki mermer ve traverten atıksularının özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

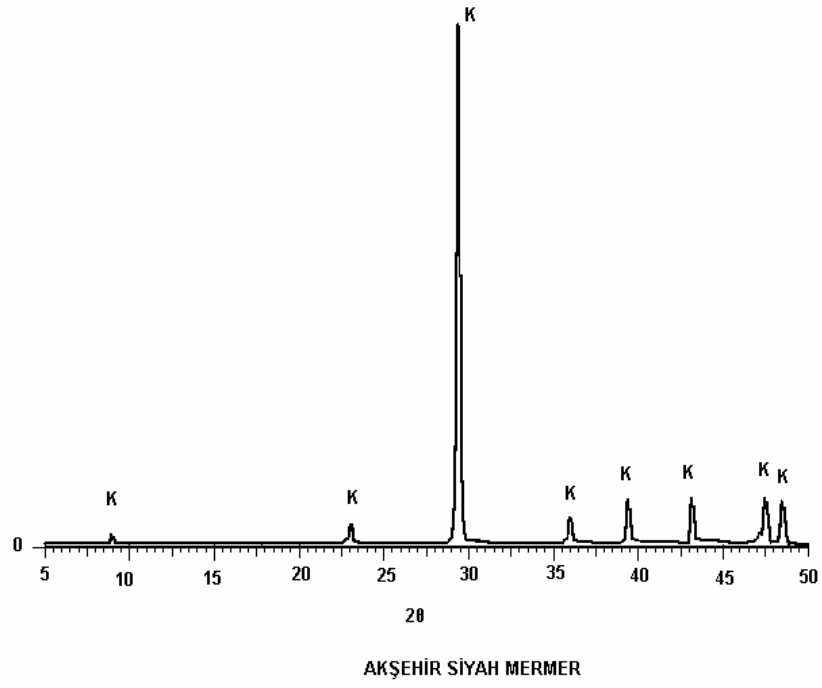
Çizelge 3.3 Orjinal Haldeki Mermer ve Traverten Atıksularının Özellikleri

Numune Adı	Katı Oranı (%)	pH	İletkenlik (micrometreohms/cm)	Bulanıklık (NTU)
Mermer Atıksuyu	2.17	9.8	950	Okunamadı (>200 NTU)
Traverten Atıksuyu	8.6	8.4	880	Okunamadı (>200 NTU)

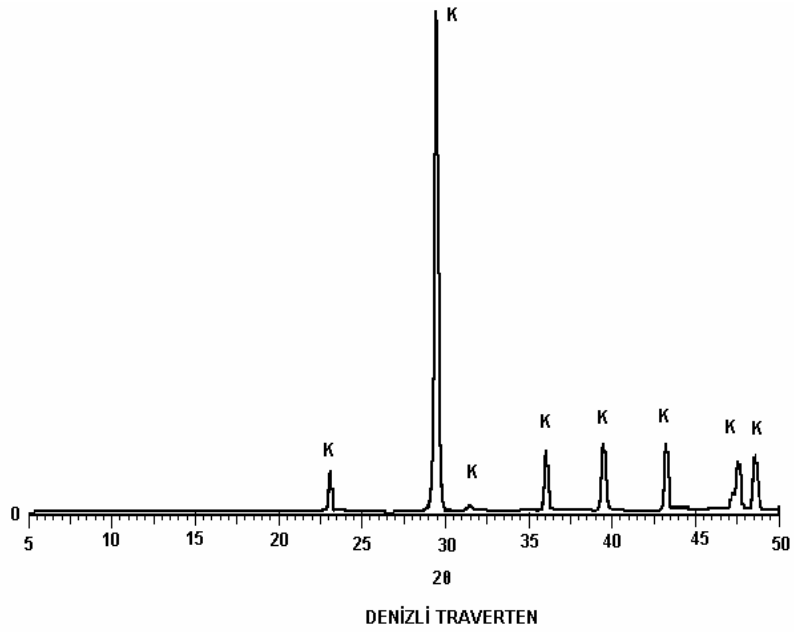
3.2 Doğal Taşların Özelliklerinin Belirlenmesi

3.2.1 Mermer ve Traverten Tozlarının Mineralojik (XRD), Tane Boyut Dağılımı ve Kimyasal Analizleri

Mermer ve traverten tozunun mineralojik analizi Cu-K α ışınması kullanılarak Shimadzu 6000 marka XRD cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen XRD pikleri Şekil 3.1 (Akşehir Siyah Mermer) ve Şekil 3.2’de (Denizli Traverten) verilmiş olup şekillerde açıkça görüldüğü gibi iki numunenin de hemen hemen tamamı kalsit (CaCO₃) mineralinden oluşmaktadır.



Şekil 3.1 Akşehir Siyah Mermerin XRD pikleri (K=Kalsit)



Şekil 3.2 Denizli Traverten tozunun XRD pikleri (K=Kalsit)

Mermer ve traverten tozunun kimyasal analizi için Spectro X-Lab 2000 marka XRF cihazı kullanılmış olup, kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Traverten ve mermer tozunun kimyasal analiz sonuçları

Numune	İçerik (%)						
	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
Traverten	54.35	0.42	0.20	0.17	0.85	0.03	0.20
Mermer	54.25	0.22	0.20	0.70	1.15	0.03	0.20

Akşehir Siyah Mermer tozunun tane boyutu analizi laser tekniği ile çalışan Fritsch Particle Sizer Analysette-22 cihazı ile yapılmış olup, numunenin %90’ı 30 mikronun ve %10’u ise 1.4 mikronun altındadır. Denizli Traverten tozunun tane boyutu analizi yine aynı cihaz ile yapılmış olup, numunenin %90’ı 38 mikronun ve %10’u ise 1.5 mikronun altındadır.

3.2.2 Mermer ve Traverten Tozlarının Yüzey Elektriksel Özelliklerinin Tespiti

Traverten ve mermer tozunun yüzey elektrokinetik özelliklerinin (zeta potansiyelinin) tespiti için Zeta-Meter 3.0 marka cihaz ile (Şekil 3.3) pH’ya göre (pH 6, 7.5, 11) zeta potansiyel ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler için 49.5 g saf suya 0.05 g mermer veya traverten tozu ilave edilip katı oranı % 0,1 olan solüsyon hazırlanmıştır. Solüsyonun pH’sı ayarlanmıştır. 2 dk manyetik karıştırıcıda karıştırılmış ve zeta metrenin teflon hücresine konarak zeta potansiyel ölçümü yapılmıştır. Her bir pH’da 10 ayrı zeta potansiyel ölçülmüş ve bu 10 ölçümün ortalaması cihazın dijital göstergesinden otomatik olarak okunarak veri olarak alınmıştır.



Şekil 3.3 Zeta Metre Cihazı

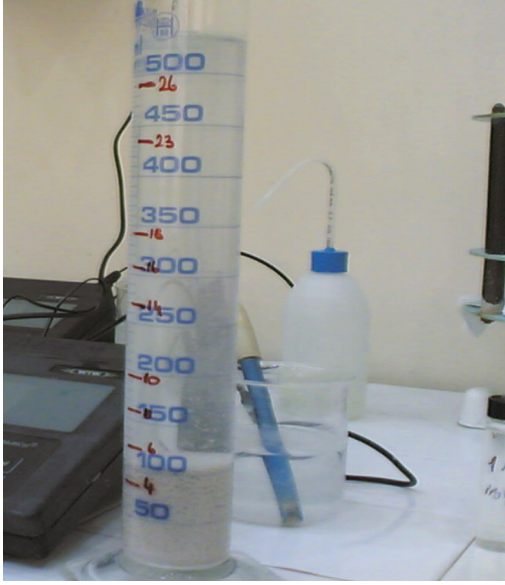
3.3 Metot

3.3.1 Flokülasyon Testleri

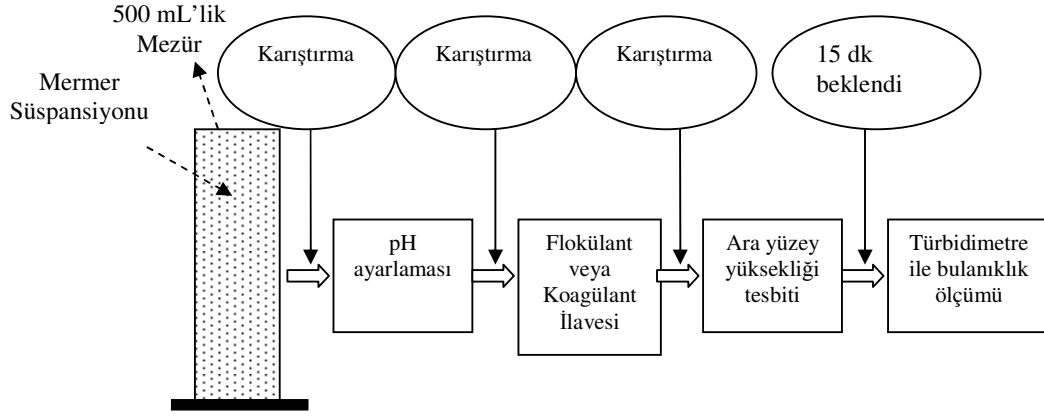
Flokülasyon testlerinden önce kullanılacak olan flokülantlar gerekli derişimde hazırlandı. Bunun için her flokülanttan 0.1 gram 100 ml saf suya konuldu ve 1 saat manyetik karıştırıcıda oda sıcaklığında karıştırılarak 1000 mg/L'lik stok çözeltiler hazırlandı. Hazırlanan bu stok flokülant çözeltilerinden 100 mg/L'lik çözeltiler türetildi ve flokülasyon testlerinde bu 100 mg/L'lik flokülant çözeltileri kullanıldı. Flokülasyon testlerinde 500 ml'lik dereceli silindirik mezüre 500 ml çeşme suyu ilave edildi ve üzerine % 4 katı oranına denk gelecek şekilde 21 g mermer tozu eklendi (Şekil 3.4). 2 kez alt üst edilen mezürün içerisindeki süspansiyonun pH'sı ayarlandı ve tekrar 4 kez alt üst edildi. Hemen ardından 100 mg/L'lik flokülant çözeltilisinden önceden belirlenen dozajlarda, otomatik pipetle çekilerek süspansiyona ilave edildi ve mezür 4 kez alt üst edildikten sonra düz bir zemin üzerine konuldu ve kronometre ile ara yüzey yüksekliğinin zamana bağlı değişimi kaydedilerek süspansiyonun çökelme hızı belirlendi. 15. dakikanın sonunda (Şekil 3.5) mezürün 12 cm aşağısından otomatik pipetle 12 ml çekilerek türbidimetre'de bulanıklığı ölçüldü. Flokülasyon aşamaları Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.4 Flokülanat katkısı öncesi mermer tozu süspansiyonu



Şekil 3.5 Flokülanat katkısı sonrası 15 dk beklemiş numune



Şekil 3.6 Flokülasyon ve Koagülasyon deneylerinin şeması

3.3.2 Koagülasyon Testleri

Koagülasyon testlerinden önce her bir koagülanttan 1 g/L derişiminde çözelti hazırlandı. Bunun için 1 gr koagülanttan tartılarak balon jøjeye kondu ve üzerine 1 litreye tamamlayacak şekilde saf su kondu. Homojenliđi sağlamak için balon jöje çalkalandı. Böylece 1g/L derişiminde koagülant çözeltileri elde edildi. Koagülant testleri pH 6, 7.5 ve 9'da farklı koagülant dozajlarında yapıldı. Bunun için 500 ml'lik dereceli silindirik mezüre 500 ml çeşme suyu ilave edildi ve üzerine 21 g mermer tozu eklendi. 2 kez alt üst edilen mezürün içerisindeki süspansiyonun pH'sı ayarlandı ve tekrar 4 kez alt üst edildi. Hemen ardından 1 g/L'lik koagülant çözeltilerinden önceden belirlenen dozajlarda, otomatik pipetle çekilerek süspansiyona ilave edildi ve mezür 4 kez alt üst edildikten sonra düz bir zemin üzerine konuldu ve kronometre ile ara yüzey yüksekliğinin zamana bağlı değişimi kaydedilerek süspansiyonun çökme hızı belirlendi. 15. dakikanın sonunda mezürün 12 cm aşğısından otomatik pipetle 12 ml çekilerek Velp-115 Türbidimeter marka türbidimetre cihazında NTU (Nepheleometric Turbidity Unit) cinsinden bulanıklık ölçümü yapıldı.

3.3.3 Koagülasyon +Flokülasyon Testleri

Koagülasyon+flokülasyon testleri için içerisinde 500 ml çeşme suyu bulunan mezüre 21 g traverten tozu eklenerek mezür 2 kez alt üst edildi ve pH 9'a ayarlandıktan sonra tekrar 4 kez alt üst edildi. 1g/L'lik koagülant stok çözeltisinden gerekli miktarda otomatik pipetle çekilerek süspansiyona aktarıldı ve 4 kez alt üst edildi. Sonra flokülasyon çalışmasında saptanan ve optimum dozaj olarak belirlenen 1.3 mg/L'lik konsantrasyonu oluşturacak miktarda 100 mg/L'lik spk 508 stok flokülant çözeltisinden otomatik pipetle çekilerek süspansiyona ilave edildi. Mezür son olarak 4 kez alt üst edildi ve düz bir zemine konarak 15 dk çökmeye bırakıldı. 15 dk sonunda koagülasyon ve flokülasyon testlerinde ifade edildiği gibi süspansiyonun bulanıklığı ölçüldü.

3.3.4 Bulanıklık Ölçümü

Bulanıklık ölçümleri Velp-115 Türbidimetre marka türbidimetre cihazıyla (Şekil 3.7) yapılmış olup bulanıklık birimi NTU (Nephelometric Turbidity Unit) cinsindedir. Türbidimetrenin ölçüm aralığı 0-200 NTU'dur.

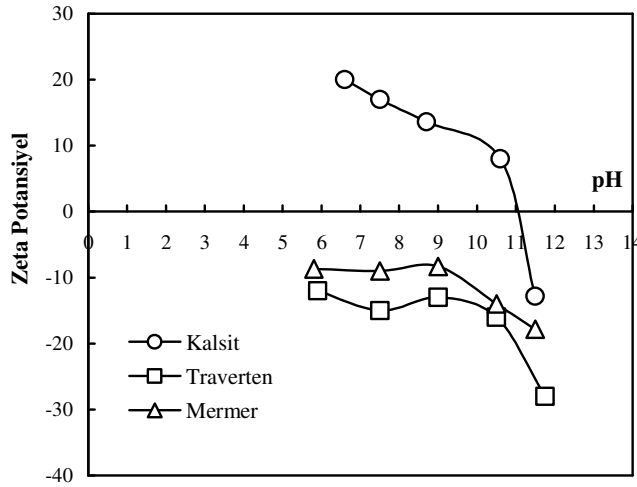


Şekil 3.7 Türbidimetre

4. BULGULARVE TARTIŞMA

4.1 Mermer ve Traverten Tozunun pH'ya Göre Zeta Potansiyeli

Mermer ve traverten tozunun pH'ya göre zeta potansiyelini (ölçülebilen yüzey potansiyelini) görmek amacıyla değişik pH'larda bir dizi zeta potansiyel ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.1'de mermer ve traverten tozlarının zeta potansiyel eğrileri saf kalsit mineraline göre çok farklılık göstermiştir. Kalsit pH 11'de sıfır yük noktasına gelirken mermer ve traverten tozunda sıfır yük noktası görülmemektedir. Kalsit minerali pH 11'e kadar pozitif yüzey pH 11'den sonrada negatif yüzey yüküne sahipken %90'ın üzerinde CaCO₃ kalsit mineralinden oluşan mermer ve traverten ölçülebilen bütün pH aralıklarında negatif yüzey yüküne sahiptir.



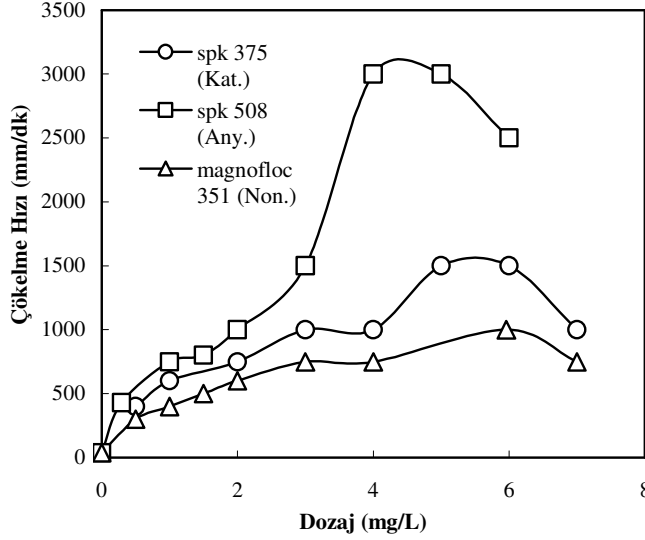
Şekil 4.1 Mermer ve traverten tozunun pH'ya göre zeta potansiyel eğrileri (Çizelge Ek-1)

4.2 Mermer Süspansiyonunun Flokülasyonu

4.2.1 Flokülant Tipinin (Katyonik, Anyonik, Noniyonik) Flokülasyona Etkisi

Mermer tozu süspansiyonunun flokülasyonunda flokülant tipinin etkisini görmek amacıyla anyonik (spk 508), katyonik (spk 375), noniyonik (magnofloc 351) flokülant varlığında bir dizi flokülasyon testleri yapılmıştır. pH 7.5'da yapılan bu testlerde elde edilen verilerle dozaja bağlı çökelme hızı (Şekil 4.2), dozaja bağlı

bulanıklık değişimi (Şekil 4.3) ve zamana göre ara yüzey yüksekliği değişimi (Şekil 4.4) grafiğe geçirilmiştir.



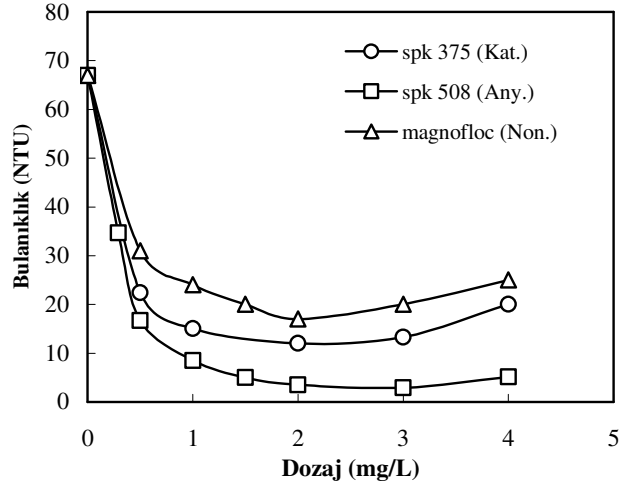
Şekil 4.2 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında dozaja bağlı çökme hızı eğrileri.(Kat.= Katyonik, Any.= Anyonik, Non. = Noniyonik) (Çizelge Ek-2)

Şekil 4.2’de mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da yapılan flokülasyonun da, dozaja göre elde edilen çökme hızı eğrilerinde her üç flokülant tipi için (katyonik, anyonik, noniyonik) dozajın artmasıyla, belli bir dozaja kadar çökme hızının da arttığı, bu dozajdan sonra sabitlendiği ve daha sonra çökme hızının düştüğü gözlenmiştir. 4 mg/L dozajda anyonik flokülantın çökme hızı 3000 mm/dk iken, katyonik flokülantın 1000 mm/dk ve noniyonik flokülantın çökme hızı 750 mm/dk’dir. En iyi performans anyonik flokülantla yapılan flokülasyon da görülmüştür. Anyonik flokülantla yapılan flokülasyon da, süspansiyon pH’sının 6’dan büyük olduğu şartlarda hem mermer tozunun ve hem de yüksek molekül ağırlıklı anyonik polimerin aynı yüzey yüküne sahip olmasına rağmen mermerin yapısında bulunan kalsit mineralinde varolan Ca^{+} iyonları ile anyonik polimer zincirindeki negatif aktif gruplar (karbonil, $-COO^{-}$) arasında bir kovalent bağ (katyonik köprü) oluşumu ile polimer adsorpsiyonu gerçekleştiği düşünülmektedir. Dozajın daha fazla artmasıyla çökme hızı azalmaya başlamıştır. Çökme hızındaki bu azalma flokülant dozajının artması ile ilgili olup iyi bir flokülasyon

olması için katının yüzey alanının yarısını kaplayacak şekilde flokülant ilavesi olması gerekmektedir ki buna optimum dozaj denir. Optimum dozajdan sonraki dozajlarda tanelerin yüzeyinde flokülantların tutunabilmesi için hiç boşluk kalmamaktadır, bu da polimer köprü teşekkülü ile flokülasyonu olumsuz yönde etkilemektedir (Somasundaran and Das 1998). Bu durum flokülantların aşırı dozajda sterik engeli olarak da bilinmektedir (Yarar 2001, Gregory 1989).

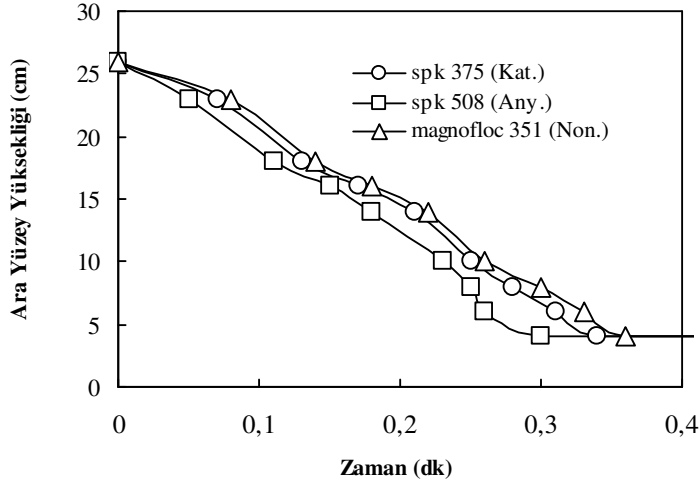
Katyonik flokülantla yapılan flokülasyonda ise belli bir konsantrasyona kadar çökelme hızı artmış daha sonra sabit kalmış ve daha yüksek dozlarda da çökelme hızı azalmıştır. Katyonik polimerler ile flokülasyonun daha çok elektrostatik yük yamama yöntemiyle gerçekleştiği söylenebilir. Bu mekanizmanın polimer köprü teşekkülü mekanizmasına göre flokülasyon üzerindeki etkisi daha azdır (Gregory 1989). Bu sebeple katyonik flokülantın flokülasyon performansı anyonik flokülanta göre daha düşük yani flokların çökelme hızı düşüktür.

Non iyonik flokülant ile yapılan flokülasyonda, katyonik flokülant ile yapılan flokülasyona benzer şekilde olmuş önce belli bir dozaja kadar dozaj arttıkça çökelme hızı artmış daha sonra sabit kalmış ve sonra düşmüştür. Non iyonik flokülantla yapılan flokülasyonun performansının düşük olması non iyonik formdaki polimerin zincir yapısından kaynaklanmaktadır. Non iyonik flokülantın yumaklaşmış kıvrımlı yapısı taneler arasında köprü oluşumunu zorlaştırmaktadır, dolayısı ile flokülasyonu olumsuz etkilemektedir (Hogg 2000).



Şekil 4.3 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında dozaja bağlı bulanıklık eğrileri (Çizelge Ek-3)

Şekil 4.3’de mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da dozaja göre elde edilen bulanıklık eğrilerinde doğal süspansiyonun bulanıklığı 68 NTU iken her üç flokülant içinde, dozaj arttıkça bulanıklığın azaldığı ancak belli bir dozajdan sonra bulanıklığın arttığı gözlenmiştir. Bir süspansiyonun bulanıklığı, çökmeden askıda duran kolloidal boyutlu katı tanelerden kaynaklanır. Anyonik flokülantta dozajın artmasıyla bulanıklıkta 2.9 NTU’ya kadar bir azalma olmuş fakat 3 mg/L dozajdan sonra bulanıklığın arttığı gözlenmiştir. Katyonik flokülant da yaklaşık 1 mg/L dozaja kadar bulanıklık azalmış fakat daha sonra bulanıklık artmıştır. Nonyonik flokülantta ise yaklaşık 4 mg/L dozaja kadar bulanıklık azalmış fakat bu dozajdan sonra yine bulanıklıkta bir artış gözlenmiştir. Belli bir dozajdan sonra bulanıklığın artmasındaki en önemli faktör aşırı dozajda flokların redisperse olmasıdır (Somasundaran and Das 1998, Gregory 1989). En iyi performansı (en az bulanıklık sonucunu) floküle etme gücü en iyi olan anyonik flokülant göstermiştir. Daha sonra sırasıyla katyonik flokülant ve non iyonik flokülant gelmektedir.

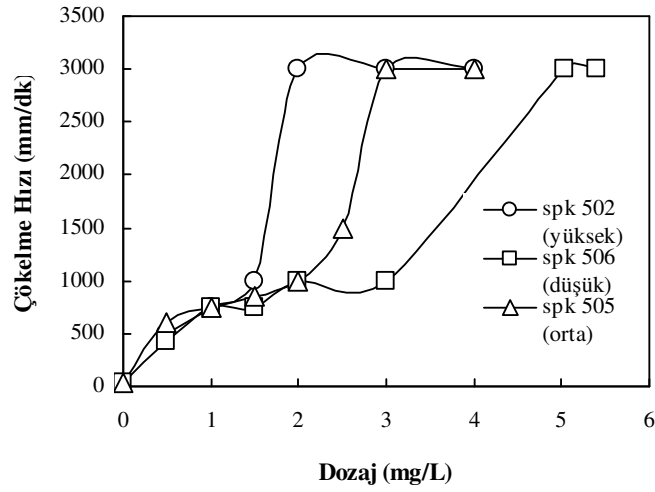


Şekil 4.4 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5'da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında zamana göre sabit dozajda (1.5 mg/L) ara yüzey yüksekliği eğrileri (Çizelge Ek-4)

Şekil 4.4'de mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5'da zamana bağlı ara yüzey yüksekliği eğrileri verilmiştir. Bu eğrilere göre performans sıralaması yapılacak olursa ilk sırayı anyonik flokülant (spk 508) almaktadır. Katyonik (spk 375) ve non iyonik (magnofloc 351) flokülantın ara yüzey yükseklikleri birbirine yakın olmakla birlikte katyonik flokülant daha iyi sonuçlar vermiştir ki bu durum Şekil 4.2 için yapılan yorumuda desteklemektedir.

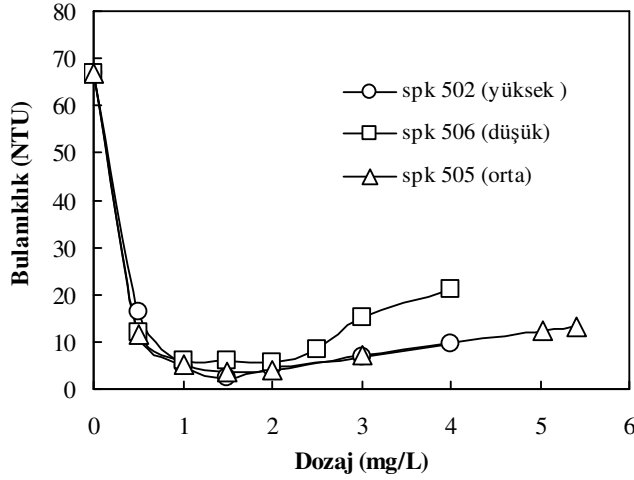
4.2.2 Flokülant Mol Ağırlığının Flokülasyona Etkisi

Mermer tozu süspansiyonunun flokülasyonunda pH 7.5'da flokülant mol ağırlığının flokülasyona etkisini incelemek için yüksek (spk 502), orta (spk 505) ve düşük (spk 506) mol ağırlığına sahip flokülantlar ile flokülasyon testleri yapılmış ve elde edilen veriler grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.5, 4.6, .4.7).



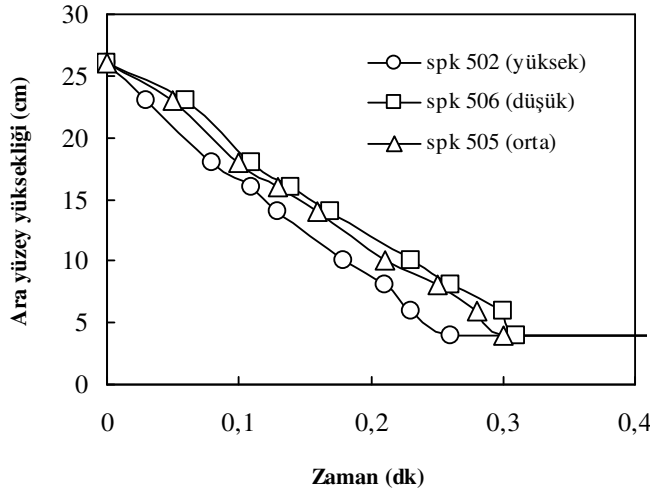
Şekil 4.5 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülantlar varlığında dozaja bağlı çökeltme hızı eğrileri (Çizelge Ek-5)

Şekil 4.5’de dozaja bağlı çökeltme hızı eğrilerinin den de görüldüğü üzere her üç flokülantda da optimum dozaj’a kadar çökeltme hızı artmıştır. Bundan sonra sabit kalmış ve daha sonra azda olsa bir düşüş gözlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere mermer süspansiyonu için en iyi çökeltme hızını veren flokülant yüksek mol ağırlıklı spk 502’dir. Spk 502 için optimum dozaj 2 mg/L, spk 505 için 3 mg/L, spk 506 için ise yaklaşık 5 mg/L’dir. Yüksek molekül ağırlıklı flokülant spk 502’nin hidrokarbon zincir uzunluğu fazla olmasından dolayı daha büyük boyutlu fakat daha poroz yapıda flokların oluşmasını sağlarken, düşük molekül ağırlıklı flokülant spk 506 nispeten daha küçük boyutlu fakat daha az poroz floklar oluşturur bundan dolayı çökeltme hızı bakımından en düşük performansı düşük molekül ağırlıklı flokülant vermektedir. Flokülantların molekül ağırlığı düştükçe polimer köprü mekanizmasıyla floküle etme performansı da düşmektedir (Gregory 1989, Hogg 2000).



Şekil 4.6 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülantlar varlığında dozaja bağlı bulanıklık eğrileri (Çizelge Ek-6)

Şekil 4.6’da dozaja göre elde edilen bulanıklık eğrilerinde başlangıçta flokülantsız ortamda 68 NTU olan mermer tozu süspansiyonunun bulanıklılığını 1.5 mg/L flokülant dozajına kadar her üç flokülant içinde birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu dozajdan sonra ise dozajın artması ile 3 flokülant içinde bulanıklığın arttığı gözlenmiştir. 1.5 mg/L dozajda yüksek mol ağırlıklı (spk 502) flokülant 2.4 NTU bulanıklık sonucu, orta mol ağırlıklı flokülant (spk 505) 3.7 NTU bulanıklık sonucu, düşük mol ağırlıklı flokülant (spk 506) ise 5.9 NTU bulanıklık sonucu vermektedir. En iyi şekilde flokülasyonu sağlamak için gerekli flokülant dozajının (optimum dozaj), katının yüzey alanının yarısını kaplayacak miktardaki dozaj olduğu ifade edilmektedir (Somasundaran and Das 1998). Şayet ortama bu dozajdan daha fazla miktarda flokülant verilirse yani taneler üzerine fazla miktarda flokülant adsorplanırsa o zaman taneler arasında köprü oluşumu engellenir. Bu durum flokülantların aşırı dozajda sterik engeli olarak da bilinmektedir (Ersoy 2005). Bu sebepten dolayı bulanıklık her üç flokülant içinde belli bir değere kadar azalmış fakat daha sonra dozajın optimum dozaj seviyesini geçmesinden sonra artmıştır. En düşük bulanıklık yüksek molekül ağırlıklı flokülantda spk 502 de gözlenmiştir. Daha sonra orta molekül ağırlıklı flokülant spk 505 ve en son olarak da düşük molekül ağırlıklı flokülant olan spk 506 gelmektedir.

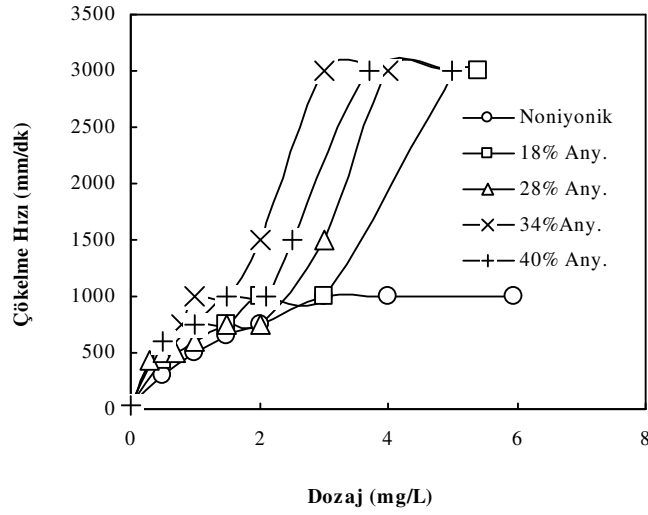


Şekil 4.7 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülantlar varlığında zamana göre sabit dozajda (1.5 mg/L) ara yüzey yüksekliği eğrileri (Çizelge Ek-7)

Şekil 4.7’de pH 7.5’da zamana bağlı ara yüzey yüksekliği eğrilerine göre en iyi performans yüksek mol ağırlıklı spk 502 flokülantı ile elde edilmiştir. Bundan sonra sırasıyla orta mol ağırlıklı flokülant (spk 505) ve düşük mol ağırlıklı flokülant (spk 506) gelmektedir. Şekil 4.7’de zamana bağlı ara yüzey yüksekliği eğrilerinde gözlenen sonuçların, daha önce şekil 4.5 ve şekil 4.6 için yapılan yorumları desteklediği görülmüştür.

4.2.3 Flokülant Yük Yoğunluğunun (Anyoniklik Derecesinin) Flokülasyona Etkisi.

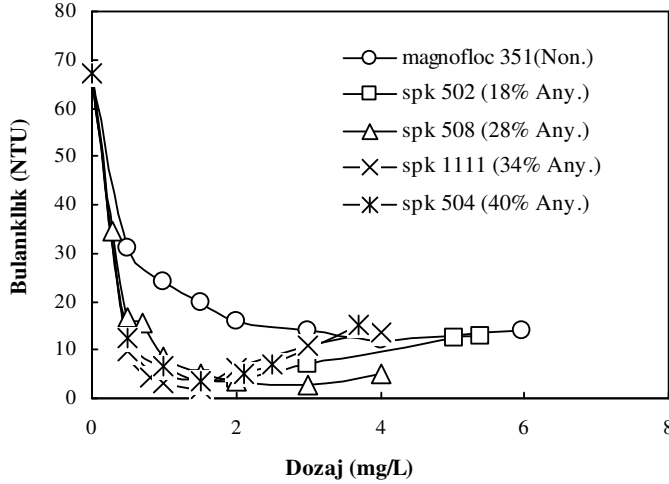
Mermer tozu süspansiyonunun flokülasyonunda, pH 7.5’da flokülant yük yoğunluğunun (anyoniklik derecesinin) flokülasyona etkisini görmek amacıyla yapılan testlerde elde edilen veriler grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.8, 4.9, 4.10).



Şekil 4.8 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5'da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlar varlığında dozaja bağlı çökeltme hızı eğrileri (Çizelge Ek-8)

Şekil 4.8'de dozaja bağlı çökeltme hızı verilerinden en iyi performansın %34 anyoniklik derecesine sahip olan spk 1111 flokülantı ile sağlandığı görülmüştür. Daha sonra sırasıyla %40 anyonik (spk 504), %28 anyonik (spk 508), %18 anyonik (spk 502), noniyonik flokülant gelmektedir. İyonik flokülantlar için sahip oldukları anyoniklik ve katyoniklik dereceleri yani yük yoğunlukları dolaylı olarak flokülantların aktivasyonunda önemli rol oynamaktadır. Örneğin non iyonik formdaki bir polimer ortamda daha yumaklaşmış kıvrımlı halde bulunurken iyoniklik derecesi arttığında polimerler daha düz ve uzun bir hal almaktadır. Bu durum ise taneler arasındaki köprü oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Stutzmann Th, Siffert B. 1997). Non iyonik flokülantın yapısından kaynaklanan sebeplerden dolayı flokülasyonda en kötü sonucu vermektedir. Anyonik flokülantlarda %18 anyonik flokülant en düşük performansı gösterirken, %28 anyonik flokülant %18'den daha iyi performans göstermiştir. Anyoniklik derecesi arttıkça flokülasyon performansının da arttığı düşünülürken %34 anyonik flokülant, %40 anyonik flokülanta göre daha iyi performans göstermiştir. Bu sonuçlardan anyonik flokülantların belli bir dereceye kadar anyoniklik derecesinin artması ile flokülasyon performansının arttığı fakat daha sonrasında anyoniklik derecesinin artmasının flokülasyonu olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Bundaki en önemli sebebin artan anyonik derecesi ile tane ve anyonik polimer arasındaki

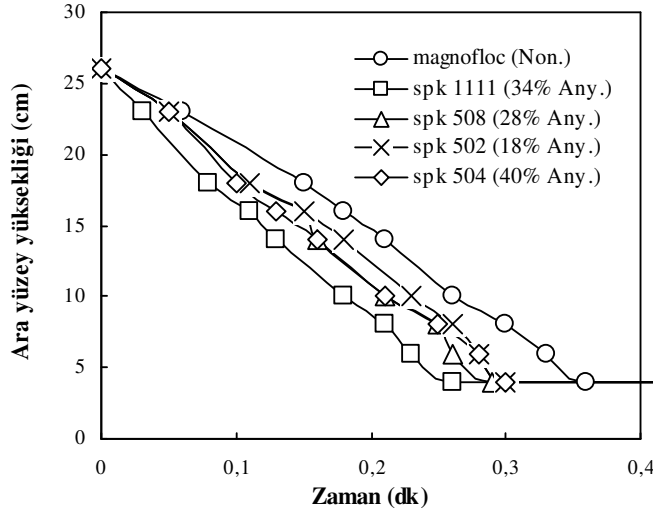
elektrostatik itme kuvvetinin artmış olması ve bu sebeple polimer-tane etkileşimini olumsuz yönde etkilemekte olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.9 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5'da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlar varlığında dozaja bağlı bulanıklık eğrileri (Çizelge Ek-9)

Şekil 4.9'da dozaja bağlı elde edilen bulanıklık verileri grafiğe aktarılmıştır. Bulanıklık testinde belli bir dozaja kadar dozaj arttıkça bulanıklık azalmakta ve kullanılan bütün flokülantlar için en iyi bulanıklık değeri 1.5 mg/L dozajında görülmektedir. Bu dozajdan sonra dozajın artmasıyla bulanıklık değerinde bir artış söz konusudur. En iyi performans 1,5 mg/L dozajında 2,1 NTU bulanıklık sonucu veren %34 anyoniklik derecesine sahip spk 1111'de gözlenmiştir. Daha sonra sırasıyla %40 anyonik spk 504, %28 anyonik spk 508, %18 anyonik spk 502 ve noniyonik flokülant gelmektedir. Non iyonik flokülantın yapısından kaynaklanan sebeplerden iyi bir flokülasyon gerçekleşmemiş ve optimum dozajda bile diğer anyonik flokülantlara göre daha yüksek bulanıklık sonuçları vermiştir. Bulanıklık parametresinden en iyi sonuçlar yüksek anyoniklik derecesine sahip flokülantlardan elde edilmiştir. Bunun sebebi ise yüksek anyoniklik derecesine sahip anyonik flokülantların polimer zincirindeki anyonik mer yani grup (karbonil -COO-) sayısının fazla olmasıdır. Anyonik yük merkezi sayısının fazla olması da daha fazla polimer köprü oluşumu ile iyi bir flokülasyon sağlamaktadır. Fakat belli bir dozajdan sonra sterik engel sebebiyle flokülantlar redisperse olmakta ve bulanıklık artmaktadır. Anyonik flokülantların içerisinde en iyi bulanıklık

sonucunu %34 anyonik flokülant vermiştir. Şekil 4.8’de anyonik flokülantlar için yapılan yorum burada da geçerli olup belli bir anyoniklik derecesinden sonra anyonik flokülantların performansının düştüğü düşünülmektedir.

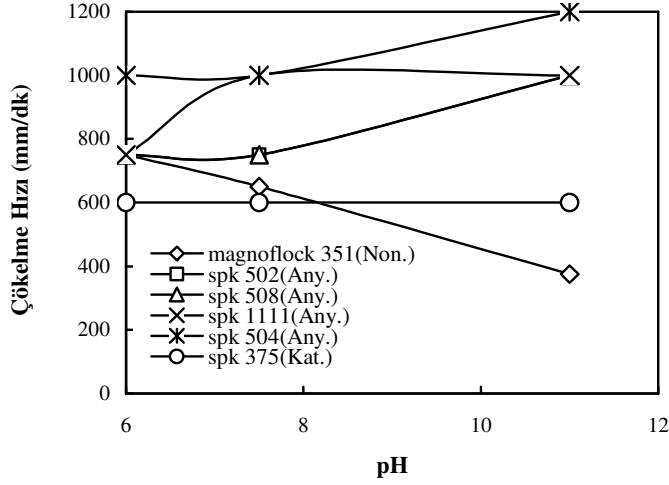


Şekil 4.10 Mermer tozu süspansiyonunun pH 7.5’de, sabit dozajda (1.5 mg/L), değişik yük yoğunluğundaki flokülantlar varlığında zamana göre ara yüzey yüksekliği eğrileri (Çizelge Ek-10)

Mermer tozu süspansiyonunun flokülasyonunda, anyoniklik derecesinin flokülasyona etkisini incelediğimiz testlerde elde edilen zamana bağlı ara yüzey yükseklikleri verileri grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.10) . En iyi performans %34 anyoniklik derecesine sahip spk 1111’de gözlenmiştir. Daha sonra sırasıyla %40 anyonik (spk 504), %28 anyonik (spk 508), %18 anyonik (spk 502) , noniyonik flokülant gelmektedir. Bu sonuçlar şekil 4.9’da yapılan yorumda desteklemektedir.

4.2.4 pH’nın Flokülasyona Etkisi

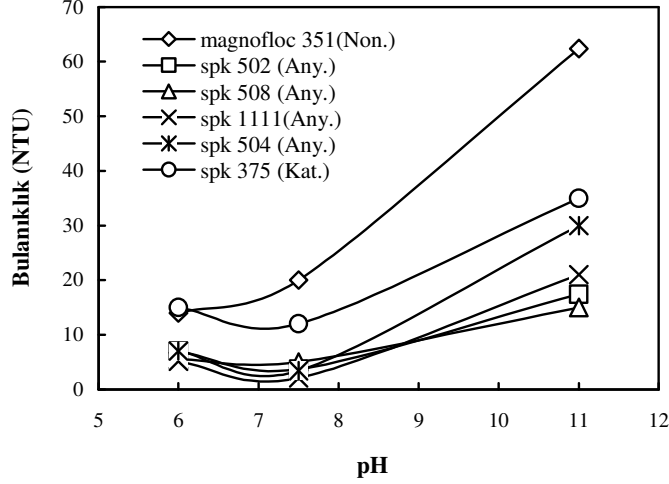
pH’nın mermer flokülasyonuna etkisini incelemek için yapılan bu testte pH 6, 7.5 ve 11’de değişik özellikte flokülantların 1.5 mg/L sabit flokülant dozajında pH’ya bağlı elde edilen çökeltme hızları ve yine pH’ya bağlı elde edilen bulanıklık verileri grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.11, 4.12).



Şekil 4.11 Mermer tozu süspansiyonunun, 1.5 mg/L sabit flokülant dozajında pH'a bağlı çökeltme hızının değişimi eğrileri (Çizelge Ek-11)

pH'ya bağlı elde edilen çökeltme hızı eğrileri Şekil 4.11'de verilmiştir. Süspansiyon pH'sının iki yönden büyük önemi vardır. Birincisi, pH flokülantın ortamdaki aktivasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Non iyonik formdaki bir polimer bile asidik ve bazik pH'larda (+) veya (-) yükler kazanabilir yani iyonik (yükü) forma dönüşebilir (Gregory 1973, Ateşok 1988). Bu da polimer ile katı tane arasında elektrostatik etkileşimi artırır. İkincisi ise pH süspansiyondaki katı tanelerin yüzey elektrik yükü kazanıp kazanmayacağı üzerinde doğrudan belirleyicidir. Non iyonik flokülantta (magnofloc 351) pH arttıkça çökeltme hızı azalmıştır. Katyonik flokülantta (spk 375) pH arttıkça çökeltme hızında bir değişiklik olmamıştır ve sabit kalmıştır. Anyonik flokülantlarda (spk 502, spk 504, spk 1111) ise pH'nın artmasıyla çökeltme hızında artmış ve en iyi sonuçlar pH 11'de elde edilmiştir. pH 11'de ise en iyi sonucu en yüksek anyoniklik derecesine sahip olan spk 504 flokülantının verdiği görülmektedir. Çok yüksek mol ağırlıklı anyonik polimerlerle yine negatif yüzey yüküne sahip mermer flokülasyonunda çoğu kolloidal sistemlerde (Özer ve diğ. 2002, Taylor et al. 2002) olduğu gibi polimer köprü teşekkülü mekanizması etkindir. Polimer köprü teşekkülü mekanizmasının en tipik özelliği polimer ve koloidal tanelerin aynı yüzey yüküne sahip olsa dahi flokülasyonun oluşması büyük boyutlu flokların yüksek çökeltme hızına sahip olmasıdır ki mermer süspansiyonu için bu yüksek çökeltme hızı

gözlemlenmiştir. Polimer köprü teşekkülünün bu özelliği birçok referans makalede de ifade edilmiştir (Hogg 2000, Gregory 1989).



Şekil 4.12 Mermer tozu süspansiyonunun 1.5 mg/L sabit flokülant dozajında pH'a bağlı bulanıklık değişimi eğrileri (Çizelge Ek-12)

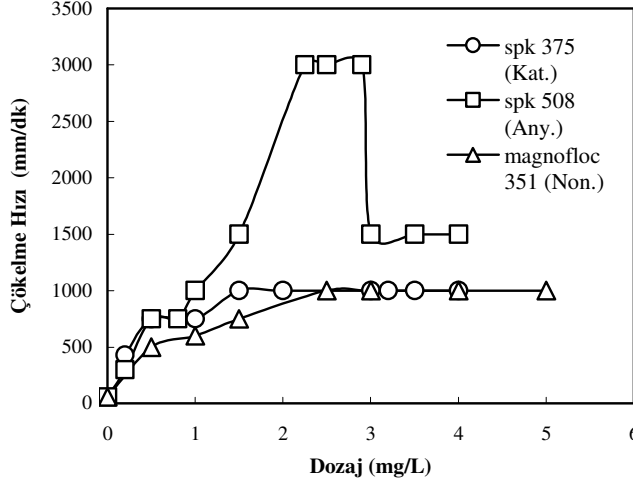
1.5 mg/L sabit flokülant dozajında pH'ya bağlı bulanıklık eğrilerinde (Şekil 4.12) en az bulanıklık sonuçları hafif asidik pH'larda (pH 6) elde edilmektedir. pH arttıkça bulanıklığın da arttığı görülmektedir. En az bulanıklık sonuçlarının elde edildiği pH olan pH 6'da en yüksek bulanıklık sonucunu katyonik flokülant spk 375 vermiştir. Daha sonra sırasıyla anyonik flokülantlar spk 504, spk 502, spk 508, spk 1111 gelmektedir. En iyi bulanıklık sonuçları hafif asidik pH'da ve anyonik flokülantlarla elde edilmiştir. Bir süspansiyonda bulanıklık yetersiz destabilizasyondan kaynaklanır (Hogg 2000). pH değeri arttıkça taneler birbirini daha çok iterek daha stabil hale gelirler stabil hale gelen bir süspansiyonda da askıda katı tanelerin çökmesi zorlaşarak bulanıklığı artırır.

4.3 Traverten Süspansiyonunun Flokülasyonu

4.3.1 Flokülant Tipinin (Katyonik, Anyonik, Noniyonik) Flokülasyona Etkisi.

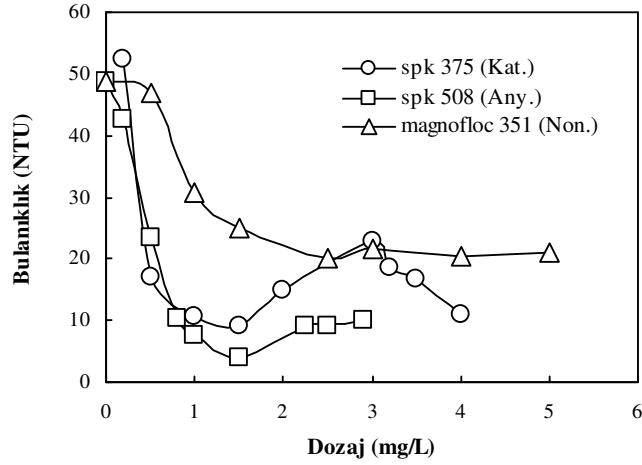
Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda flokülant tipinin flokülasyona etkisini belirlemek amacıyla katyonik anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında

flokülasyon testleri yapılmış testler sonucu elde edilen veriler grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.13, 4.14, 4.15).



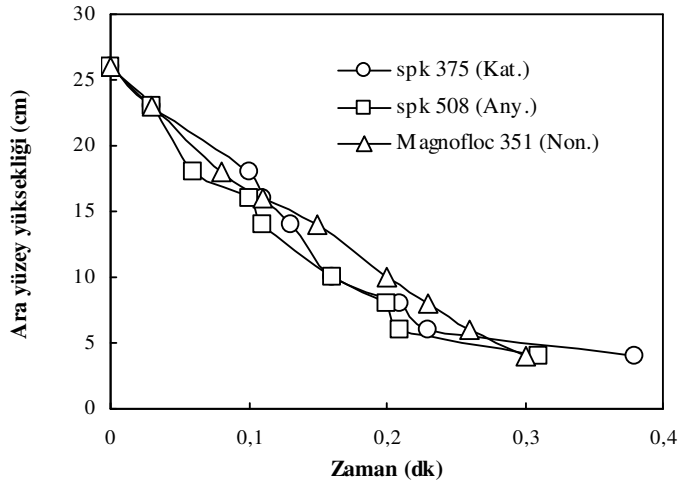
Şekil 4.13 Traverten tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında dozaja bağlı çökme hızı eğrileri (Çizelge Ek-13)

Şekil 4.13’de traverten tozu süspansiyonunun pH 7.5’da dozaja göre elde edilen çökme hızı eğrilerinin de en iyi performansı anyonik flokülantın (spk 508) gösterdiği görülmektedir. Yaklaşık 2 mg/L dozaja kadar çökme hızı artmış daha sonra sabit kalmış ve 3 mg/L flokülant dozajında da büyük bir düşüş göstermiştir. Mermer süspansiyonunun flokülasyonunda, flokülant tipinin flokülasyona etkisini incelediğimiz bölümde anyonik flokülant için yapılan yorum traverten süspansiyonu flokülasyonu içinde geçerlidir. Yani anyonik flokülantın diğer flokülantlara göre daha iyi performansının olmasında polimer köprü mekanizmasının önemli rolü vardır. Katyonik flokülantta ise dozaja karşı çökme hızındaki artış daha az olmakta ve yaklaşık 1,5 mg/L dozajdan sonra sabitlenme gözlenmektedir. Non iyonik flokülant ile yapılan flokülasyon da katyonik flokülant ile yapılan flokülasyona benzer şekilde olmuş önce belli bir dozaja kadar dozaj arttıkça çökme hızı artmış daha sonra sabit kalmıştır. Non iyonik flokülantlarla yapılan flokülasyonun performansının düşük olması non iyonik formdaki polimerin zincir yapısından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.14 Traverten tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülantlar varlığında dozaja bağlı bulanıklık eğrileri (Çizelge Ek-14)

Şekil 4.14’de traverten süspansiyonu tozunun dozaja göre elde edilen bulanıklık verileri grafiğe aktarılmıştır. Anyonik ve katyonik flokülantlar ile yaklaşık 1.5 mg/L dozaja kadar bulanıklık azalmış fakat daha sonra dozajın artmasıyla bulanıklık artmıştır. Mermer süspansiyonunun flokülasyonunun da, flokülant tipinin flokülasyona etkisini incelediğimiz bölümde yapılan yorum traverten süspansiyonu flokülasyonu içinde geçerlidir. Non iyonik flokülantta ise dozajın artması ile bulanıklıktaki azalma daha az olmuş en düşük bulanıklık verisi yaklaşık 2 mg/L dozajdan sonra hemen hemen sabit kalmıştır. Her üç flokülant içinde en düşük bulanıklık verileri yaklaşık 1.5 mg/L dozajda elde edilmiş olup bu dozajda anyonik flokülant (spk 508) 4 NTU bulanıklık değeri, katyonik flokülant (spk 375) 9.25 NTU bulanıklık değeri, noniyonik flokülant (magnofloc 351) 25 NTU bulanıklık değeri vermiştir. En iyi performansı (en az bulanıklık sonucunu) floküle etme gücü en iyi olan anyonik flokülant göstermiştir. Daha sonra sırasıyla katyonik flokülant ve non iyonik flokülant gelmektedir.

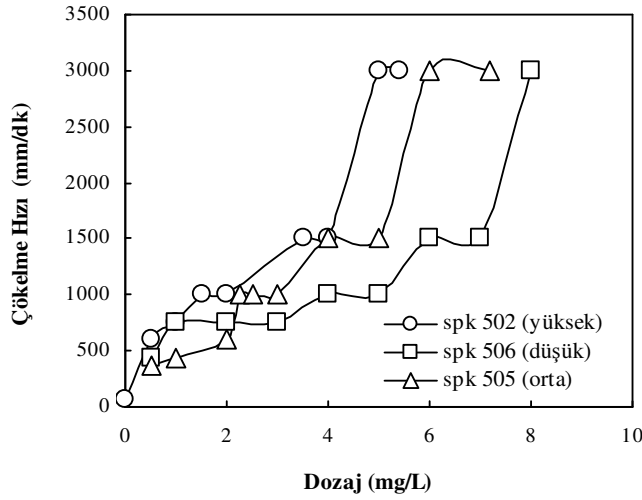


Şekil 4.15 Traverten tozu süspansiyonunun pH 7.5’da katyonik, anyonik ve noniyonik flokülant katkılarıyla yapılan flokülasyon da zamana göre sabit dozajda (1.5 mg/L) ara yüzey yüksekliği eğrileri (Çizelge Ek-15)

Zamana bağlı ara yüzey yüksekliği eğrilerinde (Şekil 4.15) en iyi performansı gösteren flokülant anyonik flokülant spk 508’dir. Bunu katyonik flokülant (spk 375) ve noniyonik flokülant (magnofloc) takip etmektedir. Bu durum da şekil 4.13 için yapılan yorumu desteklemektedir.

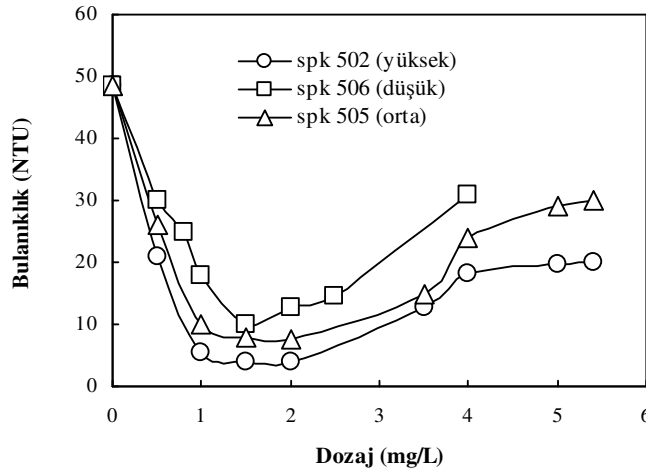
4.3.2 Flokülant Mol Ağırlığının Flokülasyona Etkisi

Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda flokülant mol ağırlığının flokülasyona etkisini görmek amacıyla pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük molekül ağırlıklı flokülantlarla yapılan testlerden elde edilen veriler grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.16, 4.17, 4.18).



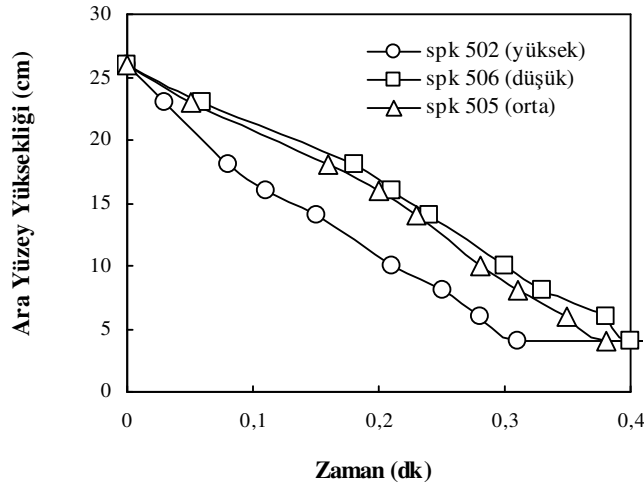
Şekil 4.16 pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülant ilavesi ile yapılan flokülasyon da dozaja bağlı çökelme hızı eğrileri (Çizelge Ek-16)

Şekil 4.16’da dozaja bağlı çökelme hızı eğrilerlerinden de görüldüğü üzere her üç flokülant içinde belli bir dozaja kadar çökelme hızı artmış daha sonra sabit kalmış ve daha sonrada düşmüştür. Traverten tozu süspansiyonu için en iyi çökelme hızını veren flokülant yüksek mol ağırlıklı spk 502’dir. Daha sonra sırasıyla orta molekül ağırlıklı spk 505 ve düşük molekül ağırlıklı spk 506 gelmektedir. Spk 502 ile yapılan flokülasyon da yaklaşık 3 mg/L dozaja kadar çökelme hızı artmış, bu dozajdan sonra sabit kalmış ve daha sonra dozajın artmasıyla da çökelme hızı azalmıştır. Yüksek molekül ağırlıklı flokülant spk 502, polimer zincir uzunluğu fazla olmasından dolayı daha büyük boyutlu fakat daha poroz yapıda flokların oluşmasını sağlarken, düşük molekül ağırlıklı flokülant spk 506 nispeten daha küçük boyutlu fakat daha sağlam (daha az poroz) floklar oluşturur. Flokülantların molekül ağırlığı düştükçe floküle etme performansı da düşmektedir (Gregory 1973, Hogg 2000). Bundan dolayı çökelme hızı bakımından en düşük performansı düşük molekül ağırlıklı flokülant vermektedir.



Şekil 4.17 pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülant ilavesi ile yapılan flokülasyonda dozaja bağlı bulanıklık eğrileri (Çizelge Ek-17)

Şekil 4.17’de dozaja bağlı elde edilen bulanıklık eğrilerinde her üç flokülantta da yaklaşık 1,5 mg/L dozaja kadar dozajın artmasıyla bulanıklığın azaldığı bu dozajdan sonrada dozajın artmasıyla bulanıklığında arttığı görülmüştür. 2 mg/L flokülant dozajında yüksek mol ağırlıklı spk 502 flokülantı 3.9 NTU bulanıklık sonucu, orta mol ağırlıklı spk 505 flokülantı 7.5 NTU bulanıklık sonucu, düşük mol ağırlıklı spk 506 flokülantı ise 12.7 NTU bulanıklık sonucu vermiştir. En iyi şekilde flokülasyonu sağlamak için gerekli flokülant dozajının (optimum dozaj) , katının yüzey alanının yarısını kaplayacak miktardaki dozaj olduğu ifade edilmektedir (Somasundaran and Das 1998). Şayet ortama bu dozajdan daha fazla miktarda flokülant verilirse yani taneler üzerine fazla miktarda flokülant adsorplanırsa o zaman taneler arasında köprü oluşumu engellenir. Bu durum flokülantların aşırı dozajda sterik engeli olarak da bilinmektedir (Ersoy 2005). Bu sebepten dolayı bulanıklık her üç flokülant içinde belli bir değere kadar azalmış fakat daha sonra dozajın optimum dozaj seviyesini geçmesinden sonra artmıştır. En düşük bulanıklık yüksek molekül ağırlıklı flokülantta spk 502’de gözlenmiştir. Daha sonra orta molekül ağırlıklı flokülant spk 505 ve en son olarak da düşük molekül ağırlıklı flokülant olan spk 506 gelmektedir.

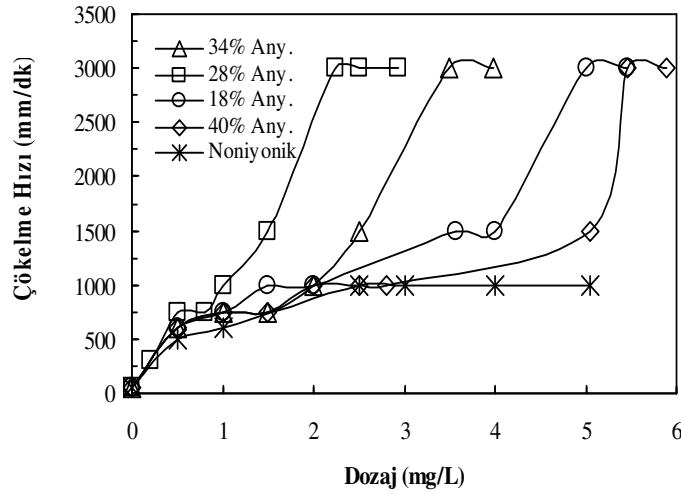


Şekil 4.18 pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülant ilavesi ile yapılan flokülasyon da zamana göre sabit dozajda (1.5 mg/L) ara yüzey yüksekliği eğrileri (Çizelge Ek-18)

pH 7.5’da yüksek, orta ve düşük mol ağırlıklı flokülant ilavesi ile sabit dozajda (1.5 mg/L) yapılan flokülasyon da zamana göre ara yüzey yüksekliği eğrileri şekil 4.18’de görülmektedir. Şekle göre en iyi performansın yüksek molekül ağırlıklı flokülant spk 502’den alındığı görülmektedir. Daha sonra sırasıyla orta molekül ağırlıklı spk 505 ve düşük molekül ağırlıklı spk 506 flokülantları gelmektedir ki bu sonuçlar daha önce Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 için yapılan yorumları desteklemektedir.

4.3.3 Flokülant Yük Yoğunluğunun (Anyoniklik Derecesinin) Flokülasyona Etkisi

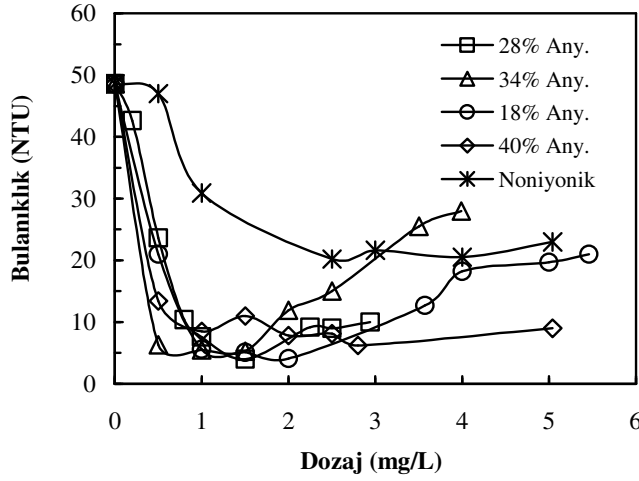
Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda flokülant yük yoğunluğunun (anyoniklik derecesinin) flokülasyona etkisini görmek amacıyla pH 7.5’de değişik anyoniklik derecesine sahip flokülantlarla yapılan testlerde elde edilen veriler grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21).



Şekil 4.19 pH 7.5’da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlarla yapılan flokülasyonda dozaja bağlı çökme hızı eğrileri (Çizelge Ek-19)

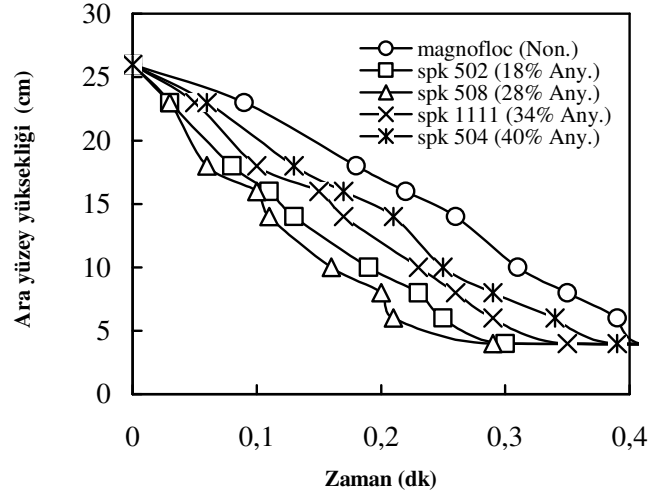
Dozaja bağlı çökme hızı eğrilerinde (Şekil 4.19) en iyi performansı gösteren % 28 anyoniklik derecesine sahip spk 508 flokülantıdır. Daha sonra sırasıyla %34 anyonik spk 1111, %18 anyonik spk 502, % 40 anyonik spk 504 ve en son olarak da noniyonik flokülantlar gelmektedir. İyonik flokülantlar için sahip oldukları anyoniklik veya katyoniklik dereceleri yani yük yoğunlukları dolaylı olarak flokülantların aktivasyonunda önemli rol oynamaktadır. Örneğin non iyonik formdaki bir polimer ortamda daha yumaklaşmış kıvrımlı halde bulunurken iyoniklik derecesi arttığında daha düz ve uzun bir hal almaktadır. Bu durum ise taneler arasındaki köprü oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Stutzmann Th and Siffert B. 1997). Noniyonik flokülantın yapısından kaynaklanan sebeplerden dolayı flokülasyonda en sonuncu sırada yer almaktadır. Ancak bu grafikten anlaşılacağı üzere düşük anyoniklik derecesine sahip flokülantların floküle etme gücü düşüktür fakat çok yüksek flokülantların da floküle etme gücü düşük olmaktadır. Grafikte de görüldüğü üzere en iyi performansı %28 anyoniklik derecesine sahip spk 508 flokülantı ve %34 anyonik spk 1111 flokülantı vermektedir. Anyoniklik derecesi daha düşük olan %18 anyonik spk 502 ve anyoniklik derecesi daha yüksek olan %40 anyonik spk 504 flokülantları ise birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Aslında anyonik flokülantların hepsinde de çökme hızı en yüksek seviyeye çıkmaktadır (3000mm/dk) fakat bu seviyeye çıkmak için harcanan flokülant miktarları flokülantların her birinde farklı olmaktadır. %28 anyonik spk 508 flokülantı ile

2.25 mg/L dozajda 3000 mm/dk çökelme hızına ulaşılırken, %34 anyonik spk 1111 ile 3.5 mg/L dozajda, %18 anyonik spk 502 ile 5 mg/L dozajda, %40 anyonik spk 504 ile 5.46mg/L dozajda 3000 mm/dk çökelme hızına ulaşılmıştır. Nonyonik flokülantla ise bu dozaja ulaşamamıştır. Bu sonuçlardan her flokülant için optimum dozajın farklı olduğu sonucu çıkarılmaktadır.



Şekil 4.20 pH 7.5'da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlarla yapılan flokülasyonda dozaja bağlı bulanıklık eğrileri (Çizelge Ek-20)

pH 7.5'da dozaja göre elde edilen bulanıklık eğrilerinde (Şekil 4.20) 1.5 mg/L flokülant dozajında %28 anyoniklik derecesine sahip olan spk 508'de flokülantı 4 NTU bulanıklık sonucu, %18 anyonik spk 502'de 5.1 NTU bulanıklık sonucu, %34 anyonik spk 1111'de 5.3 NTU bulanıklık sonucu, %40 anyonik spk 504'de 11 NTU bulanıklık sonucu, noniyonik flokülant ise 25 NTU bulanıklık sonucu elde edilmiştir. Non iyonik flokülantın yapısından kaynaklanan sebeplerden ötürü flokülasyon performansı düşük olup dolayısı ile bulanıklığı yüksektir. Anyonik flokülantlarda ise şekil 4.19'da anlatılan yorum burada da geçerli olmakla birlikte şekil 4.19'da çökelme hızı bakımından 2. iyi performansı gösteren %34 anyonik spk 1111 bulanıklık bakımından 3. iyi performansı göstermiştir. Buda en iyi çökelme hızı şartlarının her zaman en iyi bulanıklık şartlarını sağlamadığını ortaya koymaktadır.

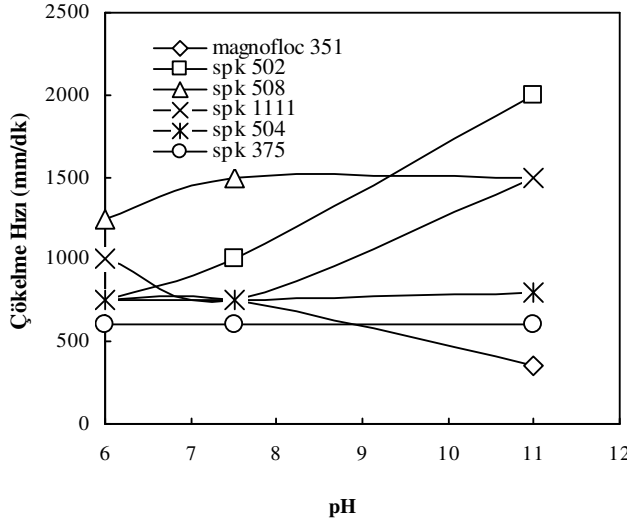


Şekil 4.21 pH 7.5’da değişik yük yoğunluğundaki flokülantlarla yapılan flokülasyonda sabit dozajda (1.5 mg/L) zamana göre ara yüzey yüksekliği eğrileri. (Çizelge Ek-21)

Şekil 4.21’de pH 7.5’da zamana bağlı ara yüzey yükseklikleri grafiğe aktarılmıştır. Şekle göre en iyi performansı %28 anyonik spk 508 vermektedir. Daha sonra sırasıyla %18 anyonik spk 502, %34 anyonik spk 1111, %40 anyonik spk 504, noniyonik flokülant gelmektedir. Bu sonuçlar şekil 4.20’de yapılan yorumları desteklemektedir.

4.3.4 pH’nın Flokülasyona Etkisi

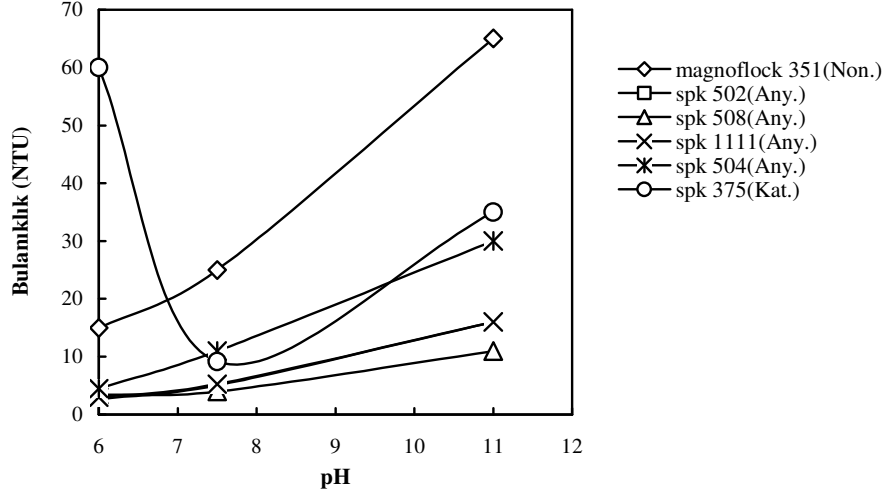
Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda farklı flokülantların 1.5 mg/L sabit flokülant dozajında hafif asidik, hafif bazik ve doğal pH’ların flokülasyona etkisini görmek amacıyla yapılan testlerde elde edilen veriler grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.22, 4.23).



Şekil 4.22 1.5 mg/L sabit flokülant dozajında değişik pH'larda yapılan flokülasyonda pH'a göre çökme hızı eğrileri (Çizelge Ek-22)

1.5 mg/L sabit flokülant dozajında pH'ya bağlı çökme hızı eğrilerinde (Şekil 4.22) anyonik flokülant spk 502 ile yapılan flokülasyonda pH arttıkça çökme hızında artmış ve en iyi çökme hızı bazik pH'da (pH 11) elde edilmiştir. Anyonik spk 508 flokülantı için en iyi çökme hızı doğal pH'da (pH 7.5) elde edilmiştir. Anyonik spk 1111 flokülantı için yine çökme hızı pH arttıkça artmış ve en iyi çökme hızı bazik pH'da (pH 11) elde edilmiştir. Yine anyonik bir flokülant olan spk 504 flokülantı içinde pH artışı ile çökme hızı az bir artış göstererek en iyi performans bazik pH'da elde edilmiştir. Katyonik flokülant spk 375'de ise pH artışı ile çökme hızında herhangi bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Nonyonik flokülant magnofloc 351'de ise hafif asidik ve doğal pH'da sabit kalıp bazik pH'da bir düşüş gözlenmiştir. Bu sonuçlardan traverten tozu süspansiyonu için en iyi performansı anyonik flokülantların yüksek pH'larda verdiği çıkarılmaktadır. Çok yüksek mol ağırlıklı anyonik polimerlerle yine negatif yüzey yüküne sahip mermer flokülasyonunda çoğu koloidal sistemlerde (Özer ve diğ. 2002, Taylor et al. 2002) olduğu gibi polimer köprü teşekkülü mekanizması etkindir. Polimer köprü teşekkülü mekanizmasının en tipik özelliği polimer ve koloidal tanelerin aynı yüzey yüküne sahip olsa dahi flokülasyonun oluşması büyük boyutlu flokların yüksek çökme hızına sahip olmasıdır ki mermer süspansiyonu için bu yüksek

çökeltme hızı gözlemlenmiştir. Polimer köprü teşekkülünün bu özelliği birçok referans makalede de ifade edilmiştir (Hogg 2000, Gregory 1989).



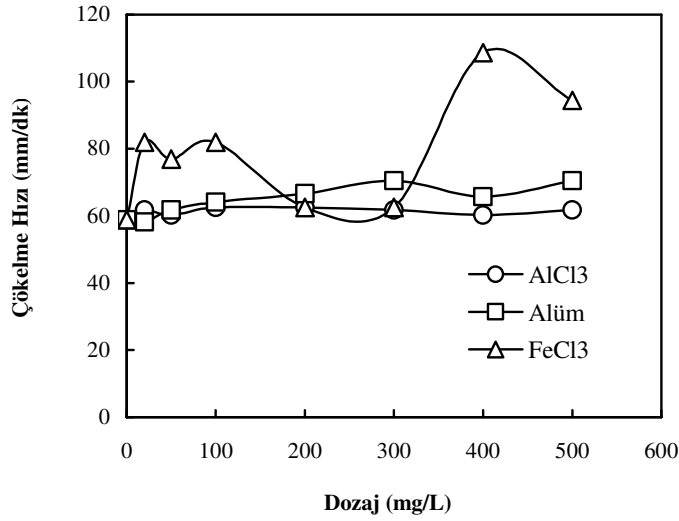
Şekil 4.23 1.5 mg/L sabit flokülant dozajında değişik pH'larda yapılan flokülasyonda pH'a göre bulanıklık eğrileri (Çizelge Ek-23)

Şekil 4.23'de 1.5 mg/L sabit flokülant dozajında hafif asidik, bazik ve nötr pH'lara göre bulanıklık eğrileri görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere kationik flokülant spk 375 hariç diğer flokülantlarda pH artışı ile bulanıklıkta da bir artış söz konusudur. En iyi performansı yani en az bulanıklık değerini anyonik flokülantların (spk 502, spk 508, spk 1111 ve spk 504) hafif asidik pH'da (pH 6) sağladığı görülmektedir. Anyonik flokülantların içerisinde en iyi performansı ise 2.7 NTU bulanıklık değeri ile spk 502 flokülantı sağlamıştır. Daha sonra sırası ile 3 NTU bulanıklık değeri ile spk 1111, 3.5 NTU bulanıklık değeri ile spk 508 ve 4.5 NTU bulanıklık değeri ile spk 504 flokülantı gelmektedir. Kationik flokülant spk 375 içinse pH 6'da 60 NTU olan bulanıklık pH 7.5'da 9.2 NTU'ya kadar düşerek en iyi performansı göstermiştir ve pH 11'de tekrar 35 NTU'ya çıkmıştır. Non iyonik flokülantta ise pH'ın artmasıyla bulanıklıkta da artış olmuş ve en düşük bulanıklık pH 6'da elde edilmiştir. pH değeri arttıkça taneler birbirini daha çok iterek daha stabil hale gelirler stabil hale gelen bir süspansiyonda da askıda katı tanelerin çökmesi zorlaştığı için bulanıklık artmaktadır.

4.4 Traverten Süspansiyonunun Koagülasyonu

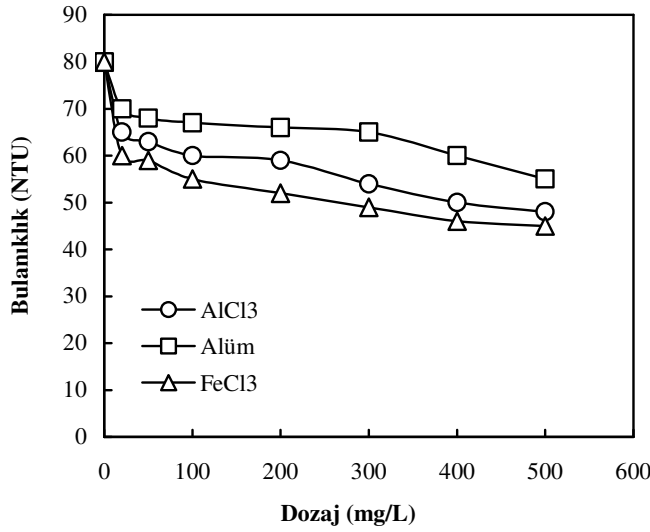
4.4.1 Koagülant Tipinin Koagülasyona Etkisi

Traverten tozu süspansiyonunun koagülasyonunda koagülant tipinin koagülasyona etkisini görmek amacıyla pH 7.5'da (+3) değerlikli metal katyonuna sahip koagülantlar varlığında bir dizi çökeltme testleri yapılmıştır. Bu testlerde Alüm, $AlCl_3$, $FeCl_3$ gibi su-atıksu arıtımında en çok bilinen ve kullanılan koagülant türleri kullanılarak bir dizi koagülasyon çalışması yapılmış ve elde edilen veriler grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.24, 4.25, 4.26).



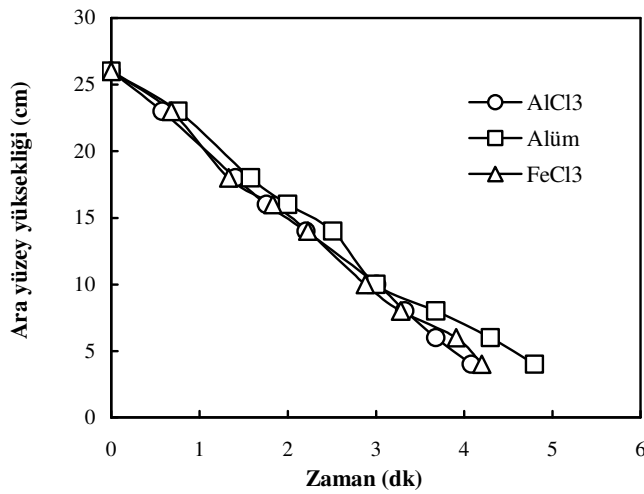
Şekil 4.24 pH 7.5'da her bir koagülant (Alüm, $AlCl_3$, $FeCl_3$) varlığında dozaja göre çökeltme hızı (Vs) eğrileri (Çizelge Ek-24)

Şekil 4.24'de dozaja göre elde edilen çökeltme hızı eğrilerinde, $FeCl_3$ koagülantının eğrisinde 100 mg/L dozajda 80 mm/dk olan çökeltme hızı bu dozajdan sonra 300 mg/L dozaja kadar düşmüştür. 300 mg/L dozajdan sonra dozajın artmasıyla çökeltme hızında buna paralel bir artış olmuş ve 400 mg/L dozajında çökeltme hızı 108.6 mm/dk'ya kadar ulaşarak diğer koagülantlara göre daha yüksek çökeltme hızı değeri elde edilmiştir. Bu da 300 mg/L dozajdan sonra ortam şartlarında süpürme koagülasyon mekanizmasının etkinliğinin çok büyük oranda arttığını göstermektedir. Alüm ve $AlCl_3$ koagülantlarının ise hemen hemen birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.



Şekil 4.25 pH 7.5'da her bir koagülant (Alüm, $AlCl_3$, $FeCl_3$) varlığında dozaja göre bulanıklık eğrileri. (Çizelge Ek-25)

Şekil 4.25'de her 3 tip koagülantın pH 7.5'daki dozaja bağlı bulanıklık eğrileri bir arada verilmiştir. Doğal pH'da en düşük bulanıklık verilerini $FeCl_3$ ile elde edildiği görülmektedir. Daha sonra $AlCl_3$ ve en son olarak da Alüm gelmektedir. Bu sonuçlara göre doğal pH'da yapılan koagülasyon için Cl^- esaslı koagülantların SO_4^{2-} esaslı olanlara göre daha iyi sonuç verdiğini söylemek mümkündür. Bu sonucu daha önce literatürde yapılmış birçok çalışma desteklemektedir (Hek et al. 1978, Kim et al. 2003).

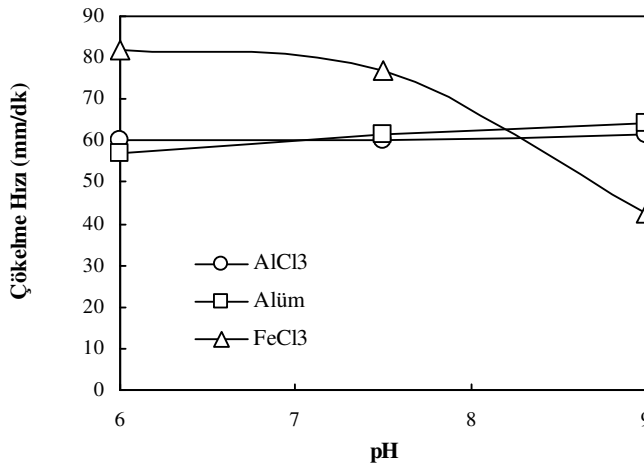


Şekil 4.26 pH 7.5'da ve 50 mg/L dozajda her bir koagülant ($AlCl_3$, Alüm, $FeCl_3$) varlığında zamana göre ara yüzey yüksekliği eğrileri. (Çizelge Ek-26)

Şekil 4.26'de zaman bağılı çizilen ara yüzey yüksekliği eğrilerinde en iyi performansı sırasıyla FeCl_3 , AlCl_3 , Alüm koagülantları vermektedir ki bu sonuçlarda şekil 4.24 için yapılan yorumu desteklemektedir.

4.4.2 pH'nın Koagülasyona Etkisi

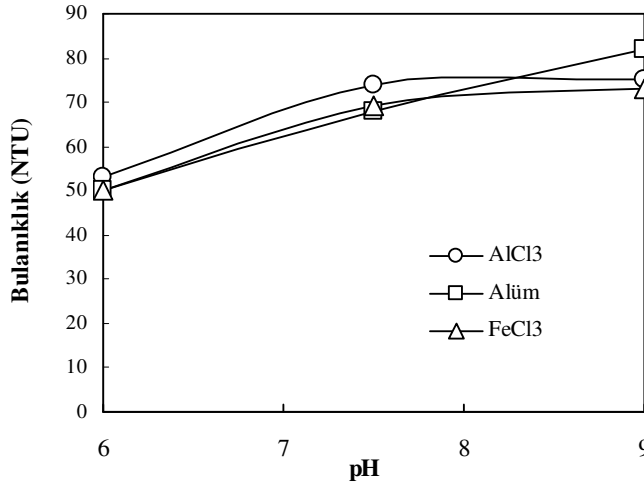
Traverten tozu süspansiyonunun koagülasyonunda pH'nın koagülasyona etkisini incelemek için 50 mg/L sabit koagülant dozajında hafif asidik (pH 6), bazik (pH 9) ve doğal pH'larda (pH 7.5) AlCl_3 , Alüm, FeCl_3 koagülantları ile bir dizi çalışma yapılmıştır ve elde edilen veriler grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.27, 4.28).



Şekil 4.27 50 mg/L sabit dozajda her bir koagülant varlığında pH'da göre çökeltme hızı eğrileri (Çizelge Ek-27)

pH'ya göre çökeltme hızı eğrilerinde (Şekil 4.27) FeCl_3 için pH arttıkça çökeltme hızında bir azalma, AlCl_3 ve Alüm'de ise pH artışı ile birlikte çok az bir miktar artış söz konusudur. Burada her üç flokülant içinde en iyi performans hafif asidik pH'da (pH 6)ve FeCl_3 ile alınmıştır. FeCl_3 ile pH 6'da elde edilen en iyi koagülasyon veriminin nedeni bu pH'da negatif yüke sahip traverten üzerine depolanan (çökelen) artı yüklü $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bileşiklerinin sağladığı yük nötralizasyonu mekanizmasının koagülasyonda da etkili olmasıdır. pH 7.5'da oluşan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 'in çok düşük zeta potansiyeline sahip olması ve pH 9'da oluşan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 'in ise

negatif yüzey yüküne sahip olması bu sebeple koagülasyon için gereken tane-tane etkileşiminin yeterli olmaması veya tam tersi bu etkileşimin koagülasyona ters yönde etki etmesinden kaynaklandığı söylenebilir (Dzombak and Morel 1990, Parks 1965).



Şekil 4.28 50 mg/L sabit dozajda her bir koagülant varlığında pH'ya bağlı bulanıklık eğrileri (Çizelge Ek-28)

Şekil 4.28'de pH'ya göre elde edilen bulanıklık eğrilerinde üç koagülant içinde pH'nın artışına bağlı olarak bulanıklık da bir artış söz konusudur.. Bulanıklık eğrilerinden de anlaşılacağı gibi üç koagülantta birbirine yakın sonuçlar vermiş ve her 3 koagülant içinde en iyi bulanıklık verileri pH 6'da elde edilmiştir. Ancak en düşük bulanıklık verilerini her üç pH'da da FeCl₃ koagülantı vermiştir. AlCl₃ ile yapılan koagülasyon çalışmasında pH'nın azalmasıyla bulanıklığın da azaldığı ve bulanıklık için en iyi sonucun pH 6'da elde edildiği görülmektedir. Bu durumun pH 6'da elde edilen koagülasyonda hem yük nötralizasyonun ki bu pH 6'da pozitif yüke sahip bulk çözeltilde oluşan Al(OH)₃ çökeleğinin (Kusaka et all. 1997) veya olası artı yüklü kompleks Al-Hidroksil bileşiklerinin aynı pH'da negatif yüke sahip traverten (Ersoy 2005) üzerine adsorblanmasıyla (veya depolanmasıyla) oluştuğu düşünülmektedir, ve hem de Al(OH)₃ çökeleğinin oluşması sırasında meydana gelen süpürme yönteminin bir arada etkin olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. pH 7.5 ve 9'daki koagülasyonlar da ise süpürme yönteminin çok daha egemen olduğu ve yük nötralizasyonunun etkinliğinin azaldığı ve özellikle

pH 9'da bunun tamamen kaybolduğu söylenebilir. Çünkü $\text{Al}(\text{OH})_3$ 'in sıfır yük noktası pH 9.3 (Kragten 1978, Kusaka et all. 1997) olup $\text{Al}(\text{OH})_3$ 'in yüzey yüklü (veya zeta potansiyeli) pH 9'da sıfıra çok yakın olduğundan eksi yüzey yüklü traverten ile elektrostatik etkileşim zayıflayacak ve dolayısıyla kümeleşme ihtimali azalacaktır. Ayrıca pH 9'da ortamda kısmen de olsa bulunabilecek $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ kompleksi nedeniyle traverten süspansiyonundaki dispersiyonun artmasına yani koagülasyon şartlarının bozulmasına neden olabilir. Diğer yandan bu çalışmadaki gibi yüksek katı konsantrasyonlu süspansiyonların genelde ortokinetik tür koagülasyon kinetiğine sahip olduğu ve bunun geçerli olduğu sistemlerde de süpürme koaglasyonundan ziyade yk nötralizasyonu ile koagülasyonun çok daha önemli olduğu ifade edilmekte olup (Gregory 1989) bu çalışmanın sonuçlarını desteklemektedir.

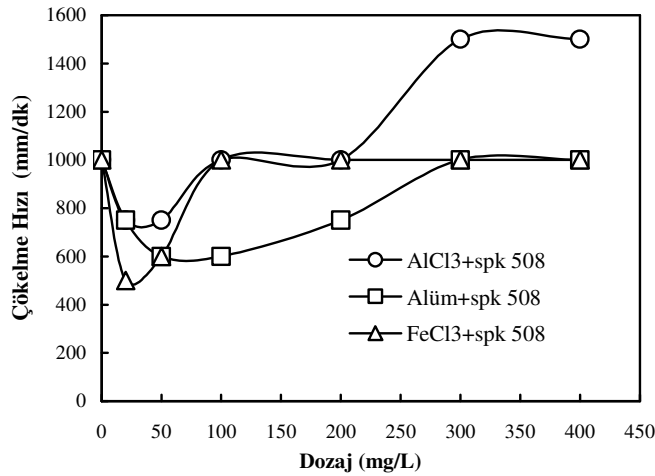
AlCl_3 ile aynı metal kationuna sahip Alüm ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$) tipi koaglantla yapılan çalışmada ise yine AlCl_3 'e benzer şekilde pH'nın artmasıyla bulanıklığında arttığı görülmektedir. Esas itibarıyla AlCl_3 için yapılan yorum Alüm içinde geçerlidir çünkü aynı metal kationuna sahiptir. Ancak buradaki önemli fark Al^{+3} kationuna eşlik eden anyonik yapının farklı olmasına dayalı olarak oluşacak $\text{Al}(\text{OH})_3$ 'in kısmende olsa farklılık gösterebileceği tespit edilmiştir.

Demir Klorür ($\text{FeCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) koagülantı ile yapılan koagülasyonda yine AlCl_3 ve Alme benze bir davranış sergilediği görülmüştür. Yani koagülasyon verimi (bulanıklığın giderilmesi) bakımından 50 mg/L dozajda en iyi sonucun pH 6'da elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte FeCl_3 diğer iki koagülanta göre de en iyi sonuçları vermekte olup pH 6'da en düşük bulanıklık verisi elde edilmiştir. Literatürde FeCl_3 varlığında özellikle kil(kaolinit)-su koloidal süspansiyonlarının koagülasyonu ve Fe adsorbsiyonu konusunda detaylı çalışmalar yapılmıştır. Farklı pH'larda yapılan bu çalışmalarda birbirinden çok farklı koagülant dozajları kullanılmıştır, mesela 1–3 mg/L (Ching et al. 1994) ve 100–3000 mg/L (Pierre and Ma 1997) gibi. Yine kimyasal tesis atık sularından bulanıklığın giderilmesinde 0–100 mg/L FeCl_3 dozajlarında çalışmalar yapılmıştır (Poon and Chu 1999). Ching et al. (1994)'nin elde ettiği sonuçlar bizim 50 mg/L aralığında elde edilen sonuçlarla

benzerlik göstermektedir. Bu dozajda pH 6'da elde edilen en iyi koagülasyon veriminin nedeni bu pH'da negatif yüke sahip traverten üzerine depolanan (çökelen) artı yüklü $\text{Fe}(\text{OH})_3$ bileşiklerinin sağladığı yük nötralizasyonu mekanizmasının koagülasyonda da etkili olmasıdır. Kimyasal fabrika atık suyundan FeCl_3 ile bulanıklığın giderilmesinde (atıksuyun kendi tabii pH'sında) atık suyun içerdiği askıda katı madde miktarının önemli bir etki gösterdiği ve 0–20 mg/L FeCl_3 dozajına kadar düşük oranda askıda katı madde içeren atıksudan daha iyi sonuç alınırken 20–100 mg/L konsantrasyonda ise yüksek oranda askıda katı madde içeren atıksudan daha iyi sonuç alınmıştır (Poon and Chu, 1999). Geniş bir dozaj aralığında yüksek askıda katı maddeli atık sudan elde edilen bu sonuç, ortamdaki katı tane konsantrasyonunun yüksek olmasına ve tane-tane etkileşiminin artmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir.

4.5 Koagülant Katkısının Traverten Süspansiyonunun Flokülasyonuna Etkisi (Koagülasyon +Flokülasyon)

Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda koagülant katkısının etkisini (koagülasyon+flokülasyon) görmek için pH 9'da ve 1.3 mg/L sabit spk 508 flokülantı katkısı ile değişik dozajlarda koagülant katkısı ile bir dizi çalışma yapılmıştır ve elde edilen veriler grafiğe aktarılmıştır (Şekil 4.29, Şekil 4.30).



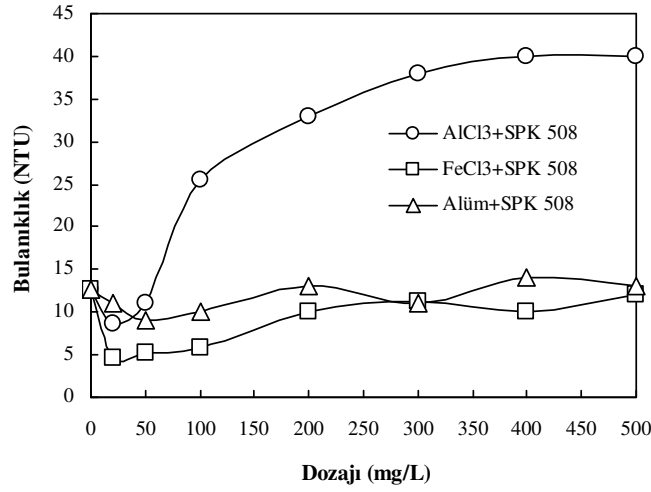
Şekil 4.29. pH 9'da 1.3 mg/L sabit spk 508 varlığında koagülant dozajına göre çökeltme hızı eğrileri (Çizelge Ek-29)

Şekil 4.29'da optimum flokülant dozajında (1.3 mg/L) ve pH 9'da spk 508 flokülantı ile yapılan flokülasyonda değişik dozajlarda koagülant ilavesi ile elde edilen çökelme hızı eğirlerinde başlangıçta sadece flokülantlı (koagülant katkısız) çöktürme deneyinde 1000 mm/dk olan çökelme hızı 20 mg/L FeCl₃ koagülantı katkısı ile yarı yarıya düşerek 500 mm/dk olmuştur. Dozajın artmasıyla 100 mg/L dozaja kadar çökelme hızı da artmış bu dozajdan sonrada 400 mg/L dozaja kadar sabit kalmıştır.

Alüm koagülantı katkısı ile yapılan flokülasyon da yine FeCl₃ ile yapılan flokülasyona benzer davranış göstererek, yaklaşık 100 mg/L dozaja kadar çökelme hızında bir düşüş olurken bu dozajdan sonra yaklaşık 300 mg/L dozaja kadar tedrici olarak yükselme gözlenmiştir. Bu dozajdan sonra da çökelme hızı sabit kalmıştır.

AlCl₃ ile yapılan flokülasyonda ise yine diğer koagülantlar da olduğu gibi önce 50 mg/L dozaja kadar bir düşüş sergilemiş bu dozajdan sonra 100 mg/L dozaja kadar artarak 1000 mg/L olmuştur. 200 mg/L dozaja kadar sabit kalmıştır. Bu dozajdan sonra çökelme hızında yine bir yükselme gözlenerek 300 mg/L dozajda 1500 mm/dk'ya ulaşarak en yüksek çökelme hızı değeri elde edilmiştir. Bu dozajdan sonra çökelme hızının sabit kaldığı gözlenmiştir.

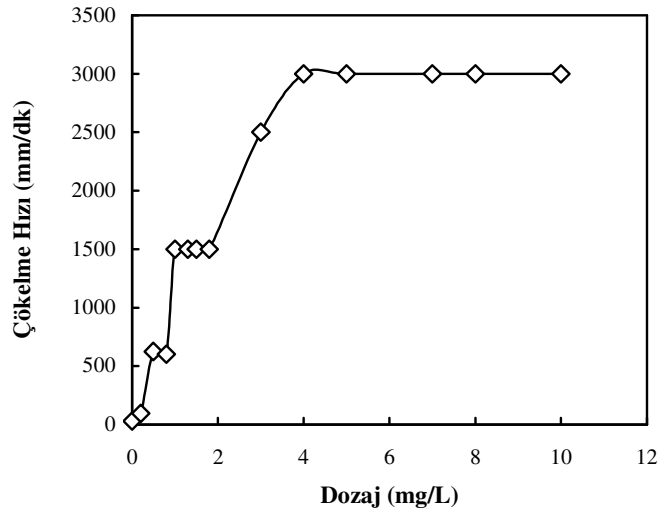
Grafikten de açıkça görüldüğü üzere her 3 koagülantında çökelme hızı bakımından flokülasyona olumlu bir katkısı görülmemektedir.



Şekil 4.30 pH 9'da 1.3 mg/L sabit spk 508 varlığında değişik koagülant dozajına göre elde edilen bulanıklık eğrileri (Çizelge Ek-30)

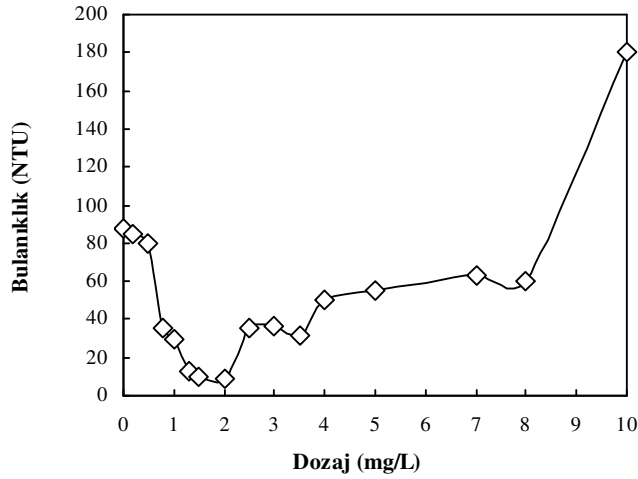
Optimum flokülant dozajında (1.3 mg/L) ve pH 9'da farklı koagülant dozajına göre traverten süspansiyonunun bulanıklığındaki değişim Şekil 4.30'da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sadece flokülantlı (koagülant katkısız) çöktürme deneyinde 12 NTU olan bulanıklık değeri her 3 koagülant içinde optimum dozaj olan 20 mg/L dozajdan sonra en düşük değerine ulaşmaktadır. 20 mg/L FeCl₃ ve sonra polimer katkısı ile oluşan "koagülasyon+flokülasyon" işlemiyle yaklaşık 4 NTU civarına inmekte ancak bu koagülant dozajından sonra bulanıklık değeri tedrici olarak yeniden yükselmekte ve 200 mg/L'de 9 NTU'ye çıkmakta ve bu civarda seyretmektedir. Benzer bir davranış AlCl₃ ilavesinde de geçerlidir. Yine AlCl₃ katkılı "koagülasyon+flokülasyon" işleminde ise en az bulanıklık "20 mg/L AlCl₃+ 1.3 mg/L polimer" ile elde edilmiştir (~8 NTU). Bu AlCl₃ dozajından sonra ise bulanıklık çok hızla yükselmekte ve 400mg/L'de ~40 NTU civarında sabitlenmektedir. Alüm'de ise minimum bulanıklığa (~9 NTU) 50 mg/L dozajda ulaşılmakta ve bu dozajdan sonra tedrici artışla 200 mg/L dozajda 12 NTU civarında sabit kalmaktadır. Her üç koagülantın düşük dozajlarda ilavesi ile oluşturulan "koagülasyon+flokülasyon" sonucu elde edilen düşük bulanıklığın sebebi şu olabilir. Bilindiği gibi traveten tozunun zeta potansiyeli pH 9'da -16 mV civarındadır (Ersoy 2005) ortama katılan koagülant ile birçok traverten tanesinin yüzeyinde Me(OH)₃ (Me: Fe⁺³ veya Al⁺³) yüzey çökeleği oluşarak taneler tamamen Me(OH)₃ ile kaplanır. Me(OH)₃ çökeleğinin sıfır yük noktası pH 9.3 olup

pH 9'daki yüzey potansiyeli hemen hemen sifıra yakındır, dolayısı ile traverten tanesi de sifıra yakın bir yüzey potansiyeline sahip olacak ve bu sebeple süspansiyonda taneler arası itme kuvveti zayıflayacağından Van der Waals kuvvetleri yardımıyla lokal kümeleşmeler meydana gelecektir. Hemen ardında ortama katılan polimerle de bu küçük kümeler birleştirilerek daha büyük bloklar haline getirilip ortamdaki çöktürülürler. Bu sayede bulanıklık azalır. Koagülant dozajının daha fazla artmasına karşın bulanıklığın sabit kalması ki buna benzer sonuç $FeCl_3$ +Anyonik Polimer ile kimyasal atık suyun arıtılmasında da elde edilmiştir (Poon and Chu 1999), veya artması ise doğal taş atıksularının arıtımında “koagülasyon+flokülasyon” yöntemi tercih edildiğinde düşük koagülant dozajının uygun kullanılması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4.31 pH 9'da spk 508 ile yapılan flokülasyonun dozaja göre çökelme hızı eğrisi (Çizelge Ek-31)

Şekil 4.31'de pH 9'da spk 508 ile değişik dozajlarda yapılan flokülasyonda elde edilen verilere göre çizilen dozaja bağlı çökelme hızı eğrisi görülmektedir. Grafikte flokülantsız ortamda sıfır olan çökelme hızı flokülant dozajının artması ile yükselerek 2 mg/L dozajda 1500 mm/dk değerine ulaşmıştır. Dozaj arttıkça çökelme hızı da buna bağlı artış göstermiş ve yaklaşık 4 mg/L dozajda 3000 mm/dk'ya kadar yükselerek en yüksek değer elde edilmiştir. Daha sonra dozajın artmasına rağmen sabit bir değerde kalmıştır. Bu grafikten de anlaşılacağı üzere pH 9'da spk 508 flokülantı için optimum flokülant dozajı 4 mg/L'dir.



Şekil 4.32 pH 9'da spk 508 ile yapılan flokülasyonda dozaja göre bulanıklık eğrisi (Çizelge Ek-32)

pH 9'da spk 508 ile değişik dozajlarda yapılan flokülasyon testinde sıfır dozajında 85 NTU olan bulanıklılık 0.5 mg/L'ye kadar cüzi bir azalışla 78 NTU'ye inerken bu dozajdan sonra çok hızlı bir düşüşle 1 mg/L'de 25 NTU'ye ve 1.3 mg/L'de 11 NTU'ye düşmekte 2 mg/L'ye kadar bu değerde seyredip bundan sonra yeniden bulanıklık artmaya başlamaktadır. Şekil 4.32'ye göre minimum bulanıklık için optimum flokülant dozajının 1.3 mg/L olduğu görülmektedir. Çok yüksek mol ağırlıklı anyonik polimerle yine negatif yüzey yüküne sahip travertenin flokülasyonunda çoğu kolloidal sistemlerde (Özer ve diğ 2002, Taylor et al. 2002) veya su/atıksularda (Werneke 1979, Divakaran ve Pillai 2002) olduğu gibi polimer köprü teşekkülü mekanizması etkindir. Polimer köprü teşekkülü mekanizmasının en tipik özeliği polimer ve kolloidal tanelerin aynı yüzey yüküne sahip olsa dahi flokülasyonun oluşması ve oluşan büyük boyutlu flokların yüksek çökelme hızına sahip olmasıdır ki traverten süspansiyonu için bu yüksek çökelme hızda gözlemlenmiş ve kaydedilmiş ancak bu sonuçlar burada verilmemiştir. Polimer köprü teşekkülünün bu temel özeliği birçok referans makalede de ifade edilmektedir (Hogg 2000, Gregory 1989). Bu mekanizmada polimer molekülü sahip olduğu uzun hidrokarbon zinciri sayesinde birden çok tane üzerinde adsorblanarak onları bir araya getirerek floklar olarak adlandırılan kümeleşmiş tane gruplarını oluşturur ve bunların çökmesiyle de süspansiyon bulanıklığı azalır. Şekil 4.32'de 2 mg/L'den sonra bulanıklığın artması literatürden de çok iyi

bilindiği gibi aşırı dozajda taneler arasında sterik engel sebebiyle oluşan redispersiyon hadisesinin bir sonucudur ve literatürde çok sık rastlanır (Gregory 1989, Divakaran and Pillai 2002, Somasundaran and Das 1998). Burada anyonik polimerin CaCO₃ esaslı traverten taneleri üzerine adsorpsiyonunda muhtemel tane-polimer etkileşimleri şunlar olabilir (i) polimerdeki anyonik yük merkezleri (-COO-) ile kalsit yüzeyinde bulunabilecek Ca⁺² iyonları arasındaki kovalent bağı (kimyasal bağ veya diğer adıyla katyonik köprü), (ii) polimerdeki negatif yük merkezleri ile traverten yüzeyindeki olası pozitif yük merkezleri arasındaki lokal elektrostatik (fiziksel) bağ, (iii) polimer zincirindeki noniyonik (-NH₂ veya -C=O) grupları ile traverten tane yüzeyindeki olası CaO veya CaOH arasındaki hidrojen bağıdır.

5-SONUÇLAR

Yapılan çalışmalar sonucunda, mermer ve traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda flokülant tipinin flokülasyona etkisi önemli rol oynamaktadır. Her iki doğal taş türü içinde yüksek molekül ağırlıklı anyonik flokülantlar çökeltme hızı ve bulanıklık parametreleri bakımından en iyi sonucu vermektedir.

Poliakrilamid esaslı ve yüksek molekül ağırlıklı anyonik flokülantlar kullanılarak gerçekleştirilen doğal taş atık sularının flokülasyon işleminde, etkin olan mekanizma polimer köprü teşekkülü mekanizmasıdır. Flokülantların mol ağırlığı arttıkça bu mekanizmanın etkinliği de artmaktadır. Katyonik flokülantlar ile yapılan flokülasyonda ise polimer köprü teşekkülünden ziyade elektrostatik yük yamama mekanizmasının daha etkin olduğu söylenebilir.

Mermer ve travertenin pH'ya göre zeta potansiyel eğrisi kalsit mineraline göre farklılıklar göstermektedir. Kalsit pH 11'de sıfır yük noktasına gelirken, % 90'ın üzerinde CaCO_3 içeren mermer ve travertene ait eğrilerde sıfır yük noktası görülmemektedir. Her iki Doğal Taş için ölçülebilen bütün pH aralıklarında (pH 6-12) negatif yüzey potansiyeline sahip olmasına karşın her iki doğal taşın zeta potansiyel verileri arasında kısmen de olsa bir farklılık vardır. Traverten mermere göre daha negatif zeta potansiyele sahiptir. Bu farklılık, doğal taş atık sularının flokülasyonuna da etki etmektedir.

Flokülasyonda, çökeltme hızı açısından en iyi sonuç anyonik yapıdaki flokülant ile elde edilmiş olup, katyonik ve noniyonik flokülant ile daha düşük çökeltme hızı elde edilmiştir. Bulanıklık açısından ise yine anyonik flokülant en iyi sonucu vermiştir ancak katyonik flokülant ile elde edilen değerler de anyonik flokülantlarla ulaşılan değerlere yakındır.

Doğal Taş süspansiyonlarının flokülasyonunda anyoniklik derecesi (flokülant yük yoğunluğu) arttıkça flokülantların floküle etme gücü artmakta, ancak belli bir anyoniklik derecesinden sonra flokülantların floküle etme gücü tekrar düşmektedir.

Bu düşüş anyoniklik derecesinin artmasıyla polimer ile DT partikülü arasındaki elektrostatik itme kuvvetlerinin artması ve buna bağlı olarak da polimerin tane yüzeyine kuvvetli bir şekilde adsorplanmasına engel olunmasından kaynaklandığı söylenebilir. En iyi çökelme hızı ve en düşük bulanıklık verileri mermer tozu süspansiyonu için %34 anyoniklik derecesine sahip flokülant ile, traverten süspansiyonu içinse %28 anyoniklik derecesine sahip flokülant ile elde edilmiştir.

Flokülasyonda, özellikle bulanıklık açısından pH önemli bir parametredir. Bulanıklık bakımından her iki doğal taş için de en iyi performans hafif asidik pH'larda (pH 6) elde edilmiştir. Fakat pH 11'de elde edilen sonuçlar da kabul edilebilir sınırlar (<15 NTU) içerisindedir.

Süspansiyon pH'sı koagülasyonu doğrudan etkilemekte ve pH değeri azaldıkça her üç ($AlCl_3$, $FeCl_3$ ve Alüm) koagülantın arıtma performansı artmakta yani bulanıklığı nispeten daha az su elde edilmektedir. Ancak pH 6'da elde edilen bu bulanıklık değerleri de yine diğer iki yöntemden [flokülasyon ve "koagülasyon+flokülasyon"] elde edilen bulanıklığa göre daha yüksektir.

pH 9'daki koagülasyon testlerinde en iyi sonuç klorür esaslı koagülantlar ($AlCl_3$ ve $FeCl_3 \cdot 6H_2O$) ile elde edilmiştir. Ancak koagülasyon yöntemiyle elde edilen en az bulanıklık değerleri (40–60 NTU) flokülasyon ve "koagülasyon + flokülasyon" yöntemine göre çok daha yüksek olup kabul edilebilir sınırların dışındadır.

Dozaj parametresi hem flokülasyon, hem koagülasyon ve hem de bunların kombinasyonu olan "koagülasyon+flokülasyon" yönteminde dikkat edilmesi gereken bir parametredir. Maksimum çökelme hızı ve minimum bulanıklık elde edilen bir dozaj değeri vardır, bundan sonraki dozaj artışları etkili olmamakta ve hatta olumsuz etki tapmaktadır.

Koagülasyonda düşük pH'da (pH 6) daha iyi performans (daha temiz su) elde edilmesi koagülasyonda etkin olan mekanizmanın "yük nötralizasyonu" olduğunu göstermektedir, ancak pH 7.5 ve 9'da "süpürme koagülasyonu" mekanizması daha etkili olmaktadır.

Doğal taş atık sularının arıtımında, hem çökelme hızı ve hem de bulanıklık açısından en etkili yöntem flokülasyon ve "koagülasyon + flokülasyon" yöntemleridir.

Flokülasyon, koagülasyon ve "koagülasyon+flokülasyon" yöntemleriyle DT atıksularının arıtımı için son olarak şu söylenebilir; En iyi çökelme hızını sağlayan şartlar her zaman en iyi bulanıklığı sağlamamaktadır.

KAYNAKLAR

- Acar, H., 2001, "Mermer İşletme Tesisi İçin Atık Su Arıtma Sistemi Kurulması ve İşletilmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar", MERSEM'2001 Türkiye III. Mermer Sempozyumu, Bildiriler Kitabı 3-5 Mayıs, Afyon
- Al-Malack, M. H. & Abuzaid, N. S., El-Mubarak, A. H., 1999, "Coagulation of polymeric wastewater discharged by a chemical factory", *Wat. Res.*, 33,2: 521-529.
- Ateşok, G., 1988, "Adsorption of Polymers", *Bull. Tech. Univ. Istanbul*, vol., 41, 13-32 .
- Bayraktar, İ., Öner, M., Karapınar, N., Saklar, S., 1996, "Waste Water treatment in marble industry". *Changing Scopes in Mineral Processing*, Kemal Aslan, Akar& Canbazoğlu (eds), Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410 8290.
- Cheng, W. P., 2002, "Comparison of hydrolysis/coagulation behavior of polymeric and monomeric iron coagulants in humic acid solution" *Chemosphere*, 47: 963-969.
- Ching, H., Tanaka, T. S., Elimelech, M., 1994, "Dynamics of coagulation of kaolin particles with ferric chloride", *Wat. Res.*, 3: 559-569.
- Ciba Specialty Chemicals, 2003, *Waste Water Specialities*.
- Divakaran, R., Sivasankara Pillai, V. N., 2002, "Flocculation of river silt using chitosan, *Water Research.*, 36: 2414-2418.
- Çelik, M., Ersoy, B., , 2004, "Mineral Nanoparticles Electrokinetics", Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, 1991-2005.
- Ersoy, B., 2003, "Mermer İşleme Tesisi Atık Su Arıtımında Kullanılan Flokülanların Tanımı", Türkiye IV. Mermer Sempozyumu, 449-462.
- Ersoy, B., 2005, "Effect of pH and polymer charge density on settling rate and turbidity of natural stone suspensions", *Int J. Mineral Processing*, 75: 207-216.
- Franceschi, M., Girou, A., Carro-Diaz, A. M., Maurette, M. T., Puech-Costes, E., 2002, "Optimisation of the coagulation-flocculation process of raw water by optimal desing method", *Water Research*, 36: 3561-3572.
- Friend, J.P., Kitchener, J.A., 1973, "Some Physico-Chemical Aspects of the Separation of Finely Divided Minerlas By Selective Flocculation", *Chem.Eng.Sci.*, 28, 1071-1080.
- Gabelich, C. J., Yun, T. I., Coffey, B. M., Suffet, I. H., 2002, "Effects of aluminum sulfate and ferric chloride coagulant residuals on polyamide membrane performance, *Desalination*, 150: 15-30.

- Gregory, J., 1973, "Rates of Flocculation of Latex Particles By Cationic Polymer", *J. Colloid Interface Sci.*, 42, 448-459.
- Gregory, J., 1989, "Fundamental of Flocculation", *Critical Reviews in Environmental Controls*, 19(3), 185-230.
- Hek, H., Stol, R.J., Bruyn, P.L., 1978, "Hydrolysis-precipitation studies of aluminum (III) solutions", III. The role of sulfate ion. *J. Colloid Interface Sci.*, 64:72.
- Hogg, R., 2000, "Flocculation and Dewatering, *Int J. Miner. Process*", 58, 223–236.
- İpekoğlu, Ü., 1997, "Susuzlandırma ve Yöntemleri", *Maden Mühendisliği Bölümü, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi*.
- Kim, T., Park, C., Shin, E., Kim, S., 2003, "Effects of Cl-based chemical coagulants on electrochemical oxidation of textile wastewater", *Desalination*, 155: 59–65.
- Kragten, J., 1978, "Atlas of Metal-Ligand Equilibria in Aqueous Solution", Ellis Horwood, Chichester.
- Kusaka, E., Amano, N., Nakahiro, Y., 1997, "Effect of hydrolysed aluminum(III) and chromium(III) cations on the lipophilicity of talc", *International J. Mineral Processing*, 50:243–253.
- Önenç, D.İ., 2001, "Tozlaşan Bloklar ve Umutlar", *Mermer*, yıl 7 (30), 66-68.
- Özbelge, T. A., Özbelge, Ö. H., Başkaya, S. Z., 2002, "Removal of phenolic compounds from rubber-textile wastewaters by physico-chemical methods" *Chemical Engineering and Processing*, 41:719–730.
- Özer, M., Bentli, Y.E., Önal, G., Dinçer, H., 2002, "Settling of coal slimes by flocculation, IXth International Mineral Processing Symposium, 18–20 September, Capodocia-Turkey.
- Özkan, A., Yekeler, M., 2004, "Coagulation and flocculation characteristics of celestite with different inorganic salts and polymers", *Chemical Engineering and Processing*, 43: 873-879.
- Parks, G. A., 1965, "The Isoelectric Points Of Solid Oxides, Solid Hydroxides, And Aqueous Hydroxo Complex Systems", *Chemical Reviews*, 65:177–195.
- Pierre, A. C., Ma, K., 1997, "Sedimentation behaviour of kaolinite and montmorillonite mixed with iron additives, as a function of their zeta potential", *Journal of Materials Science*, 32: 2937–2947.

- Pierre, A. C., Ma, K., 1998, "DLVO Theory and Clay Aggregate Architectures Formed with AlCl_3 ". *Journal of the European Ceramic Society*, 19: 1615–1622.
- Poon, C. S., Chu, C. W., 1999, "The use of ferric chloride and anionic polymer in the chemically assisted primary sedimentation process", *Chemosphere*, 39,10: 1573–1582.
- Rossini, M., Garrido, J., Garcia, Galluzzo, M., 1999, "Optimization of the coagulation-flocculation treatment influence of rapid mix parameters", *Wat. Res.*, 33,8: 1817–1826.
- Ruerhwein, R.A., Ward, A., 1952, "Mechanism of Clay Aggregation by Polyelectrolytes", *Soil Sci.*, 73, 485-492.
- Seyrankaya, A., Malaoğlu, U., Akar, A., 2000, "Flocculation conditions of marble from industrial wastewater and environmental consideration". In: Özbayoğlu, G. (Ed.), *Mineral Processing on the Verge of the 21st Century*. Balkema, Rotterdam, pp. 645–652.
- Somasundaran, P., Das, K. K., 1998, "Flocculation and Selective Flocculation—An overview", *Innovations in Mineral and Coal Processing*, S. Atak, G. Önal and M. S. Çelik (eds), A.A. Balkema /Rotterdam /Brookfield.
- Stutzmann, Th., Siffert, B., 1997, "Contribution to the Adsorption Mechanism of Acetamide and Polacrylamide on. to Clays", *Clays and Clay Min.*, 25, 392-406.
- Taylor, M.L., Morris, G. E., Self, P.G., Smart, R. St. C., 2002, "Kinetics of adsorption of high molecular weight anionic polyacrylamide onto kaolinite: The Flocculation Process", *J. Colloids Interface Sci.*, 250: 28–36.
- Werneke, M.C., 1979, "Application of Synthetic Polymers in Coal Preparation", *Society of Mining Eng.*, 76,106: 1–11.
- Yarar, B., 2001, "Evaluation of Flocculation and Filtration Procedures Applied to WSRC Sludge", Report no: DE-AC09-96SR18500, Colorado School of Mines 34 s.
- Zete-Meter Inc., 1993, *Everything You Want to Know About Coagulation & Flocculation*, Fourth Edition, Virginia.

EKLER

GRAFİKLERDE KULLANILAN DENEY VERİLERİ

Çizelge Ek-1

pH	Kalsit Minerali	Akşehir Siyah Mermer	Traverten
	Zeta Potansiyel (milivolt)	Zeta Potansiyel (milivolt)	Zeta Potansiyel (milivolt)
11,5	-12,8	-17,8	-28
10,6	8	-14	-16
8,7	13,6	-8,3	-13
7,5	17	-9,00	-15
6,6	20	-8,7	-12

Çizelge Ek-2

SPK 375		SPK 508		Magnofloc 351	
Dozaj (mg/lt)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/lt)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/lt)	Çökeltme Hızı (mm/dk)
0,5	400	0	38	0	38
1	600	0,29	429	0,5	300
2	750	1	750	1	400
3	1000	1,5	800	1,5	500
4	1000	2	1000	2	600
5	1500	3	1500	3	750
6	1500	4	3000	4	750
7	1000	5	3000	5,96	1000
		6	2500	7	750

Çizelge Ek-3

SPK 375		SPK 508		Magnofloc 351	
Dozaj (mg/lt)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/lt)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/lt)	Bulanıklık (NTU)
0	67	0	67	0	67
0,5	22,4	0,29	34,7	0,5	31
1	15	0,5	16,7	1	24
2	12	1	8,5	1,5	20
3	13,3	1,5	5	2	17
4	20	2	3,5	3	20
		3	2,9	4	25
		4	5,1		

Çizelge Ek-4

SPK 375		SPK 508		Magnofloc 351	
Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)
26	0	26	0	26	0
23	0,07	23	0,05	23	0,08
18	0,13	18	0,11	18	0,14
16	0,17	16	0,15	16	0,18
14	0,21	14	0,18	14	0,22
10	0,25	10	0,23	10	0,26
8	0,28	8	0,25	8	0,3
6	0,31	6	0,26	6	0,33
4	0,34	4	0,3	4	0,36
1,9	15	1,9	15	1,9	16

Çizelge Ek-5

SPK 502		SPK 506		SPK 505	
Dozaj (mg/lt)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/lt)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/lt)	Çökeltme Hızı (mm/dk)
0	38	0,5	600	0,5	500
0,5	429	1	750	1	750
1	750	1,5	750	1,5	1000
2,5	1000	1,8	1000	2	1500
3	1500	2	1500	3	3000
4	3000	2,5	1500	4	3000
5	3000	3	3000		
		4	3000		

Çizelge Ek-6

SPK 502		SPK 506		SPK 505	
Dozaj (mg/lt)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/lt)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/lt)	Bulanıklık (NTU)
0	67	0,5	12,1	0,5	16,3
0,5	11,6	1	6,1	1	4,7
1	5,1	1,5	4	1,5	2,4
2,5	3,8	1,8	5,7	2	4,3
3	7	2	7,1	3	6,7
4	12,4	2,5	8,5	4	9,7
5	13	3	15		
		4	20,9		

Çizelge Ek-7

SPK 502		SPK 506		SPK 505	
Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)
26	0	26	0	26	0
23	0,03	23	0,06	23	0,05
18	0,08	18	0,11	18	0,10
16	0,11	16	0,14	16	0,13
14	0,13	14	0,17	14	0,16
10	0,18	10	0,23	10	0,21
8	0,21	8	0,26	8	0,25
6	0,23	6	0,30	6	0,28
4	0,26	4	0,31	4	0,30
1,6	15	1,9	15	1,9	15

Çizelge Ek-8

Magnofloc 351		SPK 502		SPK 508		SPK 1111		SPK 504	
Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)
0	38	0	38	0	38	0	38	0	38
0,5	300	0,5	429	0,29	429	0,5	600	0,5	600
1	500	1	750	0,5	500	0,8	750	1	750
1,5	650	1,5	750	0,7	500	1	1000	1,5	1000
2	750	2	1000	1	600	1,5	1000	2,1	1000
3	1000	3	1000	1,5	750	2	1500	2,5	1500
4	1000	5,04	3000	2	750	3	3000	3,7	3000
5,96	1000	5,4	3000	3	1500	4	3000	5	3000
				4	3000				
				5	3000				

Çizelge Ek-9

Magnofloc 351		SPK 502		SPK 508		SPK 1111		SPK 504	
Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)
0	67	0	67	0	67	0	67	0	67
0,5	31	0,5	11,6	0,29	34,7	0,5	9,7	0,5	12,3
1	24	1	5,1	0,5	16,7	0,8	4,2	1	6,6
1,5	20	1,5	3,7	0,7	15,4	1	3,3	1,5	3,4
2	16	2	3,8	1	8,5	1,5	2,1	2,1	5
3	14	3	7	1,5	5	2	6,2	2,5	7
4	12	5,04	12,4	2	3,5	3	10,9	3,7	15
5,96	14	5,4	13	3	2,9	4	13,7		
				4	5,1				

Çizelge Ek-10

Magnofloc 351		SPK 502		SPK 508		SPK 1111		SPK 504	
Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)
26	0	26	0	26	0	26	0	26	0
23	0,06	23	0,03	23	0,05	23	0,05	23	0,05
18	0,15	18	0,08	18	0,11	18	0,11	18	0,1
16	0,18	16	0,11	16	0,15	16	0,15	16	0,13
14	0,21	14	0,13	14	0,18	14	0,16	14	0,16
10	0,26	10	0,18	10	0,23	10	0,21	10	0,21
8	0,3	8	0,21	8	0,25	8	0,25	8	0,25
6	0,33	6	0,23	6	0,26	6	0,28	6	0,28
4	0,36	4	0,26	4	0,3	4	0,3	4	0,3
1,6	16	1,6	17,48	1,6	15	2,1	15	1,8	15

Çizelge Ek-11

	Magnofloc 351	SPK 502	SPK 508	SPK 1111	SPK 504	SPK 375
pH	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Çökeltme Hızı (mm/dk)
6	750	750	750	750	1000	600
7,5	650	750	750	1000	1000	600
11	375	1000	1000	1000	1200	600

Çizelge Ek-12

	Magnofloc 351	SPK 502	SPK 508	SPK 1111	SPK 504	SPK 375
pH	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)
6	14	7	5,5	5,1	7	15
7,5	20	3,7	5	2,1	3,4	12
11	62,4	17,4	15	21	30	35

Çizelge Ek-13

SPK 375		SPK 508		Magnofloc 351	
Dozaj (mg/L)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökeltme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökeltme Hızı (mm/dk)
0,2	429	0	59	0	59
0,5	750	0,2	300	0,5	500
1	750	0,5	750	1	600
1,5	1000	0,8	750	1,5	750
2	1000	1	1000	2,5	1000
3	1000	1,5	1500	3	1000
3,2	1000	2,25	3000	4	1000
3,5	1000	2,5	3000	5	1000
4	1000	2,9	3000		
		3	1500		
		3,5	1500		
		4	1500		

Çizelge Ek-14

SPK 375		SPK 508		Magnofloc 351	
Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)
0,2	52,4	0	48,6	0	48,6
0,5	17	0,2	42,6	0,5	47
1	10,6	0,5	23,6	1	30,9
1,5	9,25	0,8	10,4	1,5	25
2	14,82	1	7,6	2,5	20,2
3	22,9	1,5	4	3	21,6
3,2	18,6	2,25	9,2	4	20,5
3,5	16,6	2,5	9	5	21
4	10,9	2,9	10		

Çizelge Ek-15

SPK 375		SPK 508		Magnofloc 351	
Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)
26	0	26	0	26	0
23	0,03	23	0,03	23	0,03
18	0,1	18	0,06	18	0,08
16	0,11	16	0,1	16	0,11
14	0,13	14	0,11	14	0,15
10	0,16	10	0,16	10	0,2
8	0,21	8	0,2	8	0,23
6	0,23	6	0,21	6	0,26
4	0,38	4	0,31	4	0,3

Çizelge Ek-16

SPK 502		SPK 506		SPK 505	
Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)
0	59	0,1	375	0,5	375
0,5	600	0,2	600	1	429
1	750	0,5	600	2	600
1,5	1000	0,8	750	2,25	1000
2	1000	1	750	2,5	1000
3	1500	1,5	1000	3	1000
4	1500	2	1500	4	1500
5	3000	2,5	3000	5	1500
		3	1500	6	3000
		4	3000	7,2	3000

Çizelge Ek-17

SPK 502		SPK 506		SPK 505	
Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)
0	48,6	0,1	49,9	0,5	37,2
0,5	21	0,2	32,6	1	21
1	5,6	0,5	9,2	2	12,7
1,5	5,1	0,8	3,84	2,25	6,6
2	3,9	1	12,4	2,5	5,01
3	12,7	1,5	7,26	3	10,71
4	18,2	2	9,8	4	7,8
5	19,7	2,5	14,5	5	9,23
		3	10,24	6	8,1
		4	31	7,2	5,53

Çizelge Ek-18

SPK 502		SPK 506		SPK 505	
Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)
26	0	26	0	26	0
23	0,03	23	0,06	23	0,05
18	0,08	18	0,18	18	0,16
16	0,11	16	0,21	16	0,2
14	0,15	14	0,24	14	0,23
10	0,21	10	0,3	10	0,28
8	0,25	8	0,33	8	0,31
6	0,28	6	0,38	6	0,35
4	0,31	4	0,4	4	0,38
2,1	18	2,1	15	2,1	15

Çizelge Ek-19

SPK 502		SPK 508		SPK 1111		SPK 504		Magnofloc 351	
Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)
0	59	0	59	0	59	0	59	0	59
0,5	600	0,2	300	0,5	600	0,5	600	0,5	500
1	750	0,5	750	1	750	1	750	1	600
1,5	1000	0,8	750	1,5	750	1,5	750	2,5	1000
2	1000	1	1000	2	1000	2	1000	3	1000
3,57	1500	1,5	1500	2,5	1500	2,5	1000	4	1000
4	1500	2,25	3000	3,5	3000	2,8	1000	5,04	1000
5	3000	2,5	3000	3,99	3000	5,04	1500	1,5	750
5,46	3000	2,94	3000			5,46	3000		
						5,88	3000		

Çizelge Ek-20

SPK 502		SPK 508		SPK 1111		SPK 504		Magnofloc 351	
Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)
0	48,6	0	48,6	0	48,6	0	48,6	0	48,6
0,5	21	0,2	42,6	0,5	6,3	0,5	13,4	0,5	47
1	5,6	0,5	23,6	1	5,5	1	8,5	1	30,9
1,5	5,1	0,8	10,4	1,5	5,3	1,5	11	2,5	20,2
2	4,1	1	7,6	2	11,9	2	7,8	3	21,6
3,57	12,7	1,5	4	2,5	15	2,5	8,1	4	20,5
4	18,2	2,25	9,2	3,5	25,5	2,8	6,2	5,04	23
5	19,7	2,5	9	3,99	28	5,04	9	1,5	25
5,46	21	2,94	10			5,46	12		
						5,88	15		

Çizelge Ek-21

Magnofloc 351		SPK 502		SPK 508		SPK 1111		SPK 504	
Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Yükseklik (cm)	Zaman (dk)
26	0	26	0	26	0	26	0	26	0
23	0,09	23	0,03	23	0,03	23	0,05	23	0,06
18	0,18	18	0,08	18	0,06	18	0,1	18	0,13
16	0,22	16	0,11	16	0,1	16	0,15	16	0,17
14	0,26	14	0,13	14	0,11	14	0,17	14	0,21
10	0,31	10	0,19	10	0,16	10	0,23	10	0,25
8	0,35	8	0,23	8	0,2	8	0,26	8	0,29
6	0,39	6	0,25	6	0,21	6	0,29	6	0,34
4	0,41	4	0,3	4	0,29	4	0,35	4	0,39
1,6	15	1,6	15	2,75	15	1,6	15	2	15

Çizelge Ek-22

	Magnofloc 351	SPK 502	SPK 508	SPK 1111	SPK 504	SPK 375
pH	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)
6	750	750	1250	1000	750	600
7,5	750	1000	1500	750	750	600
11	350	2000	1500	1500	800	600

Çizelge Ek-23

	Magnofloc 351	SPK 502	SPK 508	SPK 1111	SPK 504	SPK 375
pH	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)
6	15	2,7	3,5	3	4,5	60
7,5	25	5,1	4	5,3	11	9,2
11	65	16	11	16	30	35

Çizelge Ek-24

	AlCl ₃	Alüm	FeCl ₃
Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)
0	58,82	58,82	58,8
20	61,72	58,13	81,9
50	60,24	61,72	76,9
100	62,5	64,1	81,9
200	62,5	66,6	62,5
300	61,72	70,42	62,5
400	60,2	65,7	108,6
500	61,72	70,42	94,33

Çizelge Ek-25

	AlCl₃	Alüm	FeCl₃
Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)
0	80	80	80
20	70	70	69
50	68	68	69
100	67	67	68
200	66	66	66,8
300	65	65	65
400	60	60	48
500	55	55	20

Çizelge Ek-26

DOZAJ=50mg/L	AlCl₃	Alüm	FeCl₃
Yükseklik (cm)	Zaman (dk)	Zaman (dk)	Zaman (dk)
26	0	0	0
23	0,58	0,76	0,68
18	1,41	1,58	1,33
16	1,76	2	1,83
14	2,21	2,51	2,23
10	3,01	3	2,88
8	3,33	3,68	3,28
6	3,68	4,3	3,91
4	4,08	4,8	4,2

Çizelge Ek-27

DOZAJ=50mg/L	AlCl₃	Alüm	FeCl₃
pH	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)
6	60,24	56,8	81,9
7,5	60,24	61,72	76,9
9	61,7	64,1	42,3

Çizelge Ek-28

DOZAJ=50mg/L	AlCl₃	Alüm	FeCl₃
pH	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)
6	53	50	64
7,5	74	68	69
9	75	82	76

Çizelge Ek-29

	AlCl₃	Alüm	FeCl₃
Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)	Çökelme Hızı (mm/dk)
0	1000	1000	1000
20	750	750	500
50	750	600	600
100	1000	600	1000
200	1000	750	1000
300	1500	1000	1000
400	1500	1000	1000

Çizelge Ek-30

	AlCl₃	Alüm	FeCl₃
Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)	Bulanıklık (NTU)
0	12,6	12,6	12,6
20	8,7	12,7	4,7
50	11,1	17	5,2
100	25,5	10	5,9
200	33	13	10,1
300	38	11	11,3
400	40	14	10

Çizelge Ek-31

Dozaj (mg/L)	Çökelme Hızı (mm/dk)
0	29,2
0,2	94,3
0,5	625
0,8	600
1	1500
1,3	1500
1,5	1500
1,8	1500
3	2500
4	3000
5	3000
7	3000
8	3000
10	3000

Çizelge Ek-32

Dozaj (mg/L)	Bulanıklık (NTU)
0	88
0,2	85
0,5	80
0,8	35
1	30
1,3	12,6
1,5	10
2	8,5
2,5	35
3	36
3,5	32
4	50
5	55
7	63
8	60
10	180

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőması “031.MUH.02” numaralı proje olarak A.K.Ü BAPK tarafından desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasında, verdiği emeklerden dolayı, Sayın Hocam Afyon Kocatepe Üniversitesi TUAM Müdür Yardımcısı ve Mühendislik Fakültesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Bahri ERSOY’a

Desteği ve yardımlarıyla her zaman yanımda bulunan eőtım Mehmet ALPTEKİN ve ailem Kadir YEŐİL, Őeref nur YEŐİL, Aysu Müge YEŐİL, Ertuğrul YEŐİL’e Çok Teşekkür Ediyorum.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Ankara'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve liseyi Ankara'da tamamladı. Üniversite eğitimini Konya Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde 2000 yılında tamamladı. 2002–2006 yılları arası Afyon Kocatepe Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 2006 yılında Çevre Bakanlığına geçti. Halen Konya İl Çevre ve Orman Müdürlüğünde Mühendis olarak çalışmakta.