

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### TRAVERTEN İŞLEME TESİS ATIKSULARINDAKİ BULANIKLIĞIN FİZİKOKİMYASAL YÖNTEMLERLE GİDERİLMESİ

Pınar BEYAZYÜZ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Vildan ÖNEN

2010, 80 sayfa

Jüri: Doç. Dr. Alper ÖZKAN

Yrd. Doç .Dr. Esra YEL

Yrd. Doç.Dr.Vildan ÖNEN

Bu çalışmanın amacı, mermer işletmelerinde açığa çıkan atık sulardaki askıda ki katı maddelerin çöktürülmesinde genellikle tercih edilen yüksek maliyetli polielektrolitler yerine alternatif koagülant/flokülant/doğal mineral türlerinin belirlenmesi ve optimum koşulların tespit edilerek, bu optimum koşullarda elde edilen mermer çamurlarının özelliklerinin karşılaştırılmasıdır.

Deneylerde orijinal tesis atık suyu kullanılmıştır. Koagülant olarak  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{PACl}$ ,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , doğal malzeme olarak zeolit, sepiyolit ve pomza, flokülant olarak anyonik, katyonik, noniyonik flokülantlar kullanılmıştır. Koagülant/ flokülant türü ve dozajı, karıştırma süresi/ hızı, çökeltme süresi ve pH çalışılan deneysel parametrelerdir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan koagülant ve flokülantların performansları, süspansiyonun zamana bağlı ara yüzey yüksekliği değişimi ile deneysel çalışmalar sonucu oluşan temiz suyun bulanıklık verileri kullanılarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmaların son aşamasında kullanılan koagülant, flokülant ve doğal malzemeler için tespit edilen optimum koşullarda elde edilen mermer çamurlarının özellikleri belirlenmiştir.

Koagülasyon, flokülasyon ve doğal minerallerle sedimantasyon deneylerinde belirlenen optimum koşullar için en iyi sonucu; koagülantlar içerisinde % 86 verim ve 18,38

NTU bulanıklık değeriyle  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , flokülantlar içerisinde % 97 verim ve 2,58 NTU bulanıklık değeri ile anyonik flokülant, doğal mineraller arasında ise % 94 verim 8,06 NTU bulanıklık değeriyle zeolit vermiştir.  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , anyonik flokülant ve zeolit için belirlenen optimum koşullardaki çökelme hızları sırasıyla 700 mm/dk, 900 mm/dk, 730 mm/dk'dır.

Sonuç olarak; gerek elde edilen bulanıklık değerleri gerekse yüksek çökelme hızına sahip olması nedeniyle traverten süspansiyonlarından bulanıklık giderimin de flokülantlar koagülantlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak, koagülantlar ve mineraller ile de etkili bir giderimin sağlandığı söylenebilir. Polimerler ile birlikte minerallerin de kullanımı ile daha etkili bir giderim sağlanılabileceği düşünülmektedir. Böylece hem maliyet açısından hem de çevre açısından da daha olumlu sonuçlar elde edilebilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Flokülasyon, Koagülasyon, Traverten, Bulanıklık, Çökelme Hızı

## **ABSTRACT**

**MSc Thesis**

### **REMOVAL OF TURBIDITY IN TRAVERTINE PROCESSING PLANT WASTEWATER WITH PHYSICO-CYMICAL METHODS**

**Pınar BEYAZYÜZ**

**Selçuk University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mining Engineering**

**Supervisor : Asst. Prof. Dr. Vildan ÖNEN**

**2010, 80 pages**

**Jury : Assoc. Doç.Dr. Alper ÖZKAN  
Asst. Prof. Dr. Esra YEL  
Asst. Prof. Dr. Vildan ÖNEN**

The aim of this study to determine alternative coagulant/flocculant/ natural mineral types and to compare it with costly polyelectrolyte which is generally preferred in the sedimentation of suspending solid materials in wastewater from marble plants and to determine optimal conditions and to compare the features of marble sludge from them under these optimal conditions.

In the experiments carried out waste water from real plants was used. As coagulant were used  $\text{FeCl}_3$ ,  $6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , PACI,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  and as natural mineral were used zeolite, sepiyolite, pumice and as flocculant were used anionic, cationic, nonionic flocculant. Coagulant/flocculant type and dosage, mixing time/speed, sedimentation time and pH were the experimental parameters.

The performances of the coagulant and flocculant in the experimental studies were assessed with the amount of change in the interface height and by using turbidity values of clean water resulting from experimental studies. The features of the marble waste obtained

under optimal conditions for coagulant, flocculant and natural materials used at the last stage of experimental studies were determined.

The best result for the optimum conditions determined with sedimentation experiments with coagulation, flocculation and natural minerals was that of  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  among coagulants with 86 % efficiency and 18,38 NTU turbidity value and was that of anionic flocculant among flocculant with 97 % efficiency and 2,58 NTU turbidity value and was that of zeolite with 94 % efficiency and 8,06 NTU turbidity value. The sedimentation speeds of  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , anionic flocculant and zeolite under optimal conditions were 700 mm/min, 900 mm/min, 730mm/min, respectively.

As a result, flocculant materials gave better results than coagulants in the removal of turbidity in travertine suspensions as they both have better turbidity values and higher sedimentation speed. However, it can be said that an efficient removal of turbidity can also be achieved with coagulants and minerals. The use of minerals together with polymers a more efficient removal can be achieved. Thus, more positive result for the environment and cost efficient results will be achieved.

**Key words:** Flocculation, Coagulation, Travertine, Turbidity, Sedimentation Speed

## **TEŞEKKÜR**

Bu tez çalışmasının her bir aşamasında bana yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Vildan ÖNEN'e, ayrıca tüm yaşamımda desteği ve yardımlarıyla her zaman yanımda bulunan annem Emine CAN ve eşim Özer BEYAZYÜZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| ÖZET.....                                                       | i   |
| ABSTRACT.....                                                   | iii |
| TEŞEKKÜR.....                                                   | v   |
| İÇİNDEKİLER.....                                                | vi  |
| TABLolar DİZİNİ.....                                            | ix  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                            | x   |
| 1..GİRİŞ.....                                                   | 1   |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....                                   | 3   |
| 2.1.Mermer.....                                                 | 3   |
| 2.1.1. Mermerin Tanımı.....                                     | 3   |
| 2.1.2. Mermer Türleri.....                                      | 3   |
| 2.1.2.1.Gerçek (Hakiki) mermerler.....                          | 3   |
| 2.1.2.2. Kristalize mermerler.....                              | 4   |
| 2.1.2.3.Traverten ve Oniksler.....                              | 4   |
| 2.1.2.4. Mermer yerine kullanılan mağmatik kökenli kayalar..... | 5   |
| 2.1.3.Mermer Üretim Tesislerinde Atıkların Oluşumu.....         | 5   |
| 2.1.3.1. Atıkları boyutlarına göre sınıflandırma.....           | 8   |
| 2.1.4. Mermer Atıklarının Çevresel Etkileri.....                | 9   |
| 2.1.5. Mermer Atıklarının Değerlendirilmesi.....                | 10  |
| 2.2. Sedimentasyon, Koagülasyon, Flokülasyon.....               | 12  |
| 2.2.1. Sedimentasyon.....                                       | 12  |
| 2.2.2. Koagülasyon.....                                         | 13  |
| 2.2.2.1. Koagülasyonun genel mekanizması.....                   | 13  |
| 2.2.2.1.1. Yük nötralizasyonu ile koagülasyon.....              | 14  |
| 2.2.2.1.2. Süpürme koagülasyonu.....                            | 14  |
| 2.2.2.2 .Koagülant türleri.....                                 | 15  |
| 2.2.3. Flokülasyon.....                                         | 16  |
| 2.2.3.1. Flokülasyon genel mekanizması.....                     | 16  |
| 2.2.3.1.1. Partiküller arası çarpışmalar.....                   | 17  |
| 2.2.3.1.2. Polimer köprü teşekkülü ile flokülasyon.....         | 17  |
| 2.2.3.1.3. Elektrostatik yük yamama.....                        | 17  |
| 2.2.3.2. Flokülant türleri.....                                 | 18  |

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.3.2.1. Doğal flokülantlar.....                                                                    | 18 |
| 2.2.3.2.2. Sentetik flokülantlar.....                                                                 | 19 |
| 2.2.3.3. Flokülasyonu etkileyen parametreler.....                                                     | 22 |
| 2.2.3.3.1. Flokülant dozajı.....                                                                      | 22 |
| 2.2.3.3.2. Karıştırma ve kesme kuvvetlerinin etkisi.....                                              | 23 |
| 2.2.3.3.3. Tane boyutunun etkisi.....                                                                 | 24 |
| 2.2.3.3.4. Pülp yoğunluğunun etkisi.....                                                              | 24 |
| 2.2.3.3.5. Flokülantın molekül ağırlığının etkisi.....                                                | 24 |
| 2.2.3.3.6. pH'ın etkisi.....                                                                          | 25 |
| 2.2.3.3.7. Sıcaklığın etkisi.....                                                                     | 25 |
| 2.2.3.3.8. Flokülantın besleme metodunun etkisi.....                                                  | 26 |
| 2.2.3.3.9. Karıştırma süresinin etkisi.....                                                           | 26 |
| 3. MALZEME VE YÖNTEM.....                                                                             | 27 |
| 3.1. Malzeme.....                                                                                     | 27 |
| 3.1.1. Mermer süspansiyonunun özellikleri.....                                                        | 27 |
| 3.1.2. Deneysel çalışmada kullanılan flokülantlar, koagülantlar, mineraller ve diğer kimyasallar..... | 29 |
| 3.2. Yöntem.....                                                                                      | 32 |
| 3.2.1. Deneylerin yapılışı.....                                                                       | 32 |
| 3.2.1.1. Flokülasyon, koagülasyon ve sedimantasyon deneyleri.....                                     | 32 |
| 3.2.1.2. Mermer çamurunun özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler.....                    | 35 |
| 4. BULGULAR.....                                                                                      | 37 |
| 4.1. Doğal sedimantasyon deneyi .....                                                                 | 37 |
| 4.2. Koagülasyon Deneyleri.....                                                                       | 39 |
| 4.2.1. Koagülant türü ve dozajının koagülasyona etkisi.....                                           | 39 |
| 4.2.2. Karıştırma süresinin koagülasyona etkisi.....                                                  | 42 |
| 4.2.3. Çökelme süresinin koagülasyona etkisi.....                                                     | 43 |
| 4.2.4. Karıştırma hızının koagülasyona etkisi.....                                                    | 44 |
| 4.2.5. pH'ın koagülasyona etkisi.....                                                                 | 45 |
| 4.3. Flokülasyon deneyleri.....                                                                       | 47 |
| 4.3.1. Flokülant türünün ve dozajının flokülasyona etkisi.....                                        | 47 |
| 4.3.2. Karıştırma süresinin flokülasyona etkisi.....                                                  | 50 |
| 4.3.3. Çökelme süresinin flokülasyona etkisi.....                                                     | 51 |
| 4.3.4. Karıştırma hızının flokülasyona etkisi.....                                                    | 52 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.5. pH'ın flokülasyona etkisi.....                                     | 53 |
| 4.3.6. Flokülant mol ağırlığının flokülasyoa etkisi.....                  | 54 |
| 4.3.7. Flokülant yük yoğunluğunun flokülasyona etkisi.....                | 56 |
| 4.4. Doğal minerallerle sedimantasyon deneyleri.....                      | 58 |
| 4.4.1. Mineral türü ve dozajının etkisi.....                              | 58 |
| 4.4.2. Karıştırma süresinin doğal minerallerle sedimantasyona etkisi..... | 60 |
| 4.4.3. Çökelme süresinin doğal minerallerle sedimantasyona etkisi.....    | 61 |
| 4.4.4. Karıştırma hızının doğal minerallerle sedimantasyona etkisi.....   | 62 |
| 4.4.5. pH'ın doğal minerallerle sedimantasyona etkisi.....                | 63 |
| 4.5. Mermer Çamurunun Özelliklerinin Belirlenmesi.....                    | 64 |
| 5. TARTIŞMA.....                                                          | 66 |
| 6. SONUÇLAR.....                                                          | 71 |
| KAYNAKLAR.....                                                            | 72 |
| EKLER.....                                                                | 75 |

## TABLÖLAR

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 2.1.</b> Flokölantların iyonik/ non-iyonik formlarına göre sınıflandırılması.....                          | 20 |
| <b>Tablo 2.2.</b> Flokölantların molekül ağırlıklarına göre sınıflandırılması.....                                  | 21 |
| <b>Tablo 3.1.</b> Traverten tozunun kimyasal analiz sonuçları.....                                                  | 29 |
| <b>Tablo 3.2.</b> Deneylerde kullanılan flokölantlar ve özellikleri.....                                            | 30 |
| <b>Tablo 3.3.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan koagölantlar ve özellikleri.....                                 | 30 |
| <b>Tablo 3.4.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan zeolit, sepiyolit, pomzanın genel özellikleri....                | 30 |
| <b>Tablo 3.5.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan zeolit, sepiyolit ve pomzanın kimyasal analizi.....              | 31 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Optimum koşullarda her bir kimyasal ve mineral için çamur özellikleri.....                        | 64 |
| <b>Tablo 5.1.</b> Koagölasyonda kullanılan koagölantlar için optimum dozaj, bulanıklık, verim, çökelme hızları..... | 66 |
| <b>Tablo 5.2.</b> Koagölasyonda kullanılan koagölantlar için optimum koşullar.....                                  | 67 |
| <b>Tablo 5.3.</b> Flokölasyonda kullanılan flokölantlar için optimum dozaj, bulanıklık, verim, çökelme hızları..... | 68 |
| <b>Tablo 5.4.</b> Flokölasyonda kullanılan flokölantlar için optimum koşullar.....                                  | 68 |
| <b>Tablo 5.5.</b> Sedimentasyonda kullanılan minerallerin optimum dozaj, bulanıklık, verim, çökelme hızları.....    | 69 |
| <b>Tablo 5.6.</b> Sedimentasyona kullanılan mineraller için optimum koşullar.....                                   | 70 |

## ŞEKİLLER

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Mermer işleme tesisi proses işlemlerinin ve atık su kaynaklarının genel şematik görünümü.           | 7  |
| Şekil 2.2. Arazilere dökülen atık mermer çamuru sahası.                                                        | 10 |
| Şekil 2.3. Sedimentasyon olayının şematik gösterimi.                                                           | 12 |
| Şekil 2.4. Bir süspansiyondaki disperse partiküllerin koagülasyonu.                                            | 13 |
| Şekil 2.5. Süpürme koagülasyonu.                                                                               | 14 |
| Şekil 2.6. Flokülasyonun oluşum şekli.                                                                         | 16 |
| Şekil 2.7. Flokulantların taneleri bağlaması.                                                                  | 19 |
| Şekil 2.8. Flokulantların taneleri bağlama durumları.                                                          | 20 |
| Şekil 2.9. Aşırı flokulant dozajında tanelerin yeniden disperse hale gelmesi.                                  | 23 |
| Şekil 3.1. Konya Kombassan Mermer Fabrikası numune alma noktası.                                               | 27 |
| Şekil 3.2. Traverten süspansiyonunun XRD pikleri.                                                              | 28 |
| Şekil 3.3. Traverten tozu tane boyut analizi elek altı ve üstü eğrileri.                                       | 29 |
| Şekil 3.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan hız ve zaman ayarlı jar-test cihazı.                               | 33 |
| Şekil 3.5. Zamana bağlı arayüzey ölçümü.                                                                       | 34 |
| Şekil 3.6. Traverten çamurunun özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan vakumlu filtre.                       | 36 |
| Şekil 3.7. Vakumlu filtre sonunda elde edilen çamur.                                                           | 36 |
| Şekil 4.1. Traverten süspansiyonunun doğal sedimentasyonu.                                                     | 37 |
| Şekil 4.2. Traverten süspansiyonunun bulanıklığına koagülant türü ve dozajının etkisi.                         | 40 |
| Şekil 4.3. Traverten süspansiyonunun her bir koagülant için optimum dozajlarda zamana bağlı ara yüzey grafiği. | 41 |
| Şekil 4.4. Karıştırma süresinin koagülasyona etkisi.                                                           | 42 |
| Şekil 4.5. Çökelme süresinin koagülasyona etkisi.                                                              | 43 |
| Şekil 4.6. Karıştırma hızının koagülasyona etkisi.                                                             | 44 |
| Şekil 4.7. Traverten süspansiyonunun optimum şartlarda her bir koagülant için uygun pH'ın belirlenmesi.        | 45 |
| Şekil 4.8. Traverten süspansiyonunun flokulantlar varlığında optimum dozajlarının belirlenmesi.                | 48 |
| Şekil 4.9. Traverten süspansiyonunun her bir flokülant için zamana bağlı ara yüzey çökelme grafiği.            | 49 |
| Şekil 4.10. Karıştırma süresinin flokülasyona etkisi.                                                          | 50 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.11.</b> Çöktürme süresinin flokülasyona etkisi.....                                                                   | 51 |
| <b>Şekil 4.12.</b> Karıştırma hızının flokülasyona etkisi.....                                                                   | 52 |
| <b>Şekil 4.13.</b> Traverten süspansiyonun optimum şartlarda her bir flokülant tipi için uygun pH'ın belirlenmesi.....           | 53 |
| <b>Şekil 4.14.</b> Flokülant mol ağırlığının flokülasyona etkisi.....                                                            | 54 |
| <b>Şekil 4.15.</b> Traverten tozu süspansiyonunun farklı molekül ağırlıklarında zamana bağlı ara yüzey yükseklikleri.....        | 55 |
| <b>Şekil 4.16.</b> Traverten süspansiyonunun yük yoğunluğu farklı flokülantlar varlığında optimum dozajlarının belirlenmesi..... | 56 |
| <b>Şekil 4.17.</b> Traverten süspansiyonunun mineral varlığında optimum dozajlarının belirlenmesi ve bulanıklık giderimi .....   | 58 |
| <b>Şekil 4.18.</b> Traverten süspansiyonunun her bir mineral için zamana bağlı ara yüzey çökelme grafiği.....                    | 59 |
| <b>Şekil 4.19.</b> Sedimentasyona karıştırma süresinin etkisi.....                                                               | 60 |
| <b>Şekil 4.20.</b> Sedimentasyona çökelme süresinin etkisi.....                                                                  | 61 |
| <b>Şekil 4.21.</b> Sedimentasyona karıştırma hızının etkisi.....                                                                 | 62 |
| <b>Şekil 4.22.</b> Traverten süspansiyonun optimum şartlarda her bir kil tipi için uygun pH'ın belirlenmesi.....                 | 63 |

## 1. GİRİŞ

Türkiye, MTA raporlarına göre 5 milyar m<sup>3</sup> mermer rezervi ile dünya mermer potansiyelinin % 40'ına sahiptir. Mermer sektörü 1980'li yıllardan günümüze kadar devam eden bir gelişim süreci içersindedir. Ancak bu hareketlilik bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Türkiye' nin mermer işletmelerindeki blokların işlenmesi sırasında, oldukça fazla miktarda ortaya çıkan doğal taş tozlarının çevresel açıdan problem yaratmayacak şekilde doğaya bırakılması ve atıkların geri dönüşümü; sınırlı olan doğal kaynakların kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesini önlemektedir. Böylece üretimde verimlilik artmakta ve atıkların depolanması sonucu oluşacak çevre problemleri en aza indirilmeye çalışılmaktadır.

Mermer işleme tesislerinde mermerin kesimi sırasında açığa çıkan atıksuların çevreyi kirletmemesi, suyun tekrar tesiste kullanılabilmesi ve atıksu içerisindeki mermer tozunun endüstride kullanılabilmesi için suyun ve ince boyuttaki katı malzemenin birbirinden ayrılması gerekmektedir. İnce taneli özellikle 50 µ'un altı katı taneciklerin katı – sıvı ayrımında, yüksek çökelme hızı ve dolayısıyla yüksek katı oranı elde etme açısından normal sedimentasyon yöntemleri istenilen başarıyı gösterememektedir. Buna neden olarak, % katı oranı, tane şekli, yüzey özellikleri ve yoğunluk gibi katının özellikleri ile sıvının viskozitesi ve yoğunluğu gösterilebilir (Mpofu vd, 2003; Öteyaka vd, 2005). Genel olarak bu tür sorunların çözülmesi amacıyla katı-sıvı ayrımı proseslerin de flokülasyon, koagülasyon veya bu iki yöntemin kombinasyonu olan koagülasyon+flokülasyon yöntemleri kullanılmaktadır.

Mevcut tesislerde gerçekleştirilen uygulamalarda, kullanılan kimyasalların uygun olmaması sebebiyle mermer atıkları kolay çökeltilemediğinden atık havuzları aşırı dolmakta ve yeniden kullanılabilir su veya atık elde edilemeyebilmektedir. Mermer tozunun çökertilmesi sonucu elde edilen temiz su tesiste tekrar kullanılabilir. Ancak iyi bir çökeltme işleminin gerçekleştirilememesi sonucunda tesise geri gönderilen bu su içerisinde kolloidal boyutlu taneler bulunabilmekte, bu da mermer işleme sırasında işletme açısından birçok probleme neden olmaktadır. Bu nedenle farklı koagülant ve flokülantların

sistem üzerinde test edilerek performanslarının karşılaştırılması ve koşulların optimizasyonunun gerçekleştirilmesinin önemi göz ardı edilememektedir.

Bu çalışmanın amacı, ülkemiz mermer işletmelerinde, mermer atıksularında ki askıda katı maddelerin çökertilmesinde genellikle tercih edilen, maliyeti yüksek, yapışkan özellikli ve hacimce fazla atık oluşumuna sebep olan polielektrolitler yerine alternatif koagülant /flokülant türlerinin belirlenmesi ve optimum çökelme koşullarının belirlenerek bu optimum koşullarda elde edilen mermer çamurunun özelliklerinin tespit edilerek karşılaştırılmasıdır.

Kil mineralleri çarpışma olasılığını arttırarak sedimentasyonu sağlamaları nedeniyle arıtma işlemlerinde kullanılabilir. Literatürde mermer atıkları ile yapılan arıtma çalışmalarında kil kullanımına rastlanılmamıştır. Bu çalışmada flokülantlara alternatif olarak kil mineralleri zeolit, sepiyolit ve pomza minerali ile de sedimentasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu malzemelerin kullanımı ile oluşan mermer atıklarının çevresel etkileri açısından mermercilik sektöründe halen kullanılmakta olan kimyasal malzemeleri içeren atıklarla kıyaslanamayacağı açıktır. Ayrıca kullanılan bu doğal malzemeler ile oluşan mermer atıklarının ekonomik açıdan değerlendirilebilirliklerinin kimyasal malzemeler içeren atıklara kıyasla daha fazla olacağı düşünülmektedir. Böylece mermer sektörüne yönelik tepkilere yol açan mermer atıklarının, hem çevresel açıdan daha az sakıncalı bir içerikle doğaya bırakılması hem de ülke ekonomisine katkısının arttırılması amaçlanmaktadır.

## **2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI**

### **2.1. Mermer**

#### **2.1.1. Mermerin Tanımı**

Mermerler üç şekilde tanımlanmaktadırlar.

**Bilimsel tanımı:** Kireçtaşı ve dolomit gibi kararlı karbonatlı kayaların ısı ve basınç altında başkalaşması ya da metamorfizmaya uğrayarak tekrar kristallenmesi sonucu oluşan kayaca mermer denir.

**Endüstriyel tanımı:** Blok veren, kesilip levha elde edilen, cila tutan her türlü kayaca mermer denir. Bu tanımda temel unsur piyasada alınıp satılabilmesidir.

**Petrografik tanımı:** Masif ya da bir örnek, kristalleri eşit boyutlu, metamorfizma derecesine göre kalsit kristalleri arasında boşluk bulunmaksızın görülen bir mozaiktir (Oğul, 2005)

#### **2.1.2. Mermer Türleri**

##### **2.1.2.1. Gerçek (hakiki) mermerler**

Metamorfizma olayı sonucunda kireçtaşı ve dolomit gibi karbonatlı kayaların yeniden kristallenmesiyle ya da metamorfizma geçirmesiyle oluşan mermerlerdir. Bileşimin büyük kısmı kalsiyum karbonattan oluşur. Çok az miktarda yabancı maddeler bulunur. Gerçek mermerlerin % 95 ve daha fazlası kalsit

kristallerinden oluşmaktadır. Az oranda ise silis mineralleri, feldispat, demiroksit mineralleri, mika, florit ve bitüm gibi organik maddeler vardır. Mermerler mikroskop altında incelenebilir. İyi kaliteli gerçek mermerlerin mikroskop altında birbirine kenetlenmiş tıpkı şeker dokusu gibi kalsit kristallerinden oluştuğu görülmektedir (Önal, 2007).

#### **2.1.2.2. Kristalize mermerler**

Göl ve denizlerde yaşayan makro ve mikro organizmaların deniz ve göl tabanlarında çökelp tortu oluşturması ve bunların zamanla basınca maruz kalarak taşlaşması sonunda kireçtaşları oluşmaktadır. Bunlar gerçek mermer değildirler.

Ekonomik değerleri çok yüksektir ve çok geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Daha çok kireçtaşı ve dolomit karışımından oluşmaktadırlar. Grafit, demir, mangan, kil ve değişik oranda metaloksit içerirler. Tektonik breş ve pudingler bu gruba girerler. Kireç taşları çok saf olduklarından % 56 CaO, % 44 CaCO<sub>2</sub> içerirler. İçerisinde % 10'dan fazla MgCO<sub>3</sub> bulunan mermerlere dolomitik mermer denir (Oğul, 2005).

#### **2.1.2.3. Traverten ve Oniksler**

Kırık düzlemleri boyunca gelen yeraltı sıcak suları çok iyi aşındırıcı olduklarından geçtikleri yerlerde bulunan kireç taşları ve diğer kayaçları aşındırarak tortuyu bünyesine almaktadır. Basınçla gelen yeraltı suları, atmosferik ortamda, yeraltından getirdiği tortuyu taşıyamamakta ve yüzeye bırakmaktadır. Soğumaya bağlı olarak yapısında gözenekler (porozite) olan bir malzeme oluşmaktadır. Bu oluşan malzemeye traverten denir. Soğuk suların, yeraltından gelen kırık düzlemleri boyunca yüzeye veya mevcut tektonik boşluğa akması sonucunda tortusunu bırakması ile oluşan kayaç grubuna kesilebilir ve kalsiyum karbonat ağırlıklı ise

‘kalker albatr’, eğer gelen soğuk sular silis ağırlıklı ise ‘oniks’ adı verilir (Oğul, 2005).

#### **2.1.2.4. Mermer yerine kullanılan mağmatik kökenli kayaçlar**

Her türlü mağmatik kayaç mermer olarak kullanılabilir. Özellikle mağmatik derinlik kayaçları yavaş yavaş soğuyup kristallendikleri ve çok güzel bir görünüm sundukları için, mermercilikte daha çok tercih edilmektedirler ( Ör: granit, siyenit, diyorit, monzonit, ve gabro). Yüzey ve damar kayaçlarından da mermer elde edilmesine karşın en çok bazalt mermercilikte kullanılmaktadır. Özellikle kuvarssız, bazik ve ultrabazik magmatik kayaçlar koyu renkli oldukları için mermercilikte daha çok tercih edilmektedir (Önal, 2007).

#### **2.1.3. Mermer Üretim Tesislerinde Atıkların Oluşumu**

Mermer kesme ve işleme tesislerinde oluşan atıklar katı formadaki atıklar ve atıksular olarak iki gruba ayrılmaktadır. Mermer üretim tesislerinde kesme, yıkama, silme, cilalama ünitelerinde katraklarda kısaca mermerin işlenmesi sırasında açığa çıkan çok küçük boyutlu toz atıklar su ile karışarak atıksuların meydana gelmesine neden olmaktadır.

Ocaklardan elde edilen çeşitli ebatlardaki bloklar, mermer işletme tesislerinde mamül mermer haline getirilirken, blok ebatları istenilen mermer plaka ebatlarına uygun olmadığından, ebatlandırma esnasında kenarlardan parçalar açığa çıkmaktadır. Başkesme ve yankesmelerde uygun ebatlandırma yapıldıktan sonra mermer parlatma ve cilalama işlemlerine tabi tutulur. Bu işlemler sırasında çok küçük boyutlu mermer tozu atıkları da oluşmaktadır.

Blokların veya kesilebilir boyuttaki molozların ocaktan çıkarılması esnasında oluşan irili ufaklı parçaların yanı sıra; blokların mermer işletme tesislerinde mamul

hale getirilmesi esnasında oluşan bütün mermer plaka parçaları ve tozları mermer atığı olarak değerlendirilir. Mermercilik sektöründe son yıllarda görülen gelişme neticesinde mermer ocağı ve mermer işleme tesisi sayısında büyük artışlar olmuştur. Bu artışlara paralel olarak mermer atıklarının miktarında da gözle görülen artışlar meydana gelmiştir (Gündüz vd, 1996).

Katı formda ki mermer atıkları meydana geliş yerlerine göre iki bölüme ayrılır:

1. Ocaklarda oluşan atıklar
2. Mermer kesme ve işleme tesislerinde oluşan atıklar
  - Katraklarda atık oluşumu
  - Elmas soketli testerelede atık oluşumu
  - Cilalama ünitelerinde atık oluşumu

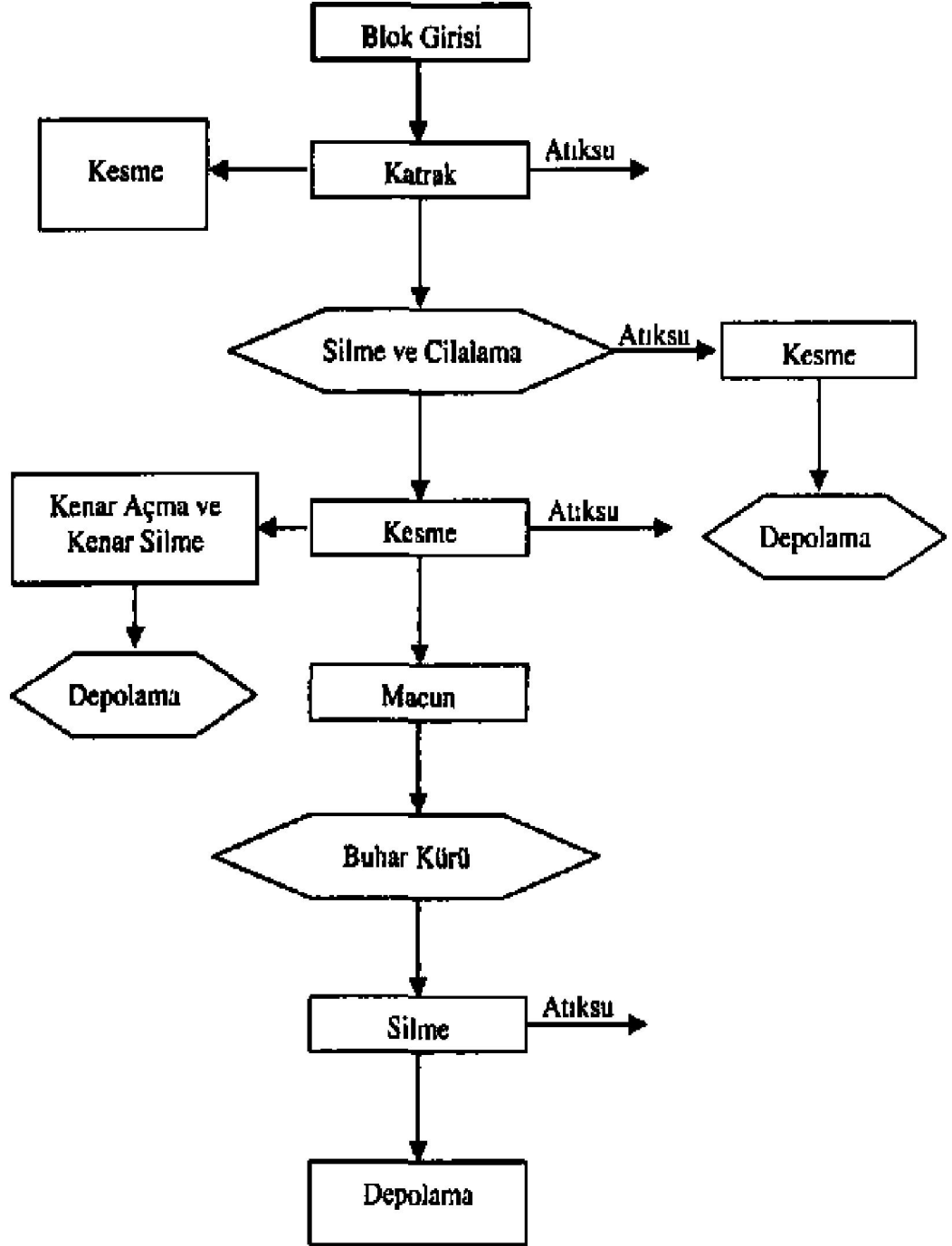
#### **Ocaklarda oluşan atıklar:**

Mermer ocaklarındaki fay, çatlak, yarık gibi arızalar blok üretimi sırasında irili ufaklı molozların açığa çıkmasına sebep olmaktadır. Ocaklarda mermer atıklarının oluşmasına bir diğer etkende ‘sayalama’ işlemidir. Ocakların tektonik yapısına uygun olarak elde edilen çok büyük ve şekilsiz parçalar, çeşitli yöntemlerle istenilen ebatlarda alt, üst ve yanlarından kesilirler. Kesim sonucu açığa çıkan bu atıklar pasa olarak ocaklarda atık oluşumuna neden olur (Gündüz vd, 1996).

#### **Mermer kesme ve işleme tesislerinde oluşan atıklar:**

Kesilen plakaların bünyesinde bulunan çatlaklardan dolayı plakalar birbirinden ayrılarak kırılmaktadır. Bu durumda da paladyen adı verilen küçük levha parçaları açığa çıkmaktadır. Mermer üretim tesislerinde katraklarda, elmas soketli testerelede cilalama ünitelerinde atıklar oluşmaktadır (Gündüz vd, 1996). Mermer

işleme tesislerinde ki proses işlemleri ve atıksu oluşum noktaları Şekil 2.1’de gösterilmiştir (Kavaklı, 2003)



Şekil 2.1. Mermer işleme tesisi proses işlemlerinin ve atıksu kaynaklarının genel şematik görünümü (Kavaklı, 2003)

### 2.1.3.1. Atıkları Boyutlarına Göre Sınıflandırma

**Molozlar:** Mermer ocaklarının jeolojik ve tektonik yapısından kaynaklanan fay, kırık ve çatlaklardan dolayı blok üretimi sırasında ortaya çıkan şekilsiz ve çeşitli boyutlardaki mermer parçalarıdır.

**Kapaklar:** Bunlar mermer işleme tesislerinde S/T kesimi sonrasında alt ve yan kısımlarda kalan atıklar ile monolama ve köprü tel kesme sonucu ortaya çıkan atıklardır.

**Paladyenler:** Mermer işleme tesislerinde, ocaklardan getirilen bloklar, katraklar veya S/T 'ler yardımıyla plakalar kesilirler. Kesilen bu plakalar yan kesme ve baş kesme makinelerinde maksimum alan elde edilecek şekilde ebatlanmaktadır. Bu ebatlama esnasında geriye kalan ve düzgün geometrik şekil elde edilemeyen plaka atıklarına da 'paladyen' adı verilir.

**Tozlar:** En küçük boyutlu mermer atıklarıdır. Mermer işleme tesislerinde blokların ve plakaların kesilmesi esnasında açığa çıkan ve büyük çoğunluğu 1 mm altında olan mermer tanecikleridir (Gündüz vd, 1996). Mermer işleme tesislerinde kesilme işlemi, kesicinin ısınmasını ve toz olmasını önlemek amacıyla su yardımıyla yapılmakta ve bu ince boyutlu mermer tozlarıyla birleşen su, atık mermer çamurunu oluşturmaktadır.

#### 2.1.4. Mermer Atıklarının Çevresel Etkisi

Mermer madenciliğinde ortaya çıkabilecek çevresel etki unsurlarını mermer taşıma kaynaklı çevresel etki (kaya dolgu ve toz), direkt etkiler (gürültü, görüntü kirliliği, toz), arazi kullanımı olarak sıralamak mümkündür.

Mermer ocak işletmelerinde ve işleme tesislerinde blok kesme ve işleme makineleri tel kesme, kollu kesiciler, ST ve katrak gibi makineler genelde sulu kesim yaptıklarından kesim anında toz açığa çıkması söz konusu değildir. Ancak mermer ocak işletmeciliğinde özellikle basınçlı hava ile delik delme operasyonlarında, traverten ve kireçtaşı türü formasyonlarda kullanılan Jet-Belt ve zincirli kollu kesicilerin kuru kesim yapması durumunda toz emisyonu ortaya çıkabilmektedir. Ocak içi nakliye yollarında da zaman zaman toz emisyonu olabilmektedir.

Mermer işleme tesislerinde kesilme işlemi, kesicinin ısınmasını ve toz olmasını önlemek amacıyla su yardımıyla yapılır. Böylece toz ile birleşen su, atık mermer çamurunu oluşturur. Bu atık malzeme ilk haliyle veya arıtma tesisinde suyu alındıktan sonra çevreye bırakılır. Bilinçsizce çevreye terk edilen bu malzemenin sebep olacağı zararlar, çevre sağlığını olumsuz yönde etkileyecektir.

Atık madde olan mermer çamuru, depolanmasında ve taşınmasında büyük zaman ve ekonomik kayıp oluşturmalarının yanında, atılan bu malzeme çevreye büyük zararlar vermektedir. Bu zararlar genel olarak;

- Toprak gözeneklerindeki azalma sonucu olarak tarım alanlarında verim düşmelerine neden olmaktadır.
- Atık alanlarında bitki yetişmemesine,
- Yer altı su yollarını bloke ettiğinden yer altı su seviyesinin düşmesine,
- Yer altı suyuna karışan ince malzemenin yer altı su kalitesinin düşmesine,
- Çok ince bir yapıya sahip olan toz atıkların kuruduktan sonra havada uçarak insanlarda akciğer solunum yollarının tıkanması gibi sağlık sorunlarının oluşmasına neden olmaktadır.

Bu atıkların sonucu olarak meydana gelen bu zararlı etkileri ortadan kaldırmak için yeni kullanım alanları bulunması gerekmektedir (Akbulut, 2003).

Şekil 2.2’de arazilere dökülen mermer çamurlarının neden olduğu çamur sahası gösterilmektedir.



**Şekil 2.2.** Arazilere dökülen atık mermer çamuru sahası (Yıldız, 2008)

#### **2.1.5. Mermer Atıklarının Değerlendirilmesi**

Dünyada kullanılan kaynakların hızla tükenmesi, çeşitli uluslararası kuruluşları kaynakları verimli nasıl kullanılacağı, kullanılmakta olan kaynaklardan maksimum verimin nasıl sağlanacağı konularında çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir.

Mermer işleme yönteminde kayıp oranı ocak işletmeciliğinde % 50, fabrika işletmeciliğinde % 30’ lara ulaşmaktadır. Kaybın bu kadar yüksek olmasının nedenleri; işletmecilerin bu konuda yeterli bilgiye sahip olmaması, kalifiye eleman yetersizliği, gelişen teknolojiyi izleyememe ve bunların sonucunda ocaklarda ilkel metotların (patlayıcı madde, kompresör v.s. kullanımı) uygulanması olarak sıralanabilir.

Mermer atıkları parça boyutu olarak işleme tesislerinden iki farklı ürün olarak çıkabilmektedir. Birinci ürün, iri boyutlu parça mermer atıkları, ikinci ürün ise koloidal yapıda büyük miktarı 150 mikronun altında olan maksimum parça boyutu 2 mm ye ulaşabilen kesim toz atığı olmaktadır (Gündüz vd, 1996). Bu atıklar;

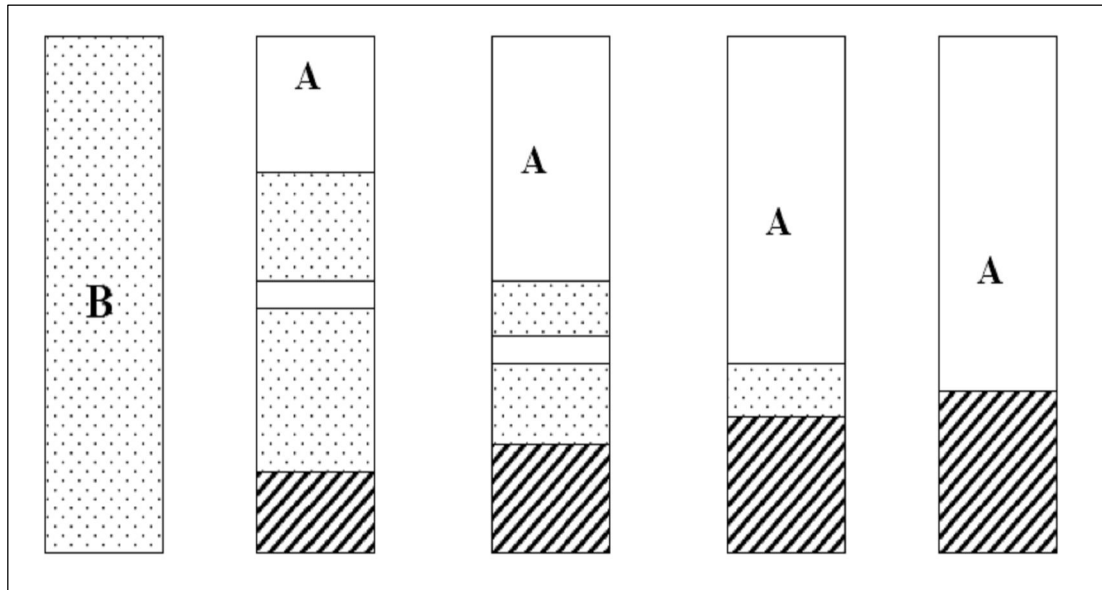
- Seramik sanayii
- Sır-sırça endüstrisi
- Plastik ve lastik sanayii
- Boya sanayii
- Çimento sanayii
- Kağıt sanayii
- Yem sanayii
- Tarım sanayii
- Cam sanayii
- Yapı malzemeleri sanayii
- İnşaat sektörü
- Kireç ve dolomitik kireç üretimi
- Çelik üretimi
- Kimya sanayii
- Demiryolu zemin malzemesi
- Şeker, polimer, ilaç, yakıt, gübre, yapıştırıcı, kauçuk imalinde kullanılmaktadır (Görhan, 2008).

## 2.2. Sedimentasyon, Koagülasyon, Flokülasyon

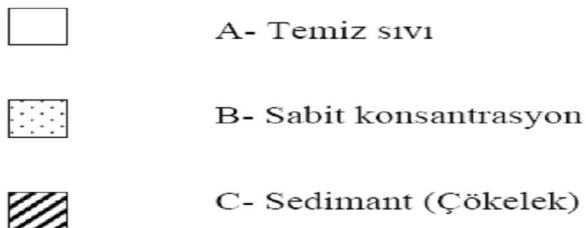
### 2.2.1. Sedimentasyon

Bir akışkan içerisinde bulunan katı maddelerin yerçekimi kuvveti veya santrifüj kuvveti ile çöktürülerek sudan arındırılması işlemine sedimentasyon denir. Çökelme işleminin amacı katı parçacıklardan arındırılmış temiz bir su ile kolay işlenebilecek veya taşınıp depolanabilecek pekişmiş bir çamur elde etmektir. Sedimentasyon işleminin verimliliğini arttırmak için çoğu kez suya katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu durumda çökelme işlemi flokülasyon, koagülasyon gibi isimler alır.

Sedimentasyonda çökelmenin meydana gelişi Şekil 2.3’de görülmektedir.

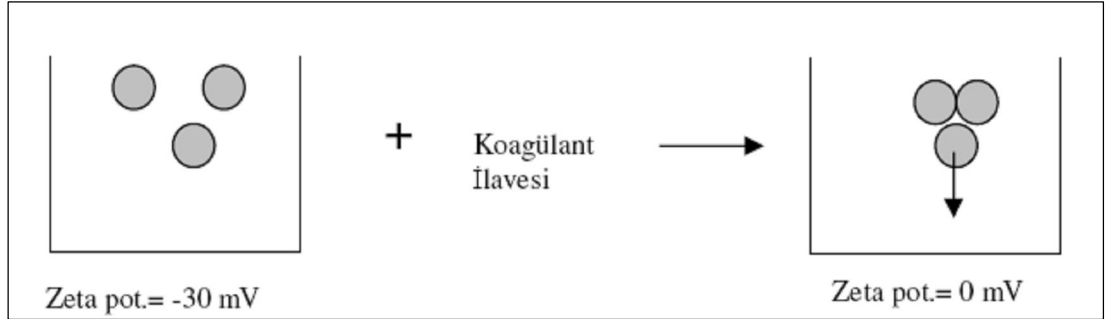


Şekil 2.3. Sedimentasyon olayının şematik gösterimi (Oğul, 2005)



### 2.2.2. Koagülasyon

Koagülasyon, elektrostatik kökenli olup, elektriksel çekim kuvvetleri ile kontrol edilen tanelerin salkımlaşması olayıdır. Koagülasyon, süspansiyona potansiyeli tayin eden iyonların veya inorganik tuzların (elektriksel çift tabakayı sıkıştırması) ilavesiyle şarj nötralizasyonu sonucu gerçekleştirilir. Süspansiyon içerisinde aynı elektrik yükünü taşıyan taneler, elektrostatik olarak birbirlerini itmekte ve sıvı içerisinde askıda kalmaktadırlar. Sıvı içerisinde kararlı halde bulunan katı taneler belirli bir yüzey yükü ve zeta potansiyeline sahiptirler. Ortama ilave edilecek bir kısım koagülantlar yardımıyla katı tanelerinin zeta potansiyelleri sıfıra indirilerek aralarındaki elektrostatik itme kuvvetleri zayıflatılabilmektedir. Taneler arasındaki Van der Waals çekim kuvvetleri ise egemen hale gelerek taneleri bir araya getirmektedir. Bu işleme koagülasyon denir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Bir süspansiyondaki disperse partiküllerin koagülasyonu

#### 2.2.2.1. Koagülasyonun Genel Mekanizması

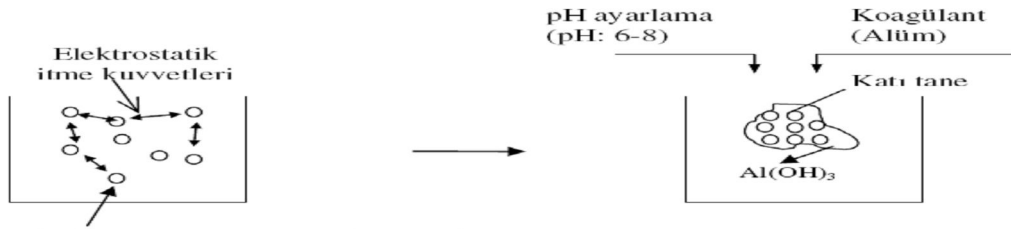
Koagülasyon mekanizması, yük nötralizasyonu ve süpürme koagülasyonu olarak iki şekilde gerçekleşir.

#### 2.2.2.1.1. Yük Nötralizasyonu ile Koagülasyon

Süspansiyon içerisinde negatif zeta potansiyeline sahip olan mineral taneleri söz konusu olduğunda ve süspansiyona koagülantlar vasıtası ile kation ilavesi yapıldığında, kationlar negatif şarj taşıyan tane yüzeylerine adsorplanır ve tanenin elektriksel çift tabakasını bastırarak zeta potansiyelini düşürür. Böylece taneler arası itme kuvvetleri azalacağından taneler arasındaki Van der Waals çekim kuvvetleri baskın hale gelerek taneler topaklanabilmekte ve yük nötralizasyonu ile koagülasyon gerçekleşmektedir.

#### 2.2.2.1.2. Süpürme Koagülasyonu (Sweep Coagulation)

Süspansiyon içerisinde yüksek zeta potansiyeline sahip mineral taneleri birbirlerine yüksek elektrostatik itme kuvvetleri uygulamaktadırlar. Süspansiyonun pH'ı bazik ve nötral olduğu durumlarda süspansiyon içerisine ilave edilen koagülantlar özellikle çözünmeyen çökelekler oluşturur. Bu çökelekler oluşurken süspansiyon içerisindeki taneleri de beraberinde tutarak bir arada çökelmektedirler. Buna sıyırma (süpürme) koagülasyonu denilmektedir (Şekil 2.5.).



Yüksek zeta potansiyeline sahip partikül

**Şekil 2.5.** Süpürme koagülasyonu (Sweep Coagulation) (Alptekin, 2006)

#### **2.2.2.2. Koagülant türleri**

En yaygın kullanılan koagülantlar;  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{PACl}$ ,  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{FeSO}_4$ 'dır.

#### **Alüm**

Alüm, kimyasal formülü  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  olan yüksek verimli bir arıtma kimyasalıdır. Suda kolayca çözünebilen bir koagülanttır. Alüm ile koagülasyon düşük pH'larda ( $\text{pH} < 4$ ) genellikle yük nötralizasyonu ile gerçekleşirken, nötral pH'larda ( $\text{pH}$ : 6-8) sıyırma (sweep) mekanizmasıyla gerçekleşmektedir.

#### **Polialüminyum klorür**

Polialüminyum klorür ( $\text{PACl}$ ) alüminyum kloritin kontrollü şartlar altında kısmi nötralizasyonu ve polimerizasyonu ile elde edilmektedir.  $\text{PACl}$  genellikle pH ayarı ve yardımcı koagülant gerektirmeyen, hacimce % 25 - 75 daha az çamur oluşturan süpürme ve köprüleme mekanizmasında daha etkili olup aynı zamanda organik madde tutabilen bir koagülanttır.

#### **Demir Klorür ve Demir Sülfat**

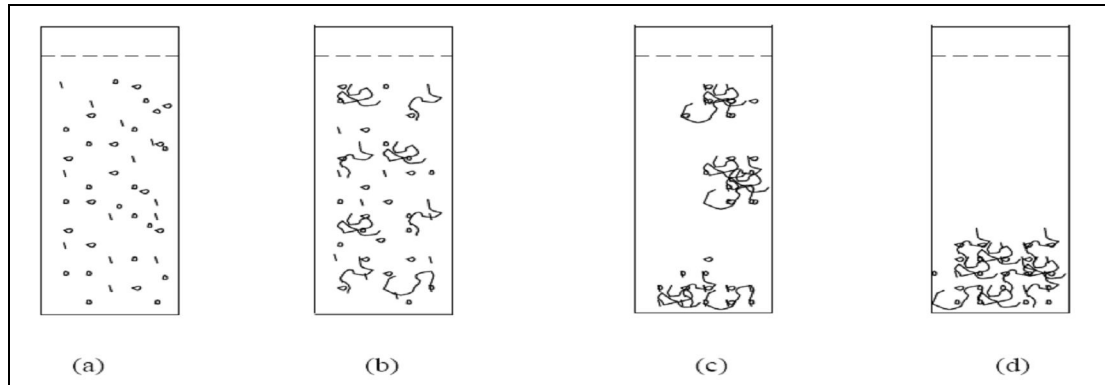
Klorürlü bileşikleri  $\text{FeCl}_3$  veya  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ve sülfatlı olanları ise  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  kimyasal formülüne sahiptir. Genellikle granül halde üretilir. Alüm'e oranla kullanımı daha azdır.

### 2.2.3. Flokülasyon

Bir sıvı içerisinde disperse katı tanelerin bir araya getirilmesi (topaklanma, kümeleşme, floklaşma) ortama katılan yüksek molekül ağırlıklı organik polimerler veya polielektrolitlerin, tanelerin arasında bir köprü oluşturmasıyla veya iyonik (anyonik ve katyonik) polimerlerin elektrostatik yük yamama yöntemiyle diğer bir ifadeyle yük nötralizasyonu ile gerçekleştiriliyorsa buna flokülasyon denir. Flokülasyonda, salkımlaştırma işlemi ortama katılan yüksek molekül ağırlıklı organik elektrolitler diğer adıyla polimerler kullanılarak, taneciklerin fiziksel bir köprü oluşturularak bir araya getirilmesi işlemiyle gerçekleşmektedir (Ersoy, 2003).

#### 2.2.3.1. Flokülasyonun Genel Mekanizması

Flokülantlar yüksek molekül ağırlıklı polimerler olup katı parçacıkların yüzeylerine yakınlık gösterirler. Bu yakınlıklardan doğan sonuç; katı parçaların bir araya gelmesi ve bir salkım oluşturmalarıdır. Şekil 2.6'dan da anlaşılacağı gibi; flokülantlar parçacıkların birbirine bağlanmasına neden olur. Daha sonra bir araya gelen parçacıklar dibe kısa sürede çökme eğilimi gösterir.



**Şekil 2.6.** Flokülasyonun oluşum şekli a-) Normal pülp (Flokülant katılmadan önce) b-) Flokülant eklendikten sonraki durum c-) Flokülantın katı parçacıkları ile temasa geçişi d-) Flokülasyonun meydana gelmesi (Oğul, 2005)

Bir süspansiyon içindeki katı mineral parçalarının flokülasyonu, çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilir. Bunlar;

1. Partiküller arası çarpışmalar
2. Polimer köprü teşekkülü ile flokülasyon
3. Elektrostatik yük yamama (Elektriksel şarjların azaltılması)

#### **2.2.3.1.1.Partiküller arası çarpışmalar**

Süspansiyon içindeki katı yüzeyleri birbirlerine yeterli derecede yaklaştıkları zaman (0,01 mikron veya daha az) London-Van Der Waals çekim kuvvetleri itme kuvvetlerinden daha etkin hale geçmektedirler. Süspansiyonun karıştırılması, partiküllerin birbirlerine çok yaklaşmasına hatta çarpışmasına neden olmaktadır. Meydana gelen flokülasyon sınırlı bir derecede gerçekleşmektedir (İpekoğlu, 1997).

#### **2.2.3.1.2. Polimer köprü teşekkülü ile flokülasyon**

Bu tip flokülasyon, suda çözünebilen çok yüksek molekül ağırlıklı sentetik organik polimerle yapılmaktadır. Organik polimerlerin bir ucu bir partikül yüzeyine adsorbe olur, diğer ucu ise bir partiküle bağlanarak köprü meydana getirir. Daha yüksek molekül ağırlıklı olanlar aynı anda bir çok partikül yüzeyine adsorbe olarak üç boyutlu bir matris meydana getirebilirler. Bu yöntemle elde edilen floklar büyük boyutlu olup çökelme hızları yüksektir (İpekoğlu, 1997).

#### **2.2.3.1.3. Elektrostatik Yük Yamama (Elektriksel şarjların azaltılması )**

Bazı organik polimerlerin, molekül zincirlerinin suda iyonlaşmasıyla elde edilen polielektrolitlerde, zincir üzerinde aşırı derecede pozitif veya negatif yük

bulunur. Süspansiyondaki taneciklere, zıt yüklü polielektrolitler ilave edildiklerinde taneciklerin zeta potansiyelleri düşer ve tıpkı koagülasyonda olduğu gibi Van Der Waals çekim kuvvetleriyle tanecikler bir araya gelir ve süspansiyonun kararlılığı bozulur. Bu tip flokülasyonun koagülasyondan farkı inorganik elektrolitlerin yerine organik polielektrolitlerin kullanılmasıdır. Polielektrolitler tanecik yüzeyine elektrostatik çekim kuvvetiyle adsorbe olabildiği gibi yüzeye kimyasal olarak ta adsorplanabilirler ve aynı şekilde taneciklerin zeta potansiyellerinin düşmesine neden olarak flokülasyonu sağlarlar (İpekoğlu, 1997).

### **2.2.3.2. Flokülant Türleri**

Flokülantlar organik esaslı polimerler veya polielektrolitlerdir. En önemli özellikleri çok yüksek molekül ağırlıklarına sahip olmalarıdır (molekül ağırlıkları 20.000.000 g/mol'a kadar çıkabilmektedir). Flokülantları genel olarak sentetik flokülantlar ve doğal flokülantlar olarak iki gruba ayırmak mümkündür.

Flokülantların mermer atıksularında kullanımının temel amacı sulu atık havuzlarında veya tankında çökmeden askıda duran mermer tanelerini bir araya getirip, gravitasyon kuvvetini artırarak tanelerin çökmesini sağlamak ve böylece katı tanelerden arındırılmış veya askıda katı miktarı en aza indirilmiş temiz su elde edebilmektir (Ersoy, 2003).

#### **2.2.3.2.1. Doğal flokülantlar**

Nişasta, reçine, jelatin, aljinat (deniz yosunu) gibi doğal organik maddelerdir. Doğal flokülantların molekül ağırlıkları sentetik flokülantlara göre çok düşük ve flokülasyon kabiliyeti daha zayıftır. Bu yüzden pratikte en çok kullanılanlar sentetik flokülantlardır. Yüksek dozajda kullanılmaları halinde dengesiz süspansiyonlar

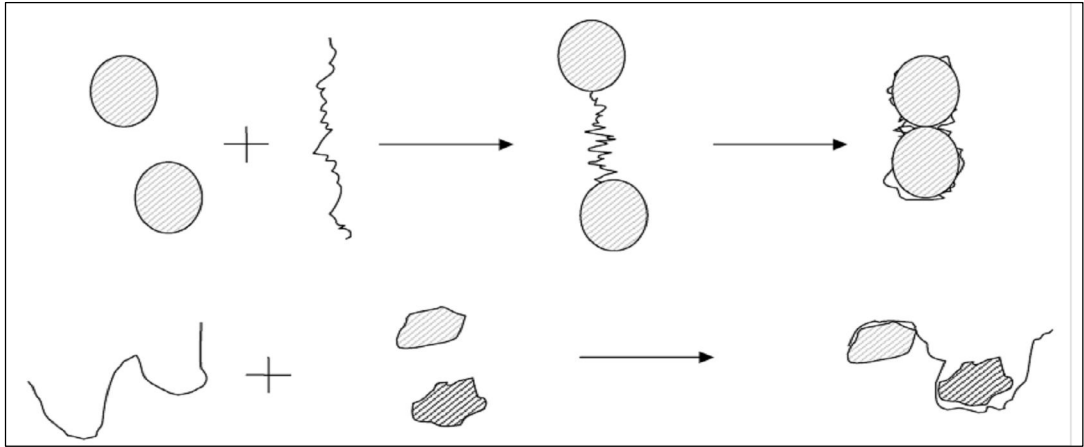
meydana getirmeleri ve meydana getirdikleri salkımların kolay parçalanabilirliği en büyük dezavantajlarıdır (İpekoğlu, 1997).

#### 2.2.3.2.2. Sentetik flokülanlar

Taneler arasında köprü oluşturan, suda çözünebilir yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir (Owen vd, 2002). Yaygın olarak kullanılan flokülanlar akrilamid monomerinden elde edilir (Mortimer, 1991).

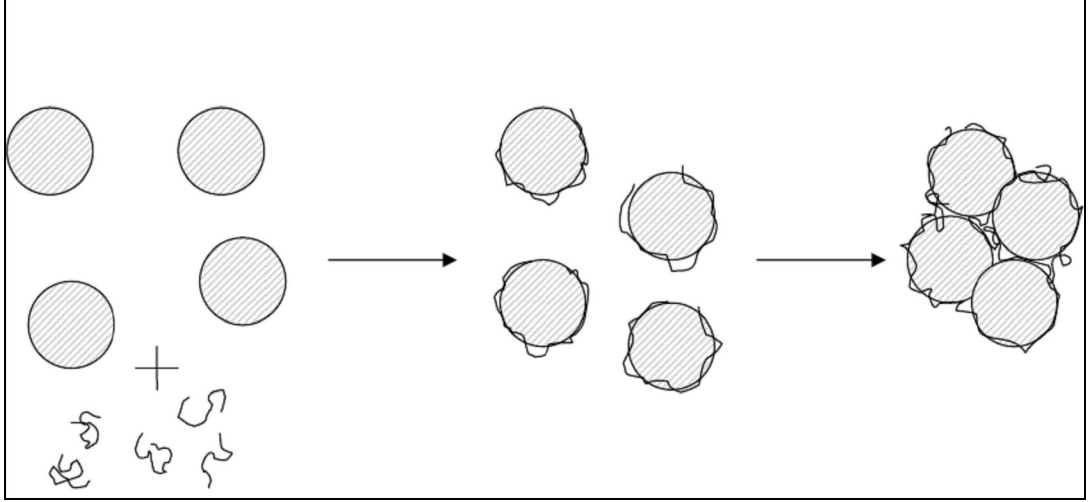
Sentetik polimerlerin taneleri bağlamaları ile ilgili iki teori ortaya atılmıştır;

- Polimer molekülü iki parça arasında köprü kurarak onların etrafını sarmaktadır (Şekil, 2.7).



**Şekil 2.7.** Flokülanların taneleri bağlaması (Alptekin, 2006)

- Su içerisinde dağılmış durumda bulunan her polimer molekülü, yine su içerisinde bulunan dağılmış durumdaki mineral tanesi üzerine adsorplanır. Polimer molekülleri ile adsorplanan dağılmış mineral taneleri süspansiyonun karıştırılması ile çarpışırlar ve bu çarpışma sırasında birbirleriyle birleşirler. Bu yolla daha fazla sayıda tanenin bir araya gelmesi sağlanarak daha etkin bir çökeltme sağlanmış olur (Şekil 2.8)



**Şekil 2.8.** Flokülantların taneleri bağlama durumları (Alptekin, 2006)

Sentetik flokülantlar, iyoniklik derecelerine ve molekül ağırlıklarına bağlı olarak iki ana sınıflandırmaya tabi tutulabilir.

1. İyonik ve iyonik olmayan sınıflandırma (Tablo 2.1)
2. Molekül ağırlıklarına göre sınıflandırma (Tablo 2.2)

**Tablo 2.1.** Flokülantların iyonik/ non-iyonik formlarına göre sınıflandırılması (Ersoy, 2003)

| Flokülant Tipi | İyoniklik Derecesi                            |
|----------------|-----------------------------------------------|
| Noniyonik      | -                                             |
| Anyonik        | Zayıf Anyonik, Orta Anyonik, Güçlü Anyonik    |
| Katyonik       | Zayıf Katyonik, Orta Katyonik, Güçlü Katyonik |

Noniyonik homopolimerler (% 100 akrilamid) etkili flokülantlardır. Herhangi bir elektriksel yük taşımaz ve pH değişimlerinden etkilenmezler. Köprüleme kabiliyetleri yüksektir. Bununla birlikte aktiviteleri diğer polimerler ile kopolimerizasyon yapılarak arttırılabilir (Owen vd, 2002). Polimerizasyon

reaksiyonları kontrol edilerek farklı anyoniklik, katyoniklik derecelerinde (zayıf/orta/güçlü) ve molekül ağırlıklarında flokülantlar elde edilebilmektedir.

Anyonik flokülantlar akrilamidin akrilik asit ( $\text{CH}_2 = \text{CHOOH}$ ) ile kopolimerizasyonu sonucu elde edilmektedir. Günümüzde en çok kullanılan sentetik flokülantlar anyonik flokülantlardır. Yüksek köprüleme kabiliyetine sahip olan anyonik flokülantlar nötral – alkali pH aralığında daha etkindir.

Katyonik flokülantlar ise; akrilamid ile akrilamidin amin türevlerinin kopolimerizasyonu sonucu elde edilmektedir. Bu polimerler için uygun pH aralığı çok değişken olmakla beraber çoğunlukla asidik pH seviyeleridir. Köprüleme kabiliyetlerinin düşük olması nedeniyle en az kullanılan flokülant tipidir (Yılmazer, 2006).

Flokülasyon prosesleri polimer moleküllerinin çözünme özelliklerinden önemli ölçüde etkilenir. Flokülant adsorpsiyonu ve köprüleme mekanizması yalnız yüzey ile fonksiyonel etkileşimlere bağlı değildir. Aynı zamanda polimer zincirlerinin çözünme miktarına ve dolayısıyla polimerin molekül ağırlığına da bağlıdır (Owen, 2002). Molekül ağırlığı yüksek flokülantlar daha büyük boyutlu fakat daha poroz yapıda flokların oluşumunu sağlarken düşük molekül ağırlıklı flokülantlar nisbeten daha küçük boyutlu fakat daha sağlam floklar oluşturur (Hogg, 2000).

**Tablo 2.2.** Flokülantların molekül ağırlıklarına göre sınıflandırılması (Ersoy, 2003)

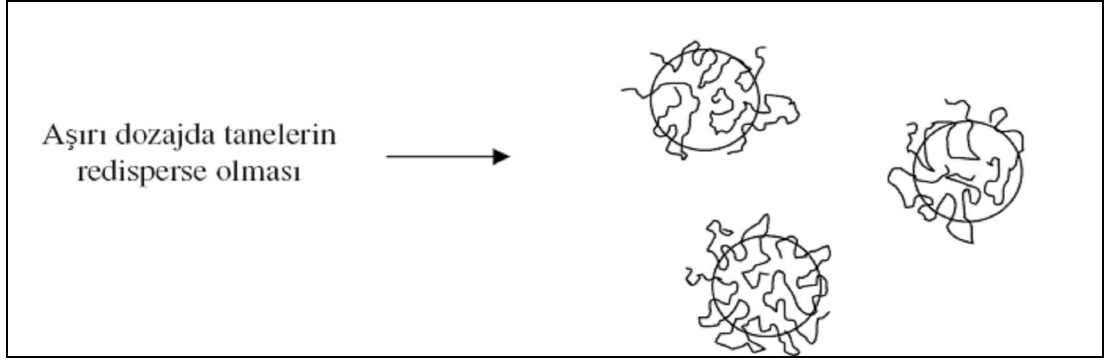
| Molekül Ağırlığı (gr/mol) | Genel Tanımlama |
|---------------------------|-----------------|
| 10 milyon ve üstü         | Çok yüksek      |
| 1- 10 milyon              | Yüksek          |
| 200.000 – 1 milyon        | Orta            |
| 100.000 -200.000          | Düşük           |
| 50.000 -100.000           | Çok Düşük       |
| 50.000'den az             | Çok çok düşük   |

### **2.2.3.3. Flokülasyonu Etkileyen Parametreler**

İnce tane süspansiyonlarının flokülasyonu, tane boyutu ve dağılımı, katı konstrasyonu, pH, süspansiyon ortamının iyonik kuvveti, flokülantların moleköl ağırlıkları ve şarj yoğunlukları, adsorbe edilen flokülantların adsorpsiyon yoğunluğu, nasıl uygulandıkları gibi pek çok fizikokimyasal faktörlere bağıdır (Chen vd, 2007) Bu fizikokimyasal faktörler arasındaki karşılıklı kompleks etkileşim farklı numunelerle yapılan çalışmalarda detaylı bir şekilde incelenmiştir (Owen, 2002; Mpofu vd, 2004; Besra vd, 2006; Chen vd, 2007). Bu konuda yapılan çalışmalar devam etmektedir. Literatürde mermer numuneleri ile yapılan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Ersoy, 2003; Alptekin, 2006; Oğul, 2005)

#### **2.2.3.3.1. Flokülant Dozajı**

Süspansiyon veya kolloidal sıvıların flokülasyonunda, flokülasyon dozajının kontrolü kritik bir durumdur. Dozajın yüksek tutulması maliyeti arttırıcı etkinin yanında taneler arasında köprü yoluyla flok oluşumunu engellerken, düşük miktarda flokülant kullanılması da flokülasyon işlemini olumsuz etkilemektedir. Optimum flokülant dozajı katı yüzeyinin yarısını kaplayacak miktardaki dozajı ifade etmektedir. Bu dozajda, tane yüzeylerinin minimum potansiyele ulaşması ve büyük boyutlu flokların oluşması beklenir (Sabah, 2004). Şekil 2.9'da görüldüğü üzere tanelerin yüzeyinde, bir başka tane yüzeyine adsorplanmış flokülant zincirinin bir kısmının bu tane yüzeyinde adsorplanabilmesi için yeterince boşluk kalmamaktadır. Bu durum flokülasyonu engellemektedir. (Ersoy, 2005)



**Şekil 2.9.** Aşırı flokülant dozajında tanelerin yeniden disperse hale gelmesi (flokülantların sterik engel oluşturmaması)

#### **2.2.3.3.2. Karıştırma ve Kesme Kuvvetlerinin Etkisi**

Karıştırma hızı ve kesme kuvvetleri flokülasyon performansını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Karıştırma, süspansiyondaki tanelerin homojen bir şekilde dağılmasını ve süspansiyona ilave edilen flokülantın bütün partiküller ile temasını sağlayarak uygun boyutta floklar oluşmasında etkindir. Oluşan bu flokların bozulması veya kırılması yine karıştırma hızıyla ilgili bir husustur. Süspansiyona ilave edilen doğal veya sentetik flokülantlar ile partiküller arasındaki etkileşim sonucu meydana gelen floklar, fazla ve/veya yüksek hızlarda karıştırma sonucunda ortaya çıkan kesme kuvvetleri nedeniyle parçalanabilir ve bundan sonra da tekrar floküle olamazlar (Hogg, 2000). Flokülasyon sırasında uzun zincirli yüksek molekül ağırlıklı polimerlere fazla gerilim uygulanması zincirlerin kopmasına sebep olabilir. Bunun sonucu olarak da köprüleme kapasitesi azalır (Owen vd, 2002, Scott vd, 1996). Süspansiyonda iri boyutlu taneciklerin bulunması durumunda karıştırma hızı, çok düşük kesme kuvvetlerinde bile belirleyicidir (Cengiz vd, 2004)

#### **2.2.3.3.3. Tane Boyutunun Etkisi**

Çeşitli mineral süspansiyonları ile yapılan deneyler sonucunda partikül tane ebadının azalması (katı yüzey alanının artması) ile kullanılan optimum flokülant miktarının arttığı saptanmıştır (Oğul, 2005).

#### **2.2.3.3.4. Pülp Yoğunluğunun Etkisi**

Pülp yoğunluğu arttıkça tanelerin birbirlerine yapışma ihtimalide artar. Bu nedenle daha kolaylıkla ve süratle flokülasyon meydana gelmesi doğaldır. Salkımların karıştırmaya karşı gösterdikleri denge de pülp yoğunluğu ile artmaktadır.

Karıştırma sonunda parçalanan bir salkımın tekrar meydana gelmesi bir partikülün diğer bir partiküle değmesi için geçen süreye bağlı olmaktadır. Düşük pülp yoğunluğunda bu süre uzun olmakta ve polimer flokülant tekrar aynı partikül üzerine yapışmaya çalışmakta ve böylece sistem içinde köprü sayısı eksilerek flokülasyon kabiliyeti azalmaktadır (İpekoğlu, 1997).

#### **2.2.3.3.5. Flokülantın Molekül Ağırlığının Etkisi**

Kullanılan flokülantın molekül ağırlığı arttıkça süspansiyon içindeki partiküller üzerine adsorplanan miktar artmakta ve salkımların meydana gelmesi hızlanmaktadır. Genel olarak molekül ağırlığı etkin bir flokülasyon için tek başına bir kriter değildir. Aynı molekül ağırlığında iki ürün farklı moleküler ağırlık dağılımına sahip ve dolayısı ile farklı performansta olabilir. Ele alınan herhangi bir pülpün flokülasyon verimi polimerin özelliklerine olduğu kadar pülpün karakteristik özelliklerine de bağlı olmaktadır (İpekoğlu, 1997).

#### 2.2.3.3.6. pH'ın Etkisi

P lp n pH' ı minerallerin yüzey  arjlarını tayin etmektedir. Bir pülp içinde hemen her mineralin yüzey  arjını sıfır yapan bir pH derecesi vardır. Buna kısaca ' arjın sıfır noktası (z.p.c.)' denmektedir. Z.p.c.'nin altındaki pH'larda katı yüzeyi (+) işaretle, üzerinde ise (-) işaretlidir. Z.P.C.'nin her iki tarafındaki çok yüksek ve çok alçak pH değerlerinde flokülasyonun meydana gelmesi güçtür. Bunun nedeni partiküller arasındaki itme kuvvetlerinin artması ve dolayısıyla partiküllerin süspansiyon içinde birbirinden uzakla maları ve polimer flokülantın bir çok partikül üzerine yapışarak köprü kurma olasılığının azalmasıdır. Ayrıca pH polimerin iyonize olabilme derecesini etkilemekte ve polimer zincirindeki elektrik  arjını kontrol ederek polimer zincirinin pülp içinde uzayıp veya yumak halinde bulunduğunu tayin etmektedir. Bu da sonuç olarak pülp içindeki k pr le me derecesini etkilemektedir. Böylece flokülantların tiplerine göre sadece belirli pH derecelerinde fonksiyon gösterdikleri söylenebilir ( peko lu, 1997).

#### 2.2.3.3.7. Sıcaklığın Etkisi

Genel olarak sıcaklığın artmasının flokülasyonu olumlu yönde etkileyeceği düşünülürse de bunun her zaman doğru olduğu söylenemez. Çünkü sıcaklıktaki değişimler çeşitli sistemleri farklı şekillerde etkilemektedir. Flokülantın süspansiyon içinde yayılma hızı ve partiküllerin çarpışma hızları artan sıcaklıkla artmalıdır. Fakat flokülantın mineral yüzeylerine adsorplanması ekzotermik bir reaksiyon olduğu için artan sıcaklıkla olumsuz yönde etkilenmelidir. Ayrıca polimer molekülün içinde bulunduğu sıvıya bağlı olarak lineer uzaması sıcaklık farkı ile de i ebilir ( peko lu, 1997).

#### **2.2.3.3.8. Flokülantın Besleme Metodunun Etkisi**

Besleme noktaları hafif türbülans olan yerlerde seçilmelidir. Flokülant solüsyonları seyreltik olduğu sürece daha üniform bir dağılma söz konusudur. Beslemenin çökelme işleminin yapılacağı yere mümkün olduğu kadar yakın olması istenir. Besleme noktalarının belirli aralıklarla seçilmesi daima daha iyi bir köprüleşme ve daha kuvvetli salkımlar meydana gelmesine yardımcı olur. Karıştırma flokülantın beslenmesi sırasında ve sonrasında çok önemlidir. Flokülasyonun gerçekleşmesi sırasında sürekli fakat hafifçe bir karıştırma köprü oluşumunu faydalı yönde etkilemektedir. Düzensiz karıştırma bazı bölgelerde flokülant konsantrasyonunun artmasına ve süspansiyonun geri kalan kısmının disperse durumda kalmasına neden olur. Salkımların formasyonu tamamladıktan sonra karıştırma ise parçalanmalara yol açabilir. Şiddetli karıştırma tekrar dispersiyon hali yaratabilir (İpekoğlu, 1997).

#### **2.2.3.3.9. Karıştırma Süresi**

En uygun karıştırma süresi optimum flokülant dozajının elde edilebilmesi için, diğer bir ifadeyle 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. Bu sürenin gereğinden az olması da flokülant moleküllerinin süspansiyonda ki tüm katı tanelerine ulaşabilme şansını azaltacağından flokülasyonu olumsuz yönde etkileyecektir (Ersoy, 2005).

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. Malzeme

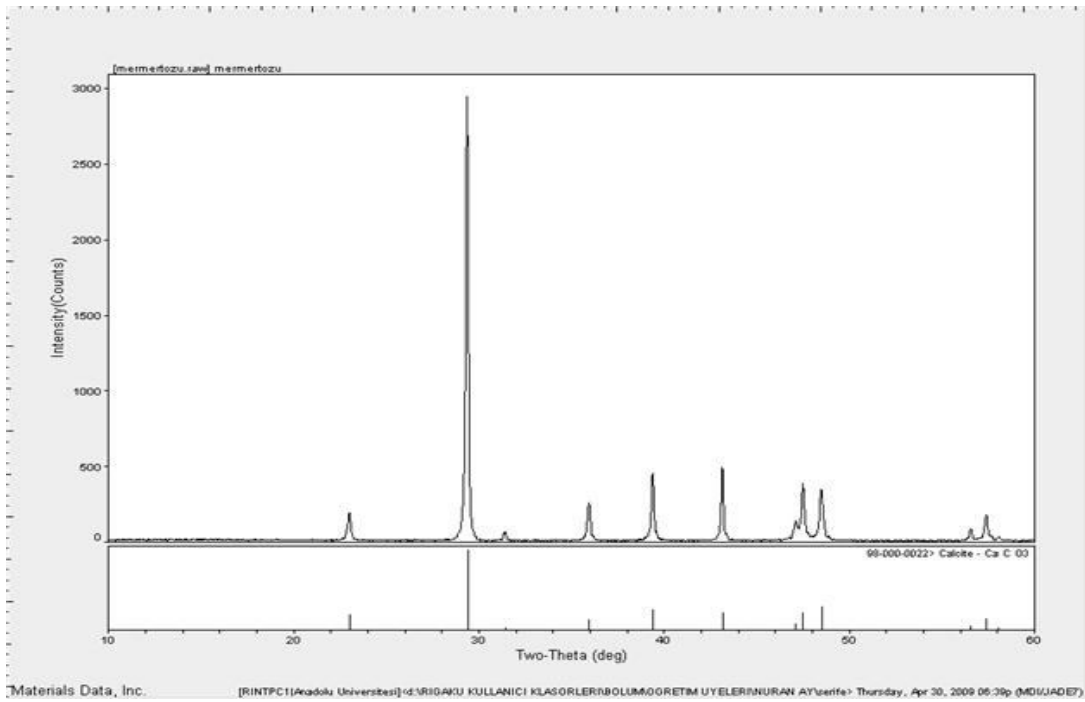
##### 3.1.1. Mermer süspansiyonlarının özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan traverten süspansiyonu, Konya’ da faaliyet gösteren Kombassan A.Ş. Meram Mermer Fabrikasının (MER-MER) atıksu çökelme havuzu girişinden, fabrikanın tam kapasite çalışması esnasında temin edilmiştir (Şekil 3.1). Doğal taşların (traverten) işlenmesi esnasında açığa çıkan orjinal tesis atıksuyu numuneleri, su kirliliği yönetmeliği örnek alma ve analiz metodları tebliği kompozit örnek alma esaslarına uygun olarak alınarak deneysel çalışmalarda kullanılmıştır (SKKY, 1991). Numune karakterizasyonu (kimyasal analiz, minerolojik analiz, tane boyutu analizi) yapıldıktan sonra optimizasyon deneylerine geçilmiştir. Orjinal süspansiyonun katı oranı % 5,97 olup, pH’ı 7,5’dir.

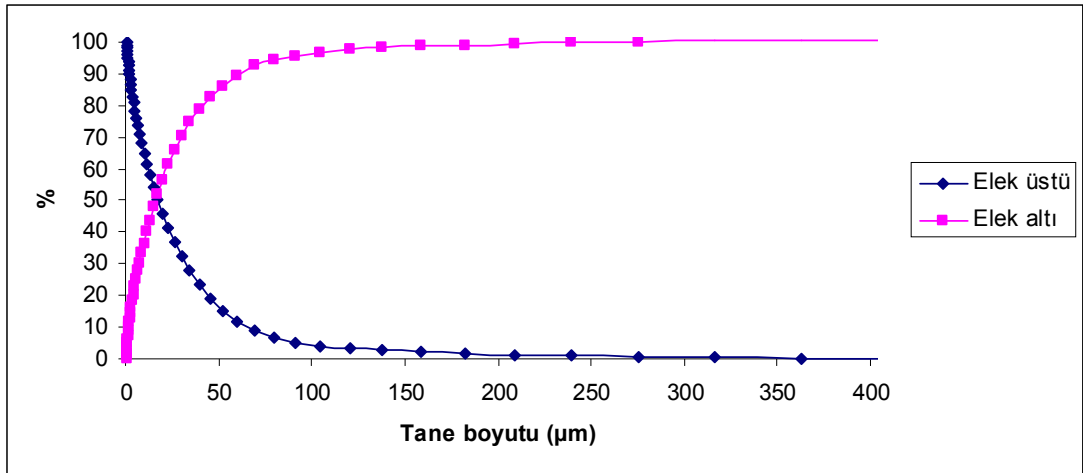


**Şekil 3.1.** Konya Kombassan Mermer Fabrikası numune alma noktası

Traverten tozuna ait XRD analiz sonucu Şekil 3.2.'de verilmiş olup, traverten süspansiyonunun hemen hemen tamamının kalsit mineralinden oluştuğugörülmektedir. Tane boyutu ölçümleri Malvern lazerli tane boyut ölçüm cihazı (Mastersizer 2000) ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3.'te verilen tane boyutu analizi sonuçlarına göre, traverten süspansiyonunun içindeki mermer tozunun % 80'i 40 µm'un altındadır. Traverten süspansiyonunun kimyasal analizi Tablo 3.1.'de verilmiştir.



**Şekil 3.2.** Traverten süspansiyonunun XRD analizi



**Şekil 3.3.** Traverten tozu tane boyut analizi elek altı ve üstü eğrileri

**Tablo 3.1.** Traverten tozunun kimyasal analiz sonuçları (Kombassan Mermer Fab.)

| İçerik(%) |                  |                                |                                |      |       |                   |       |                  |       |       |      |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|-------------------|-------|------------------|-------|-------|------|
| Numune    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | CaO   | Na <sub>2</sub> O | KO    | TiO <sub>2</sub> | MnO   | K.K.  | Top. |
| Traverten | 0.67             | 0.13                           | 0.070                          | 0.67 | 54.57 | 0.028             | 0.007 | 0.000            | 0.005 | 43.74 | 99.9 |

### 3.1.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Flokülantlar, Koagülantlar, Mineraller ve Diğer Kimyasallar

Deneysel çalışmalarda kullanılan flokülantların özellikleri Tablo 3.2’de, koagülantların özellikleri Tablo 3.3’te gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan sepiyolit minerali Eskişehir’deki Doğuş Madencilik AŞ.’den, zeolit minerali İzmir’deki Enli Madencilik A.Ş.’den, pomza minerali ise Isparta Gelincik yöresindeki ocaklardan temin edilmiştir. Çökeltmeye yardımcı malzeme olarak kullanılan sepiyolit, zeolit ve pomza minerallerinin genel özellikleri ve kimyasal analiz sonuçları, sırasıyla Tablo 3.4, Tablo 3.5’te gösterilmiştir.

**Tablo 3.2.** Deneysel çalışmalarda kullanılan flokülantlar ve özellikleri

| Cinsi     | Firma Kodu   | Mol Ağırlığı | Anyoniklik veya Katyoniklik Derecesi | Fiziksel Form |
|-----------|--------------|--------------|--------------------------------------|---------------|
| Anyonik   | Erka – 2430  | Orta         | %30                                  | Toz           |
| Anyonik   | Erka – 2440  | Yüksek       | %40                                  | Toz           |
| Noniyonik | Cynamid N100 | -            | -                                    | Toz           |
| Katyonik  | Erka – 7440  | Orta         | %30                                  | Toz           |
| Katyonik  | Erka -8440   | Yüksek       | %40                                  | Toz           |

**Tablo 3.3.** Deneysel çalışmalarda kullanılan koagülantlar ve özellikleri

| Adı                 | Kimyasal Formülü                     | Mol Ağırlığı(g/mol) | Safılık Derecesi |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------|
| Alüminyumsülfat     | $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$          | 162,5               | > %98            |
| Demir III Klorür    | $FeCl_3 \cdot 6H_2O$                 | 270,33              | > %99            |
| Polyalüminyumklorür | $Al(OH)_{15}(SO_4)_{0.125}Cl_{1.25}$ | 133,34              | > %98            |
| Sodyum Alüminat     | $NaAlO_2 \cdot n H_2O$               | 81,97               | > %99            |

**Tablo 3.4.** Deneysel çalışmalarda kullanılan zeolit, sepiyolit, pomzanın genel özellikleri

| Mineral         | Zeolit    | Sepiyolit | Pomza   |
|-----------------|-----------|-----------|---------|
| Sertlik (mohs)  | 3,5 – 4   | 2 – 2,5   | 5 – 5,5 |
| Yığın yoğunluk  | 850 -1100 | 457       | 356     |
| Gerçek yoğunluk | 2,5       | 2,1       | 2,3     |

**Tablo 3.5.** Deneysel çalışmalarda kullanılan zeolit, sepiyolit ve pomza örneklerinin kimyasal analizi

|           | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO   | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | CaO  | TiO <sub>2</sub> | MnO   | K.K.  |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|-----------------|-------------------|------|------------------|-------|-------|
| Zeolit    | 70,9             | 12,4                           | 1,21                           | 4,46             | 0,83  | -               | 0,28              | 2,54 | 0,089            | <0,01 | -     |
| Sepiyolit | 60,42            | 1,83                           | -                              | 0,14             | 20,65 | 0,07            | -                 | 1,82 | -                | -     | 15,50 |
| Pomza     | 60,50            | 17,15                          | 3,38                           | 4,54             | 2,09  | 0,16            | 4,30              | 4,68 | 0,41             | -     | <0,64 |

## 3.2.YÖNTEM

### 3.2.1. Deneylerin Yapılışı

#### 3.2.1.1.Flokülasyon, Koagülasyon, Sedimentasyon Deneyleri

Deneyler aynı anda altı beherle çalışma imkanı sağlayan, hız ve zaman ayarlı jar test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4). Deneyler öncesi çalışılacak her flokülant ve koagülant için uygun stok çözeltiler hazırlanarak, deneysel çalışmalar distile su ile hazırlanan bu stok çözeltiden seyreltilerek değişik konsantrasyonlar da dozlanarak gerçekleştirilmiştir. Mermer tozlarının süspansiyon içinde çöktürülmesi deneylerinde önce 1000 ml’lik beherler kullanılmıştır. Numuneler iyice çalkalandıktan sonra beherler içerisine 500 ml numune konularak istenilen konsantrasyon da flokülant/ koagülant ilavesi yapılmış ve çalışılacak karıştırma süreleri ve hızlarına bağlı olarak karıştırmaya tabi tutulmuştur. Karıştırma süresi sonunda sistem durdurulmuş ve numune 500 ml’lik, yüksekliği 30 cm, iç çapı 4,5 cm, dış çapı 5,2 cm olan mezürlere alınarak çökelmeye bırakılmıştır. Çökelme süresi boyunca katı-sıvı ara yüzey yüksekliği takip edilmiş (Şekil 3.5) ve çökelme sonunda hava-su ara yüzeyinin belirli bir mesafe altından alikot alınarak bulanıklık değeri ölçülmüştür. Deneysel çalışma sonucunda alınan numune süspansiyonun bulanıklık değeri, Pitormacia (KB-Novaspec II) marka spektrofotometre cihazı ile 375 nm dalga boyunda ölçüldükten sonra aşağıdaki formül ile deneyin başarısı tespit edilmiştir.

$$\% \text{ Flokülasyon Verimi} = [(To - Tf) / To] * 100$$

To : Süspansiyonun flokülasyon öncesi bulanıklık değeri (NTU)

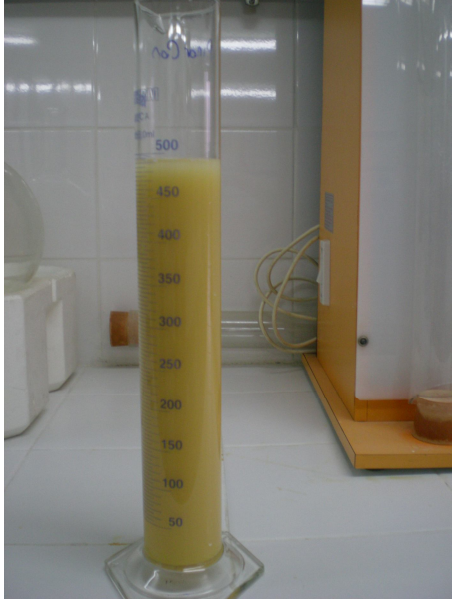
Tf : Flokülasyon sonrası süpernatantın bulanıklık değeri (NTU; Nephelometric turbidity unit)

Çalışılan deneysel parametreler, flokülant/koagülant türü ve dozajı, karıştırma süresi, karıştırma hızı, pH, çökelme süresinin belirlenmesidir.

pH'in etkisinin araştırıldığı deneylerde ortam pH'ı  $H_2SO_4$  ve  $Ca(OH)_2$  ile ayarlanmış ve pH kontrolünde pH 211 Microprocessor marka dijital pH metre kullanılmıştır.



**Şekil 3.4.** Deneysel çalışmalarda kullanılan hız ve zaman ayarlı jar-test cihazı



**Şekil 3.5.** Zamana bağlı olarak süspansiyonun ara yüzey yüksekliğinin ölçümü

### 3.2.1.2. Mermer çamurunun özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler

Deneyisel çalışmalar kapsamında, kullanılan farklı koagülant/flokülantlar ve kil mineralleri ile oluşan atık mermer çamurların gerek yeni kullanım alanlarında değerlendirilebilirliği gerekse çevresel etkileri açısından karşılaştırılabilmesi için çökeltme sonucu oluşan çamurların özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu aşamada; tüm flokülasyon/koagülasyon ve doğal mineral sedimentasyonu için belirlenen optimum koşullarda deneyler yapılarak elde edilen mermer çamurlarının çökeltme hızı ( $V_s$ , cm/dk), askıda katı madde (AKM, mg/L), katı madde içeriği (%) ve çamur yoğunluğu ( $\text{gr/cm}^3$ ) değerleri belirlenmiştir.

İlk aşamada zamana bağlı ara yüzey yüksekliği verisinden yararlanarak farklı flokülant/ koagülantları içeren mermer çamurlarının çökeltme hızı belirlenmiştir.

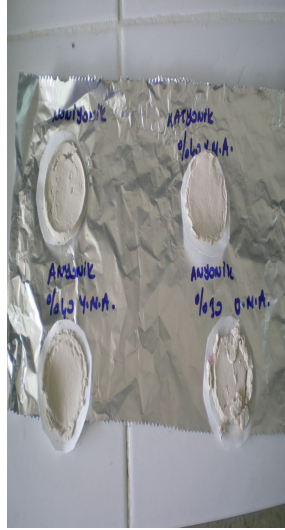
İkinci aşamada; hacmi belli olan numunelerin ağırlıkları hassas terazide tartılarak her bir numunenin kütlesi bulunmuş ve buradan mermer çamurlarının yoğunluk değerleri hesaplanmıştır.

Üçüncü aşamada ise mermer süspansiyonları vakum filtre düzeneğinde, filtre kağıdından süzülerek askıda katı madde içeriği değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.7). Traverten çamurunun özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan vakumlu filtre düzeneği Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Son olarak ise askıda katı madde ve yoğunluk verileri değerlerinden yararlanılarak mermer süspansiyonlarının katı madde içerikleri % olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 3.6.** Traverten çamurunun özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan vakumlu filtre düzeneği



**Şekil 3.7.** Vakumlu filtre sonunda elde edilen mermer çamurları

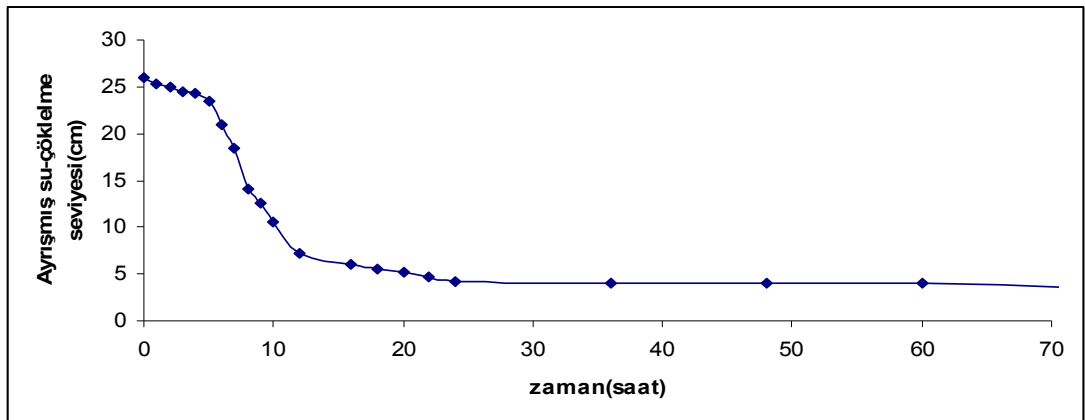
#### 4. BULGULAR

Deneysel çalışmalar beş aşamada gerçekleştirilmiştir.

- Doğal sedimentasyon deneyi
- Koagülasyon deneyleri
- Flokülasyon deneyleri
- Doğal minerallerle sedimentasyon deneyleri
- Mermer çamurunun özelliklerinin belirlenmesi

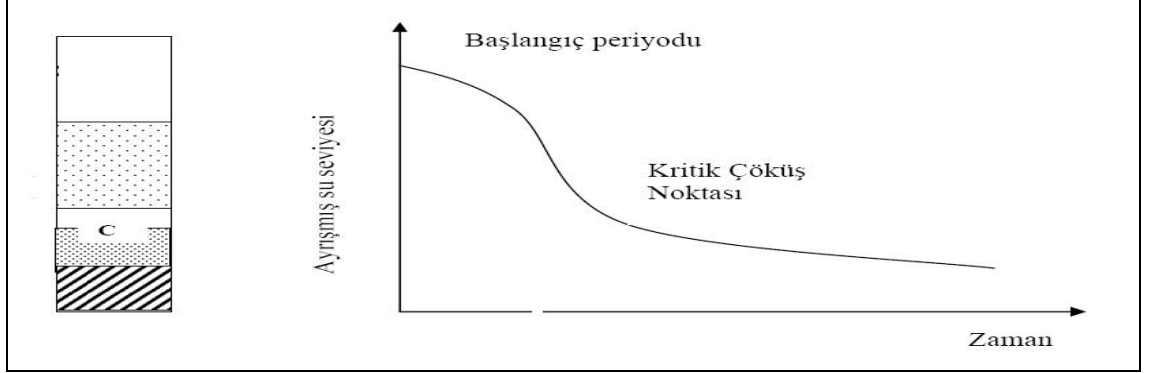
##### 4.1. Doğal Sedimentasyon Deneyi

Traverten süspansiyonunun doğal sedimentasyon karakteristiğini belirlemek amacıyla iç çapı 4,5 cm, dış çapı 5.2 cm olan 500 ml’lik mezür içerisine (hiçbir katkı maddesi ilave edilmeksizin) traverten süspansiyonu konularak 10 kez alt üst edilmiş ve 72 saat boyunca süspansiyonun ara yüzey yüksekliği gözlemlenmiştir. Sedimentasyon deneyi ile gözlenen çökelme grafiği Şekil 4.1.’de gösterilmiştir. Şekil 4.1.’de görüldüğü gibi çökelme ara yüzey yüksekliği 36. saatten itibaren sabit kalmıştır.



Şekil 4.1. Traverten süspansiyonunun doğal sedimentasyonu

Şekil 4.1.' de gözlenen traverten süspansiyonu sedimantasyon eğrisi, genel olarak ince tanelerin sedimantasyonunda görülen 1. şekil çökme modeline örnektir.



Bu modelde 'C' zonu üzerindeki zonda sedimantasyon hızı kritik çökme noktasına kadar azalmakta ve daha sonra sabitlenmektedir (İpekoğlu, 1997).

## 4.2. Koagülasyon Deneyleri

Traverten tozu süspansiyonu koagülasyonunda ilk olarak koagülant türü ve dozajının etkisini görmek amacıyla, çeşitli koagülantlar varlığında süspansiyonun doğal pH'ında (7,5) bir dizi çökelme testleri yapılmıştır. Bu testlerde koagülant olarak  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , PACl,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  kullanılmıştır.

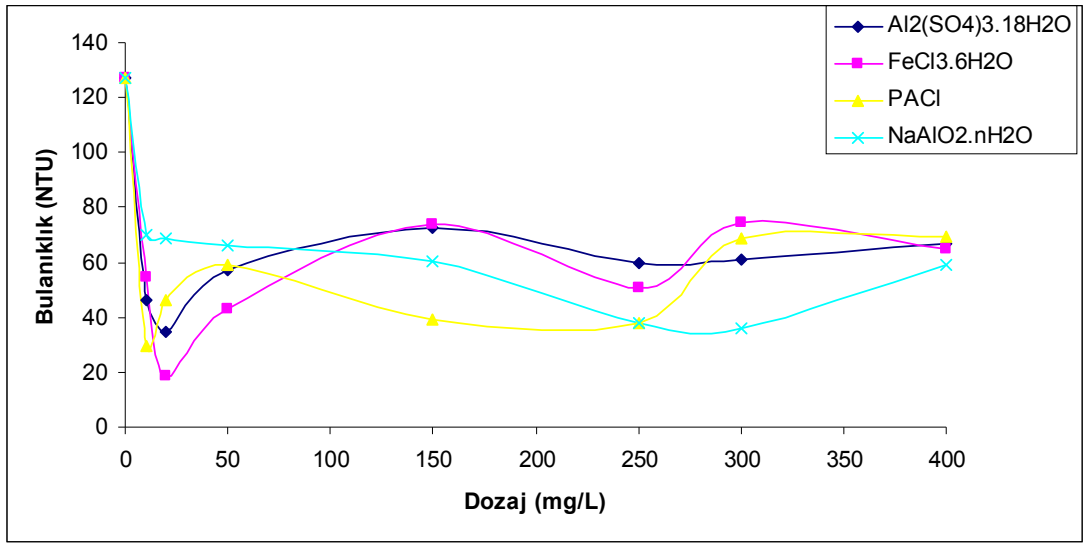
Koagülant türü ve dozajı, karıştırma süresi/hızı, çökelme süresi ve ortam pH'ının, traverten tozu süspansiyonunun koagülasyonuna etkileri çalışılan deneysel parametrelerdir.

### 4.2.1. Koagülant türü ve dozajının koagülasyona etkisi

Koagülant türü ve dozajının koagülasyona etkisini belirleyebilmek amacıyla, her bir koagülant için doğal pH'ta (7,5) farklı dozajlarda, 200 dev/dk karıştırma hızında, 2 dakika karıştırma yapılarak, süspansiyona 30 dakikalık bir çökelme süresi verilmiş ve;

- 30 dakika boyunca zamana karşı ara yüzey yüksekliği değişimi
- 30 dakika sonunda bulanıklık ölçümü yapılmıştır.

Böylece her bir koagülant için traverten süspansiyonunun en düşük bulanıklık sonucunu veren optimum dozajlar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.2 ve 4.3' te sunulmuştur.



**Şekil 4.2.** Traverten süspansiyonunun bulanıklığına koagülant türü ve dozajının etkisi (Çizelge Ek 1)

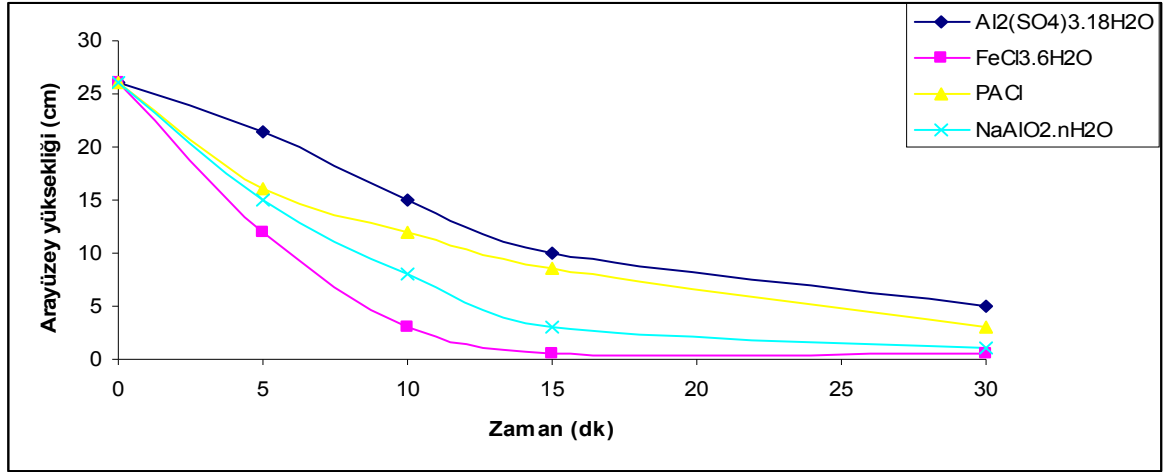
Şekil 4.2’de görüldüğü üzere en düşük bulanıklık değeri FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O ile sağlanırken, daha sonra sırasıyla PACl, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O ve NaAlO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O gelmektedir. Traverten süspansiyonunun başlangıç bulanıklığı 127,4 NTU olup, tüm çalışılan koagülantlar için optimum dozaj ve bu dozajlarda ulaşılan bulanıklık değerleri;

- FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O 20 mg/L dozajda 18,38 NTU
- PACl 10 mg/L dozajda 29,35 NTU
- Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O 20 mg/L dozajda 34,35 NTU
- NaAlO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O 300 mg/L dozajda 36,12 NTU’ dur.

Görüldüğü gibi en iyi sonucu Cl<sup>-</sup> esaslı koagülantlar vermiştir. Bu sonucu daha önce literatürde yapılmış çalışmalarda desteklemektedir (Alptekin, 2006). Her bir koagülant için optimum dozajlarda traverten süspansiyonunun koagülasyon verimine bakılırsa, en iyi performansı %86 koagülasyon verimiyle FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O ile sağlanırken, daha sonra sırasıyla %77 verimle PACl, %73 verimle Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O, %71 verimle NaAlO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O ile sağlanmıştır.

Şekil 4.2.’de görüldüğü gibi çalışılan tüm koagülantlar için optimum doz olarak belirlenen koagülant dozajına kadar süspansiyon bulanıklığında bir düşüş gözlenirken, daha sonra artan koagülant dozajı ile süspansiyon bulanıklığında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ortama optimum dozajdan daha fazla koagülant

ilavesi yapılırsa, şarjın ters dönmesi ve sonrasında artan pozitif şarj nedeniyle koagülasyon olumsuz etkilenmektedir. Bunun tam tersi olan ortama optimum dozajdan daha az miktarda koagülant ilavesi yapılırsa aynı şekilde ortamda koagülasyon olayı meydana gelmemektedir.



**Şekil 4.3.** Traverten süspansiyonunun her bir koagülant için optimum dozajlarda zamana bağlı ara yüzey grafiği (Çizelge Ek 5)

Çalışılan tüm koagülantlar için optimum dozajlarda zamana bağlı ara yüzey yüksekliği değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. En iyi performansı sırasıyla FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O, NaAlO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O, PACl, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O koagülantları vermekte ve çökeltme hızları;

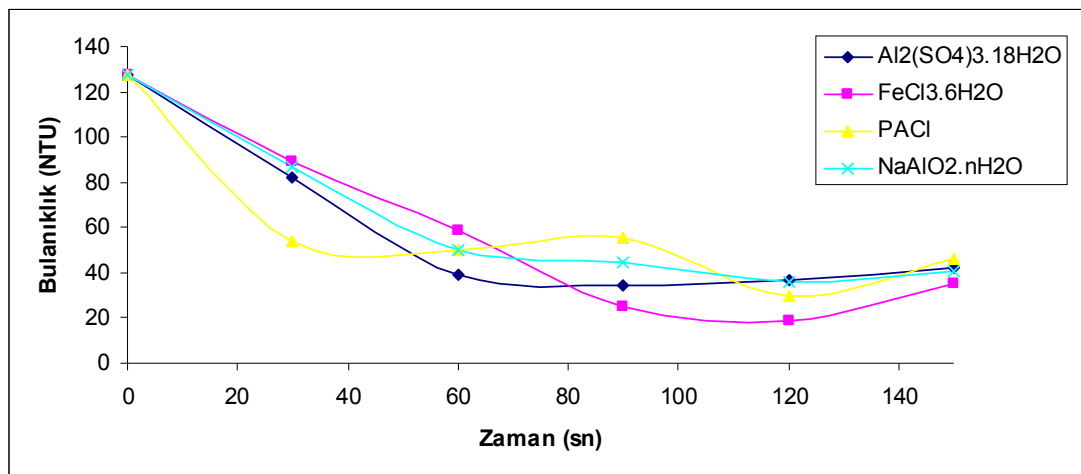
- FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O → 700 mm/dk
- NaAlO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O → 660 mm/dk
- PACl → 630 mm/dk
- Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O → 420 mm/dk'dır.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 beraber incelendiğinde; bulanıklık değerleri açısından NaAlO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O'ya göre daha iyi sonuç veren PACl'ün, çökeltme hızının daha düşük olduğu görülmektedir. Koagülasyon/ flokülasyon işlemleri bilindiği gibi süspansiyonda çökmeden askıda duran tanelerin çökmesini sağlamak ve suyun

bulanıklığını gidermek amaçlarıyla yapılır. Tanelerin çökmesiyle birlikte suyun bulanıklığının da azalması beklenen bir sonuçtur. Fakat bu iki sonuç genelde birbirleri ile uyum içerisinde değildir. Genel olarak hızlı bir çökme daha yüksek bir supernatant bulanıklığına neden olur. Bununla birlikte, daha yavaş bir çökme hızı daha kararlı bir çökmeye neden olduğundan supernatant bulanıklığı da daha düşük elde edilir. Yani bir süspansiyonda çökme hızının en iyi olduğu şartlar, bulanıklık içinde aynı sonucu vermemektedir ki bu durum koagülasyon/ flokülasyon mekanizmasının karmaşıklığının bir göstergesidir. Literatürde gerçekleştirilen pek çok çalışma bu durumu desteklemektedir (Ersoy vd, 2005; Gregory, 1989).

#### 4.2.2. Karıştırma süresinin koagülasyona etkisi

Karıştırma süresinin koagülasyona etkilerini belirleyebilmek amacıyla, her bir koagülant için belirlenen optimum dozajlarda, süspansiyonun doğal pH'ında (7,5), 200 dev/dk karıştırma hızında, farklı karıştırma sürelerinde ( 30, 60, 90, 120, 150 sn) koagülasyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve 30 dakika çökme süresi sonunda elde edilen bulanıklık verileri Şekil 4.4.'te grafiğe aktarılmıştır.

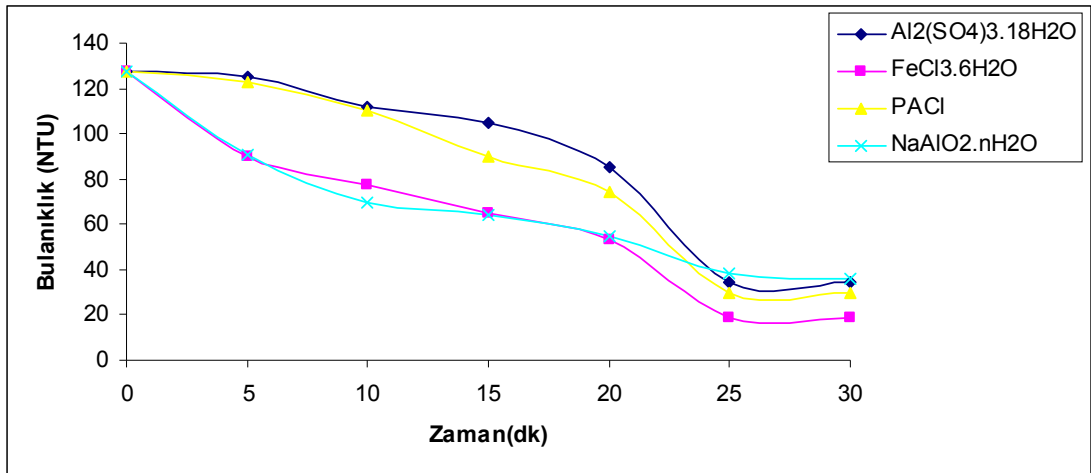


Şekil 4.4. Karıştırma süresinin koagülasyona etkisi (Çizelge Ek 12)

Optimum karıştırma süresi  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  için 90 sn,  $\text{PACl}$ ,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  için 120 sn olarak bulunmuştur. Bulanıklık, her bir koagülant için belli bir süreye kadar düşmüş, daha sonra ise karıştırma süresi arttıkça bulanıklıkta artmıştır. Bunun nedeni; optimum karıştırma süresinden daha fazla karıştırma yapıldığında koagülantlar tane yüzeyinde artmakta traverten süspansiyonunun koagülasyonu engellenmektedir. Karıştırma süresinin etkisi koagülant türüne göre değişmemektedir.

#### 4.2.3. Çökelme süresinin koagülasyona etkisi

Çökelme süresinin koagülasyona etkisini belirleyebilmek için, her bir koagülant için optimum dozajlarda ve optimum karıştırma sürelerinde süspansiyonun doğal pH' ında (7,5), 200 dev/dk karıştırma hızında farklı çökelme sürelerinde (5, 10, 15, 20, 25, 30 dk) deneyler yapılarak optimum çökelme süresi belirlenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 4.5'te grafikte sunulmuştur.



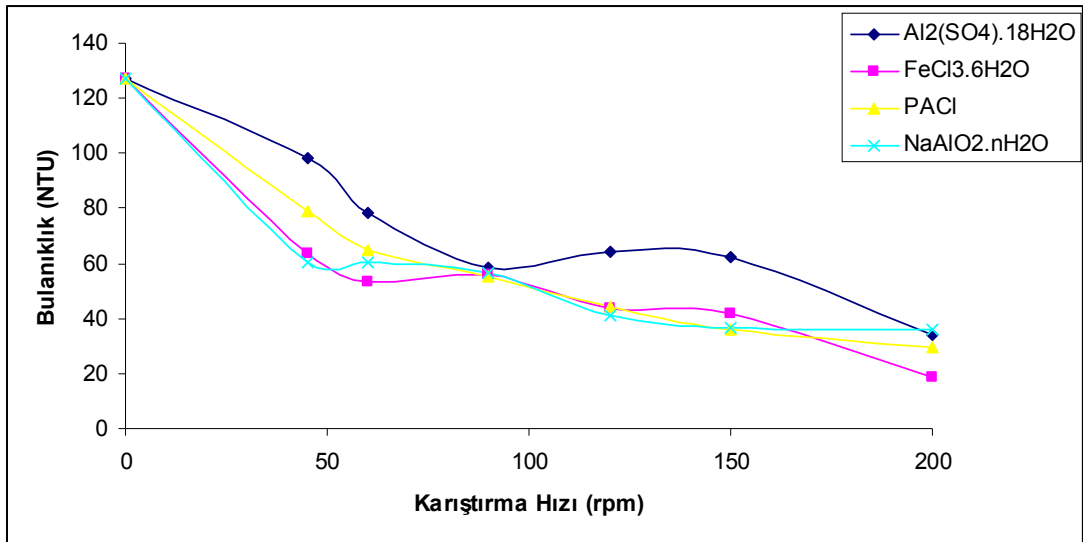
Şekil 4.5. Çökelme süresinin koagülasyona etkisi (Çizelge Ek -16)

Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi, her bir koagülant için optimum çökelme süresi 25 dakika olarak bulunmuştur. Çökelme süresi arttıkça bulanıklık azalmakta 25

dakika sonunda bulanıklık sabitlenmektedir. En hızlı çökme ve en iyi bulanıklık sonucu  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ile sağlanırken, bunu sırasıyla  $\text{PACl}$ ,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  takip etmektedir. Bu sonucu Şekil 4.2 için yapılan yorum desteklemektedir.

#### 4.2.4. Karıştırma hızının koagülasyona etkisi

Karıştırma hızının koagülasyona etkisini belirleyebilmek amacıyla, her bir koagülant için optimum dozajlarda, süspansiyonun doğal pH' ında (7,5), farklı karıştırma hızlarında (200, 150, 120, 90, 60, 45 dev/dk) deneyler yapılarak karıştırma hızının koagülasyona etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.6'da sunulmuştur.



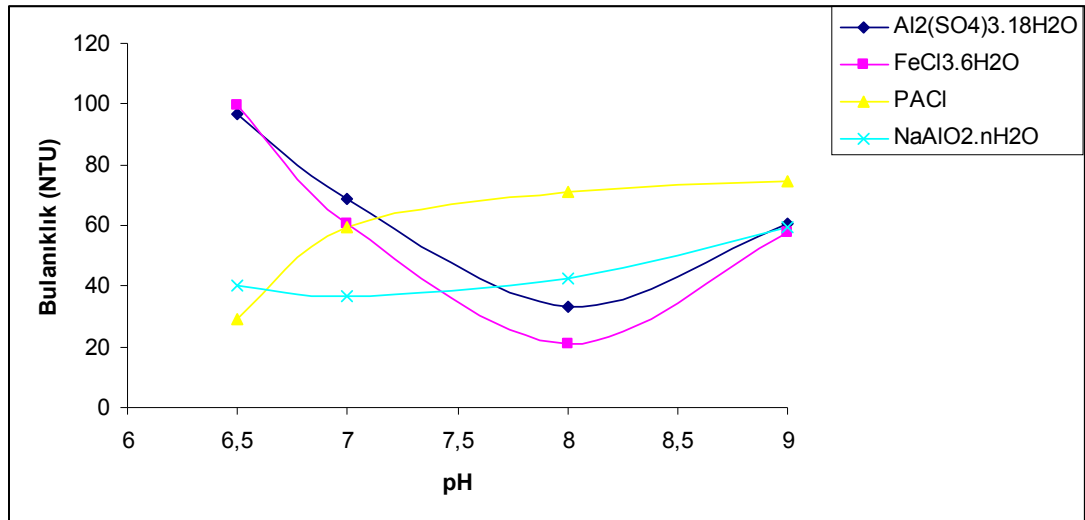
Şekil 4.6. Karıştırma hızının koagülasyona etkisi (Çizelge Ek 21)

Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, karıştırma hızı arttıkça bulanıklık  $\text{PACl}$  ve  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 'da 150 dev/dk'da yaklaşık sabitlenirken  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'de düşmeye devam etmektedir. Koagülantlar en düşük bulanıklık

sonucunu 200 dev/dk' da vermişlerdir. Optimum karıştırma hızından daha az bir karıştırma sonucu elde edilen salkımların daha küçük boyutlu olması koagülasyon verimini düşürmektedir. Optimum karıştırma hızından daha fazla bir karıştırma hızının uygulanması ile ortaya çıkan güçlü kesme kuvvetleri ise salkımlar üzerinde olumsuz etki yapmakta ve salkımların parçalanıp dağılmasına neden olmaktadır. Parçalanmış bu salkımların ise yeniden bir araya getirilmesi zor olmaktadır. Bu sebeple, salkımlar üzerinde olumsuz etki yapmayacak optimum bir karıştırma hızının uygulanması gerekmektedir (Cengiz vd, 2004).

#### 4.2.5. pH'ın koagülasyona etkisi

Çalışılan tüm koagülantlar için doğal pH'ta, belirlenen optimum şartlarda, pH'ın koagülasyona etkilerini belirleyebilmek amacıyla farklı pH'larda (6,5, 7, 8, 9) koagülasyon deneyleri yapılarak, elde edilen sonuçlar Şekil 4.7'de sunulmuştur.



**Şekil 4.7.** Traverten süspansiyonunun optimum şartlarda her bir koagülant için uygun pH'ın belirlenmesi (Çizelge Ek 9)

Şekil 4.7’de görüldüğü üzere,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  pH 8’de, PACl pH 6,5’te,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  pH 7’de en iyi bulanıklık sonucunu vermektedir. pH arttıkça bulanıklıkta artmıştır.  $\text{Al}(\text{OH})_3$  için  $\text{pH}_{\text{Hep}} = \text{pH } 8.8 - 9.3$ ;  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  için ise  $\text{pH}_{\text{Hep}} = \text{pH } 7.9 - 8.2$  olduğu bilinmektedir. Bu pH değerlerinin üzerinde (-) yüklü traverten ile elektrostatik etkileşim zayıflamakta ve dolayısıyla taneler arasındaki birleşme ihtimali azalmaktadır. Söz konusu koagülantlar ile traverten süspansiyonunun koagülasyonunda belirlenen optimum pH değerlerinde yük nötralizasyonunun yanı sıra, oluşan çökeleklerden kaynaklanan süpürme mekanizmasında etkin olduğu düşünülmektedir.

PACl’de pH’ın azalmasıyla birlikte koagülasyon veriminin arttığı gözlenmektedir. PACl için pH 6,5’da hem yük nötralizasyonun, hem de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  çökeleğini oluşması sırasında meydana gelen süpürme yönteminin bir arada etkin olmasından dolayı en iyi bulanıklık sonucu sağlanmıştır. pH 7, 8 ve 9’da ki koagülasyonlarda ise daha çok süpürme yönteminin egemen olduğu ve yük nötralizasyonunun etkisinin olduğu söylenebilir.

Yüksek performanslı koagülantlar arasında bulunan Sodyum Alüminat alkali bir koagülant olmasından dolayı en önemli avantajlarından biri de pH ayarlamasının önemli olduğu durumlarda kireç gibi alkalilerin görevini yapabilmesidir. Bu nedenle ortam pH’ının çalışılan pH aralığı için sodyum alüminat ile gerçekleştirilen koagülasyon deneylerinde verim üzerine belirgin bir etkisi gözlenmemiştir.

### 4.3. Flokülasyon Deneyleri

Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda ilk olarak flokülant türü ve dozajının etkisini görmek amacıyla, çeşitli flokülantlar varlığında süspansiyonun doğal pH'ında (7,5), bir dizi çökelme testleri yapılmıştır. Bu testlerde flokülant olarak % 40 YMA ve % 30 OMA anyonik flokülant, % 40 YMA katyonik flokülant ve noniyonik flokülant kullanılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

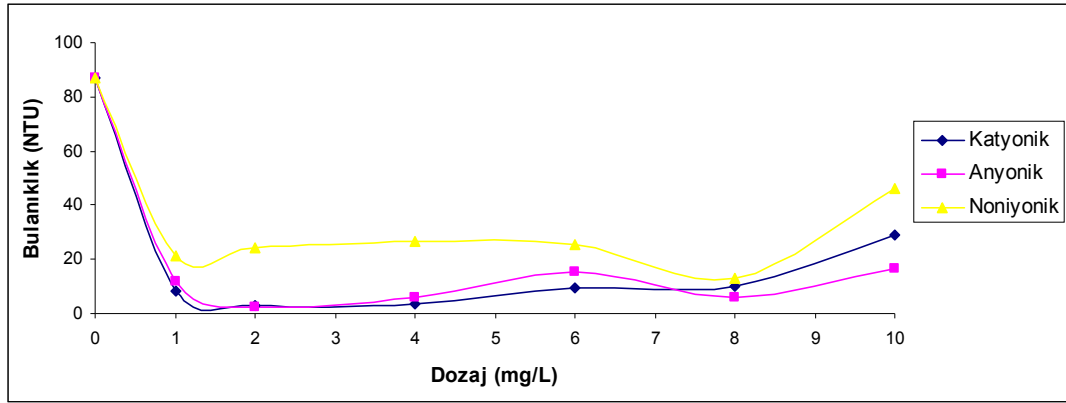
Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonuna flokülant türü ve dozajı, karıştırma süresi/hızı, çökelme süresi ve ortam pH'ının, etkileri çalışılan deneysel parametrelerdir.

#### 4.3.1. Flokülant türünün ve dozajının flokülasyona etkisi (anyonik, katyonik, noniyonik)

Flokülant türü ve dozajının flokülasyona etkisini belirleyebilmek amacıyla her bir flokülant için doğal pH'ta (7,5), farklı dozajlarda, 200 dev/dk karıştırma hızında 2 dakika karıştırma yapılarak süspansiyon 30 dakika çökelmeye tabi tutulmuş;

- 30 dakika boyunca zamana karşı ara yüzey yüksekliği değişimi
- 30 dakika sonunda bulanıklık ölçümü yapılmıştır.

Böylece her bir flokülant için traverten süspansiyonunun en düşük bulanıklık sonucunu veren optimum dozajlar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te sunulmuştur.

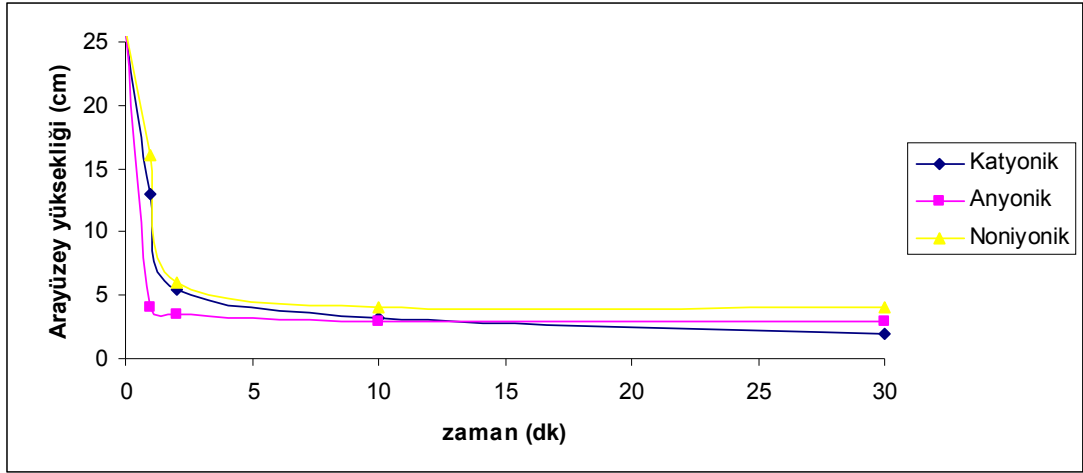


**Şekil 4.8.** Traverten süspansiyonunun flokülantlar varlığında optimum dozajlarının belirlenmesi (Çizelge Ek 3)

Traverten süspansiyonunun başlangıç bulanıklığı 87 NTU olup, tüm çalışılan koagülantlar için optimum dozaj ve bu dozajlarda ulaşılan bulanıklık değerleri;

- Anyonik flokülant 2 mg/L dozajda 2,58 NTU
- Katyonik flokülant 2 mg/L dozajda 2,9 NTU
- Noniyonik flokülant 8 mg/L dozajda 12,9 NTU' dur.

Her bir flokülant için optimum dozajlarda traverten süspansiyonunun flokülasyon verimine bakılırsa, en iyi performansı % 97 flokülasyon verimiyle anyonik flokülant ile sağlanırken, daha sonra sırasıyla % 96 verimle katyonik flokülant, % 85 verimle noniyonik flokülant ile sağlanmıştır. Şekil 4.8'e göre flokülantlar belli bir dozaja kadar traverten süspansiyonunun bulanıklığını azaltırken, daha sonra dozajın artmasıyla bulanıklığın arttığı görülmüştür. Belli bir dozajdan sonra bulanıklığın artmasındaki en önemli faktör aşırı dozajda flokların yeniden disperse olmasıdır (Ersoy, 2003). Flokülasyonda optimum dozaj, maksimum çökeltme hızı elde etmek için süspansiyona verilmesi gereken polimer miktarıdır ve genellikle katının yüzey alanının yarısını kaplayacak miktardaki dozajı ifade eder. Ortama optimum dozajdan daha fazla miktarda flokülant verilirse taneler arasında köprü oluşumu engellenir. Optimum dozajdan daha düşük miktarda flokülant verilmesi flokülasyon işlemini olumsuz etkilemektedir (Sabah, 2004).



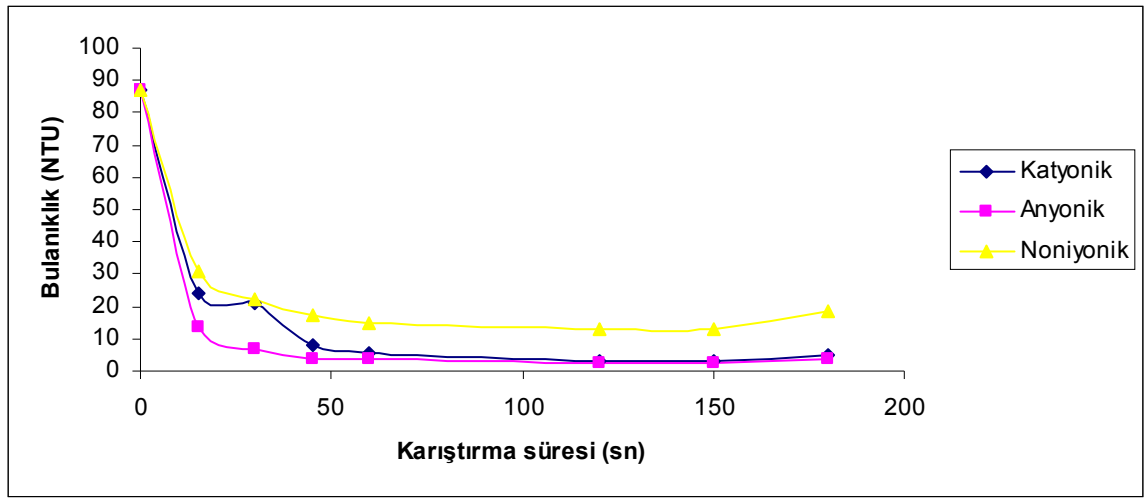
**Şekil 4.9.** Traverten süspansiyonunun her bir flokülant için zamana bağlı ara yüzey çökme grafiği (Çizelge Ek 7)

Çalışılan tüm flokülantlar için optimum dozajlarda zamana bağlı ara yüzey yüksekliği değişimi Şekil 4.9'da grafiğe aktarılmıştır. Anyonik flokülant 900 mm/dk, katyonik flokülant 860 mm/dk, noniyonik flokülant 840 mm/dk çökme hızı sağlamıştır. Sonuçlar Şekil 4.8. ile uyum içerisindedir. En hızlı çökme en iyi bulanıklık sonucunu veren flokülant anyonik flokülant ile sağlanmıştır. Daha sonra sırasıyla katyonik ve noniyonik flokülant anyonik flokülantı takip etmektedir. Flokülantların çökme eğrileri optimum dozajlarda birbirlerine benzemektedir.

Anyonik flokülantın diğer flokülantlara göre daha iyi performansının olmasında polimer köprü mekanizmasının rolü vardır. Katyonik polimer ile flokülasyonun daha çok elektrostatik yük yamama yöntemiyle gerçekleştiği söylenebilir. Bu mekanizmanın polimer köprü teşekkülü mekanizmasına göre flokülasyon üzerindeki etkisi nisbeten daha azdır. Bu sebeple katyonik flokülantın flokülasyon performansı anyonik flokülanta göre daha düşük yani flokların çökme hızı düşüktür. Noniyonik flokülantta ise bulanıklığın daha fazla olmasının nedeni noniyonik formdaki polimer zincirin yapısından kaynaklanmaktadır. Noniyonik flokülantın yumaklaşmış kıvrımlı yapısı taneler arasında köprü oluşumunu zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla flokülasyon olumsuz etkilenmektedir. Bu sonucu literatürde yapılmış çalışmalar desteklemektedir (Cengiz vd, 2004)

#### 4.3.2. Karıştırma süresinin flokülasyona etkisi

Karıştırma süresinin flokülasyona etkilerini belirleyebilmek amacıyla, her bir flokülant için belirlenen optimum dozajlarda, süspansiyonun doğal pH'ında (7,5), 200 dev/dk karıştırma hızında, farklı karıştırma sürelerinde ( 30, 60, 90, 120, 150 sn) flokülasyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulanıklık verileri Şekil 4.16.'da sunulmuştur.



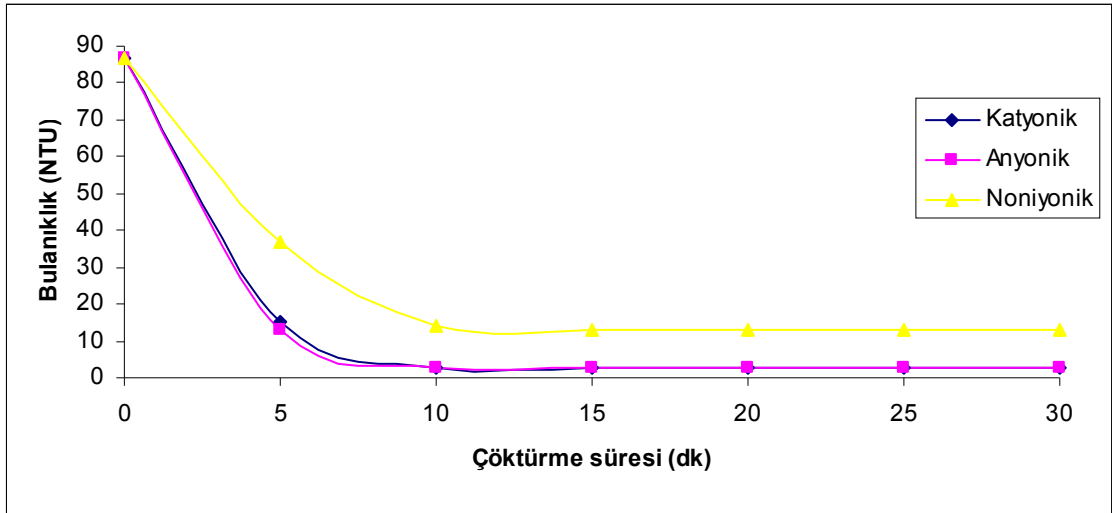
Şekil 4.10. Karıştırma süresinin etkisi (Çizelge Ek 14)

Şekil 4.10'a göre, katyonik flokülant ve anyonik flokülant için optimum süre 60 sn, noniyonik flokülant için 90 sn olarak belirlenmiştir. Karıştırma süresi arttıkça bulanıklık azalmıştır. Ancak belli bir değerden sonra artmaya başlamıştır. Optimum süreden daha uzun süre karıştırma yapıldığında, flokülantlar tane yüzeyinde artmakta ve dolayısıyla sterik engel nedeniyle flokların duraylılığı bozularak bulanıklık artmaya başlamaktadır. Optimum sürelerde yüksek çökme hızları elde edilmiş, ancak ara yüzey yüksekliği ölçümlerine göre anyonik flokülant ile partiküller daha kısa sürede çökerken aynı zamanda noniyonik flokülanta göre daha düşük bulanıklık değerleri elde edilmiş ve katyonik flokülant ise anyonik flokülanta yakın bulanıklık sonuçları vermiştir. Bu durum anyonik flokülantın partiküllerle etkileşiminin daha

hızlı gerçekleştiğini ve polimer moleküllerinin daha kısa zamanda partikül üzerine adsorplandığını göstermektedir.

#### 4.3.3. Çökelme süresinin flokülasyona etkisi

Çökelme süresinin flokülasyona etkisini belirleyebilmek için, her bir flokülant için belirlenen optimum dozajlarda ve karıştırma sürelerinde, süspansiyonun doğal pH'ında (7,5), 200 dev/dk'da optimum karıştırma hızlarında karıştırma yapılmış, farklı çökelme sürelerinde (5, 10, 15, 20, 25, 30 dakika) çökelme yapılarak en düşük bulanıklık sonucunu veren optimum çökelme süresi belirlenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 4.11'de sunulmuştur.



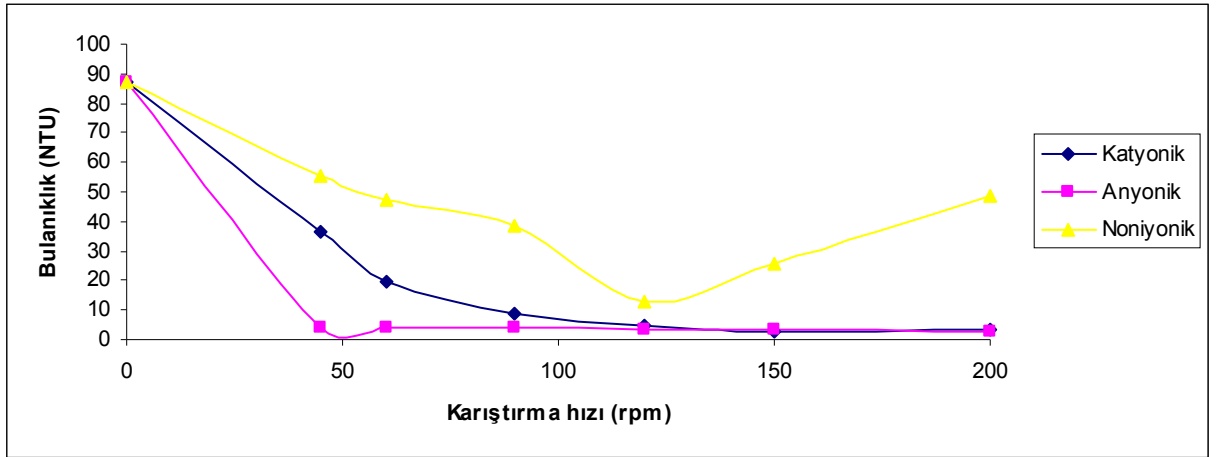
Şekil 4.11. Çökelme süresinin etkisi (Çizelge Ek 18)

Şekil 4.11'e göre, optimum çökelme süresi anyonik, katyonik, noniyonik flokülant için 10 dakika olarak bulunmuştur. Grafığe göre, çökelme süresine bağlı olarak bulanıklık eğrilerinin sergilediği eğilim her üç flokülant tipi için benzerlik göstermektedir. Ancak noniyonik flokülant yumaklaşmış kıvrımlı yapısından dolayı

anyonik ve katyonik flokülanta göre daha düşük bulanıklık sağlamıştır. Optimum çökelme süresinden sonra bulanıklık sabit kalmıştır. Yani süspansiyonun kararlılığı sağlanmıştır.

#### 4.3.4. Karıştırma hızının flokülasyona etkisi

Karıştırma hızının flokülasyona etkisini belirleyebilmek amacıyla, süspansiyonun doğal pH' ında (7,5), her bir flokülant için optimum dozajlarda farklı karıştırma hızlarında (200, 150, 120, 90, 60, 45 dev/dk) deneyler yapılarak karıştırma hızının flokülasyona etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.12'de sunulmuştur.



Şekil 4.12. Karıştırma hızının etkisi (Çizelge Ek 22)

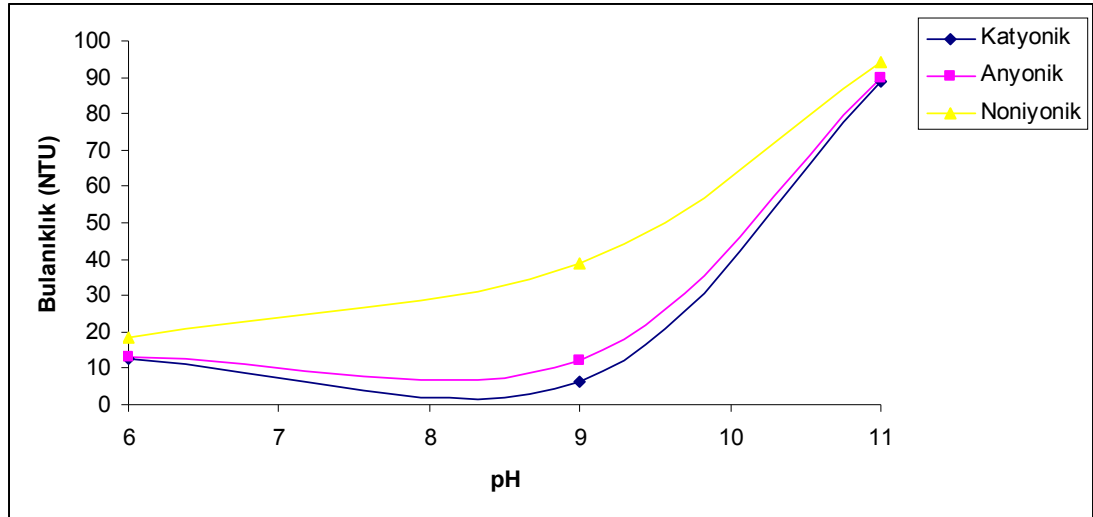
Şekil 4.12'ye göre her bir flokülant için optimum karıştırma hızı anyonik flokülant için 45 dev/dk, katyonik flokülant için 120 dev/dk, noniyonik flokülant için 120 dev/dk olarak belirlenmiştir.

Noniyonik flokülant kıvrımlı yapısından dolayı belli bir karıştırma hızına kadar partiküllerle etkileşim göstermekte, karıştırma hızının artışına bağlı kesme kuvvetleri nedeniyle flokların yapısı bozulmakta ve çökelme şartları bundan olumsuz

etkilenecek bulanıklık artmaktadır. Optimum karıştırma hızından daha fazla hızlarda süspansiyonun bulanıklığı artmaktadır. Bu sonuç literatürde yapılan çalışmalarla desteklenmektedir (Hogg, 2000). Karıştırma şiddetinin etkisinin belirlenmesine düşük karıştırma hızları ile başlanılmasının nedeni; daha karıştırma işlemi sırasında katının yerçekimi kuvveti etkisi ile çökelme eğilimi göstermesidir. Nitekim anyonik flokülant ile çalışıldığında düşük karıştırma hızlarında etkin bulanıklık giderimi gözlenmiştir. Bu durum anyonik flokülantın diğer flokülantlara göre tane ile etkileşimin daha hızlı olmasından kaynaklanmaktadır (Cengiz vd, 2004)

#### 4.3.5. pH'ın flokülasyona etkisi

Çalışılan tüm flokülantlar için doğal pH'ta (7,5), flokülantlar için belirlenen optimum şartlarda, traverten flokülasyonuna pH'ın etkilerini belirleyebilmek amacıyla farklı pH'larda (6, 9, 11) flokülasyon deneyleri yapılarak, elde edilen sonuçlar Şekil 4.13'te sunulmuştur.

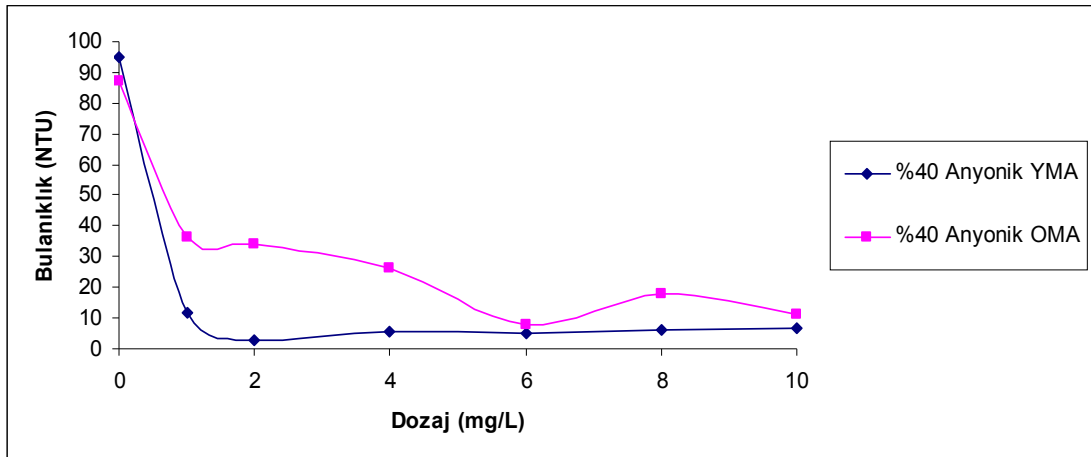


**Şekil 4.13.** Traverten süspansiyonunun optimum şartlarda her bir flokülant tipi için uygun pH'ın belirlenmesi (Çizelge Ek-11)

Şekil 4.13'e göre; optimum dozajlarda katyonik flokülant süspansiyon bulanıklığını pH 9'da 12,58 NTU'ya, anyonik flokülant pH 9'da 12,26 NTU'ya, noniyonik flokülant pH 6'da 18,38 NTU'ya düşürmüştür. Süspansiyonun pH'nın artmasıyla bulanıklıkta artış olmuştur. Bunun nedeni; pH değeri arttıkça taneler birbirini daha çok iterek stabil hale gelen bir süspansiyonda da askıda katı tanelerin çökmesi zorlaştığı için bulanıklık artmaktadır. Düşük pH'larda oluşan salkımlar genellikle küçük boyutlu ve sağlam bir yapıda olmalarına karşın, yüksek pH değerlerinde büyük boyutlu ve gevşek – kırılğan bir yapı özelliği göstermektedirler.

#### 4.3.6. Flokülant Mol Ağırlığının Flokülasyona Etkisi

Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda flokülant mol ağırlığının flokülasyona etkisini görmek amacıyla, optimum şartlarda % 40 yük yoğunluğunda yüksek ve orta molekül ağırlıklı anyonik flokülantlar kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.14'te sunulmuştur.

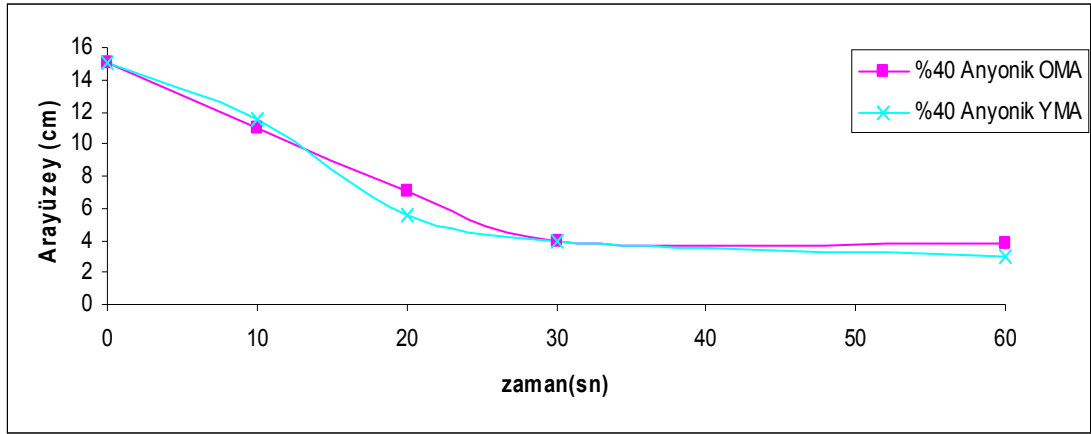


Şekil 4.14. Flokülant mol ağırlığının flokülasyona etkisi (Ek 3)

Yüksek molekül ağırlığına sahip anyonik flokülant orta molekül ağırlığına sahip flokülanta göre daha iyi performans göstermiştir. Traverten süspansiyonunun başlangıç bulanıklığı 87 NTU olup, tüm çalışılan flokülantlar için optimum dozaj ve bu dozajlarda ulaşılan bulanıklık değerleri;

- % 40 Anyonik YMA flokülant 2 mg/L dozajda 2,9 NTU
- % 40 Anyonik OMA flokülant 6 mg/L dozajda 8,06 NTU'dur.

Yüksek molekül ağırlığına sahip anyonik flokülant % 97 flokülasyon verimi, orta molekül ağırlığına sahip flokülant % 91 verim sağlamaktadır.



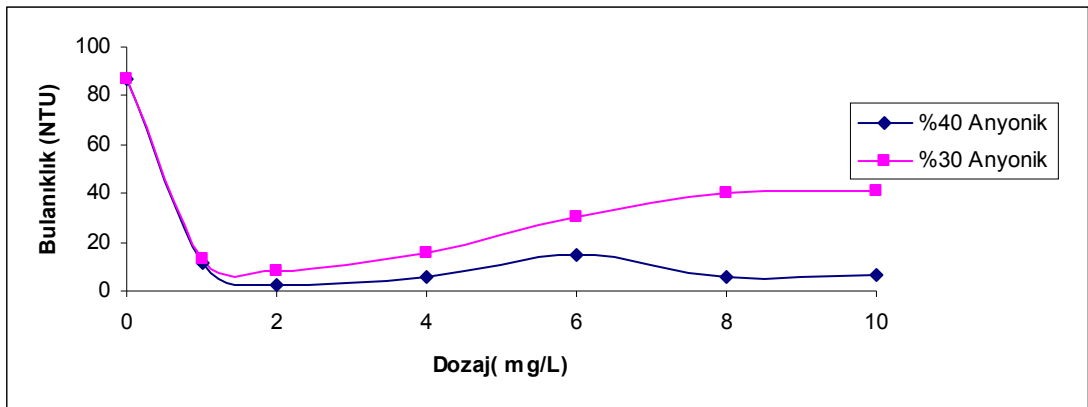
**Şekil 4.15.** Traverten tozu süspansiyonunun farklı molekül ağırlıklarında zamana bağlı ara yüzey yükseklikleri

Çalışılan flokülantlar için optimum dozajlarda farklı molekül ağırlıklarında zamana bağlı ara yüzey yüksekliği değişimi Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Şekil 4.15’e göre; % 40 Anyonik YMA flokülant 900 mm/dk, % 40 Anyonik OMA flokülant 600 mm/dk çökelme hızı sağlamaktadır. Yüksek molekül ağırlıklı flokülant, polimer zincir uzunluğu fazla olmasından dolayı daha büyük boyutlu fakat daha poroz yapıda flokların oluşmasını sağlarken, düşük molekül ağırlıklı flokülant nispeten daha küçük boyutlu fakat daha sağlam floklar oluşturmaktadır. Kullanılan flokülantın molekül ağırlığı arttıkça süspansiyon içindeki partiküller üzerine adsorplanan miktar artmakta ve salkımların meydana gelmesi hızlanmaktadır. Daha yüksek molekül ağırlıklı flokülantlar, aynı anda bir çok partikül yüzeyine adsorbe olarak üç boyutlu bir matris

meydana getirebilirler. Mol ağırlığının artması çökelme hızının artmasına neden olmaktadır (İpekoğlu, 1997). Şekil 4.21’de görüldüğü gibi yüksek molekül ağırlığa sahip anyonik flokülant daha iyi çökelme sonucu vermektedir. Flokülantların molekül ağırlıkları düştükçe floküle etme performansı da düşmektedir. Bundan dolayı çökelme hızı bakımından en düşük performansı molekül ağırlığı en düşük olan orta molekül ağırlıklı anyonik flokülant sağlamaktadır.

#### 4.3.7. Flokülant Yük Yoğunluğunun (Anyoniklik Derecesi) Etkisi

Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda flokülant yük yoğunluğunun etkisini görmek amacıyla doğal pH’ta (7,5), değişik anyoniklik derecesine sahip flokülantlarla yapılan testlerde elde edilen veriler Şekil 4.16’ da sunulmuştur.



**Şekil 4.16.** Traverten süspansiyonunun yük yoğunluğu farklı flokülantlar varlığında optimum dozajlarının belirlenmesi

Şekil 4.16’da % 30 ve %40 yük yoğunluğuna sahip anyonik flokülantların dozaja bağlı bulanıklık eğrileri verilmiştir. %40 yük yoğunluğuna sahip anyonik flokülant % 30 yük yoğunluğuna sahip anyonik flokülanta göre daha iyi performans

göstermiştir. Traverten süspansiyonunun başlangıç bulanıklığı 87 NTU olup, çalışılan flokülantlar için optimum dozaj ve bu dozajlarda ulaşılan bulanıklık değerleri;

- % 40 anyoniklik derecesine sahip flokülant 2 mg/L dozajda 2,58 NTU
- % 30 anyoniklik derecesine sahip flokülant 2 mg/L dozajda 8,06 NTU ‘dur.

Yüksek anyoniklik derecesine sahip flokülant % 97 flokülasyon verimi, düşük anyoniklik derecesine sahip flokülant % 90 flokülasyon verimi sağlamaktadır.

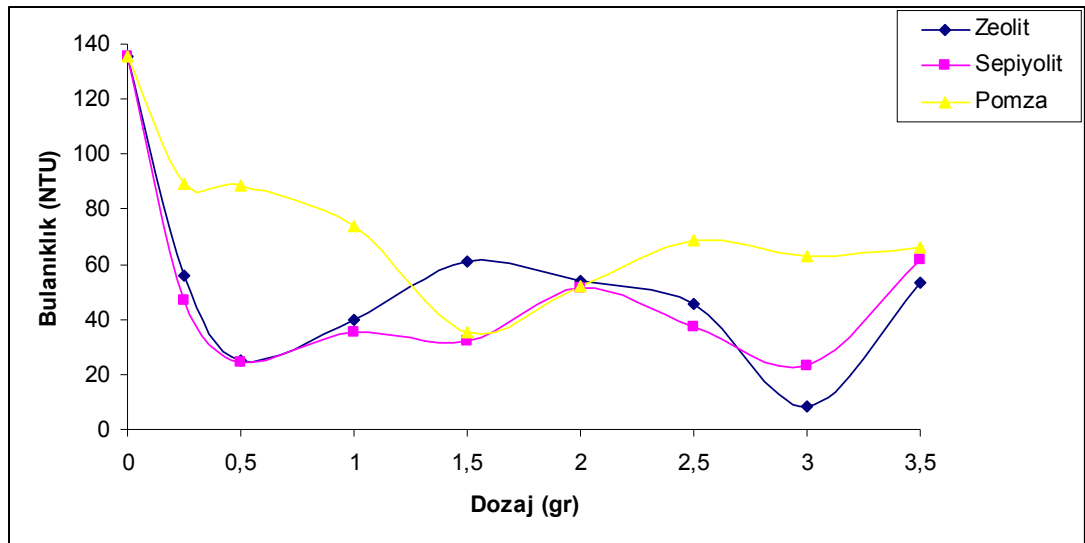
Düşük anyoniklik derecesine sahip flokülantların floküle etme gücünde düşüktür fakat bazen de çok yüksek şarj derecesine sahip flokülantların floküle etme gücü düşük olmaktadır (Alptekin, 2006). İyonik flokülantlar için sahip oldukları anyoniklik veya katyoniklik dereceleri yani yük yoğunlukları dolaylı olarak flokülantların aktivasyonunda önemli rol oynamaktadır.

#### 4.4. Doğal minerallerle sedimentasyon deneyleri

Deneysel çalışmalarda koagülantlara alternatif olarak zeolit, sepiyolit, pomza kullanılmış olup bu minerallerin sedimentasyona etkisini görmek amacıyla yapılan deneylere ait veriler aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Mineral türü ve dozajı, karıştırma süresi/hızı, çökeltme süresi ve ortam pH'nın, traverten tozu süspansiyonunun sedimentasyonuna etkileri çalışılan deneysel parametrelerdir.

##### 4.4.1. Mineral türü ve dozajının etkisi

Mineral türü ve dozajının sedimentasyona etkisini belirleyebilmek amacıyla her bir mineral için doğal pH'ta (7,5), farklı dozajlarda 200 dev/dk karıştırma hızında 2 dakika karıştırma yapılarak süspansiyon çökelmeye tabi tutulmuş, 30 dakika boyunca zamana karşı ara yüzey yüksekliği değişimi gözlenerek, 30 dakika sonunda bulanıklık ölçümü yapılmıştır. Böylece her bir mineral için traverten süspansiyonunun en düşük bulanıklık sonucunu veren optimum dozajlar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.17'de sunulmuştur.

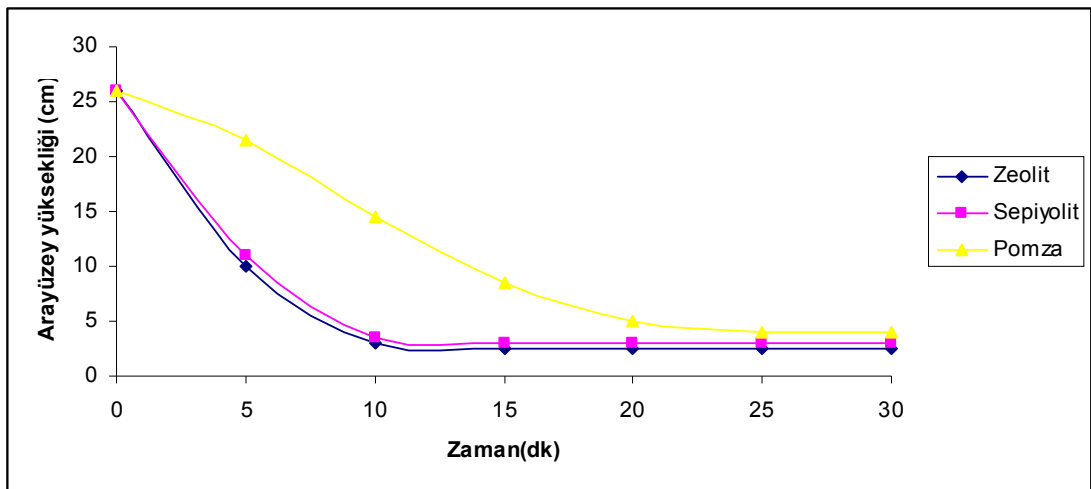


**Şekil 4.17.** Traverten süspansiyonunun kil varlığında optimum dozajlarının belirlenmesi ve bulanıklık giderimi (Çizelge Ek 2)

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, en düşük bulanıklık değerine zeolit, daha sonra sırasıyla sepiyolit ve pomza ile ulaşılmıştır. Traverten süspansiyonunun başlangıç bulanıklığı 135,48 NTU olup, tüm çalışılan mineraller için optimum dozaj ve bu dozajlarda ulaşılan bulanıklık değerleri;

- Zeolit 3 gr/500ml dozajda 8,06 NTU
- Sepiyolit 3 gr/500ml dozajda 23,23 NTU
- Pomza 1,5 gr/500ml dozajda 35,48 NTU’dur.

Her bir mineral için optimum dozajlarda traverten süspansiyonunun sedimentasyon verimine bakılırsa, en iyi performans % 94 verimle zeolit ile sağlanırken, daha sonra sırasıyla % 82 verimle sepiyolit, % 73 verimle pomza ile sağlanmıştır. Zeolitin sedimentasyon veriminin yüksek olmasının nedeninin, zeolitin yoğunluğunun fazla olmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Kullanılan katının (zeolit) yoğunluğunun artması yerçekimini arttırdığından daha hızlı ve etkili çökeltme gerçekleşmiş olabilir. Katı oranı arttıkça tanelerin çarpışma ihtimali artar. Bu nedenle daha kolaylıkla ve süratle sedimentasyon meydana gelmesi doğaldır (İpekoğlu, 1997). Traverten süspansiyonu içine dozajlanan mineraller ile süpürme mekanizması artmaktadır. Zeolitin ve sepiyolit pomzadan su emme kabiliyetleri daha fazladır. Pomza % 36 - 65, zeolit % 80 - 135, sepiyolit % 200 su emme kabiliyetine sahiptir. Bu durum süpürme mekanizması ile ilişkilendirilebilir.

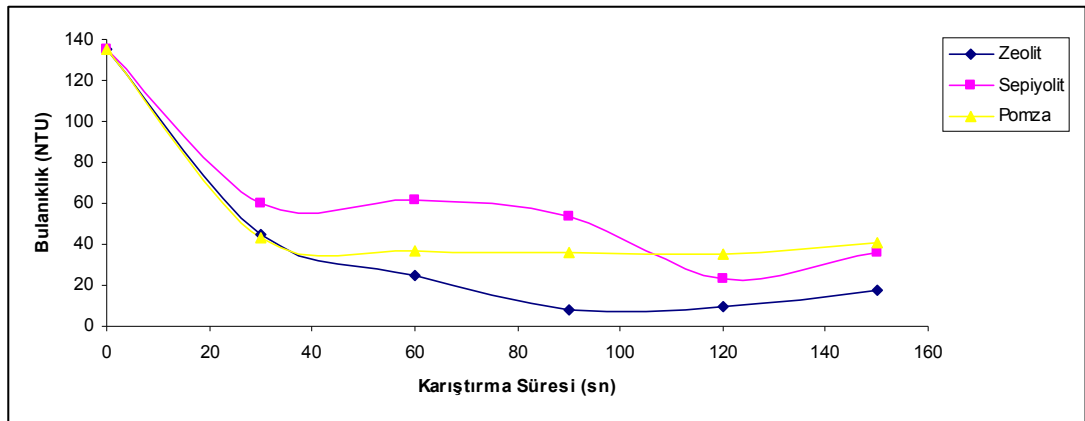


Şekil 4.18. Traverten süspansiyonunun her bir mineral için zamana bağlı ara yüzey çökeltme grafiği (Çizelge Ek 6)

Çalışılan tüm mineraller için optimum dozajlarda zamana bağlı ara yüzey yüksekliği değişimi Şekil 4.18’de grafiğe aktarılmıştır. En iyi performansı gösteren kil minerali zeolit olup daha sonra sırasıyla sepiyolit ve pomza takip etmektedir. Bu durum Şekil 4.17’de yapılan yorumu desteklemektedir. Zeolit 730 mm/dk , sepiyolit 710 mm/dk, pomza 420 mm/dk çökeltme hızı sağlamıştır. Görüldüğü üzere pomzanın çökeltme hızı zeolit ve sepiyolite göre daha azdır. Çünkü pomzanın yoğunluğu zeolit ve sepiyolite göre daha azdır.

#### 4.4.2. Karıştırma süresinin doğal minerallerle sedimantasyona etkisi

Karıştırma süresinin sedimantasyona etkilerini belirleyebilmek amacıyla, her bir mineral için belirlenen optimum dozajlarda, süspansiyonun doğal pH’ında, 200 dev/dk karıştırma hızında, farklı karıştırma sürelerinde ( 30, 60, 90, 120, 150 sn) sedimantasyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve 30 dakika çökeltme sonunda elde edilen bulanıklık verileri Şekil 4.19’da grafikte sunulmuştur.



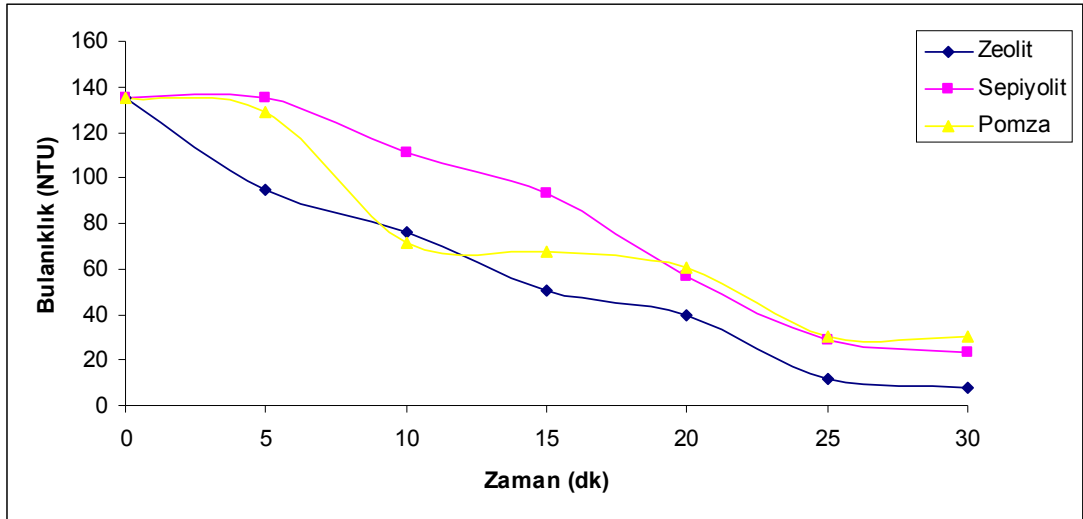
Şekil 4.19. Karıştırma süresinin etkisi (Çizelge Ek 13)

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi, optimum karıştırma süresi zeolit için 90 sn, sepiyolit için 120 sn, pomza için 30 sn olarak bulunmuştur. Karıştırma süresi arttıkça

bulanıklık azalmış ve belli bir süreden sonra bulanıklık artmaya başlamıştır. Karıştırma süreleri minerale göre farklılık göstermekte ama performansla birlikte düşünüldüğünde, karıştırma süresinin az veya çok olması bulanıklık sonucunu değiştirmemektedir.

#### 4.4.3. Çökelme süresinin doğal minerallerle sedimantasyona etkisi

Çökelme süresinin sedimantasyona etkisini belirleyebilmek için, her bir mineral için belirlenen optimum dozajlarda ve karıştırma sürelerinde, süspansiyonun doğal pH'ında (7,5), 200 dev/dk'da optimum karıştırma hızlarında karıştırma yapılmış, farklı çökelme sürelerinde (5, 10, 15, 20, 25, 30 dk) çökelme yapılarak en düşük bulanıklık sonucunu veren optimum çökelme süresi belirlenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 4.20'de sunulmuştur.



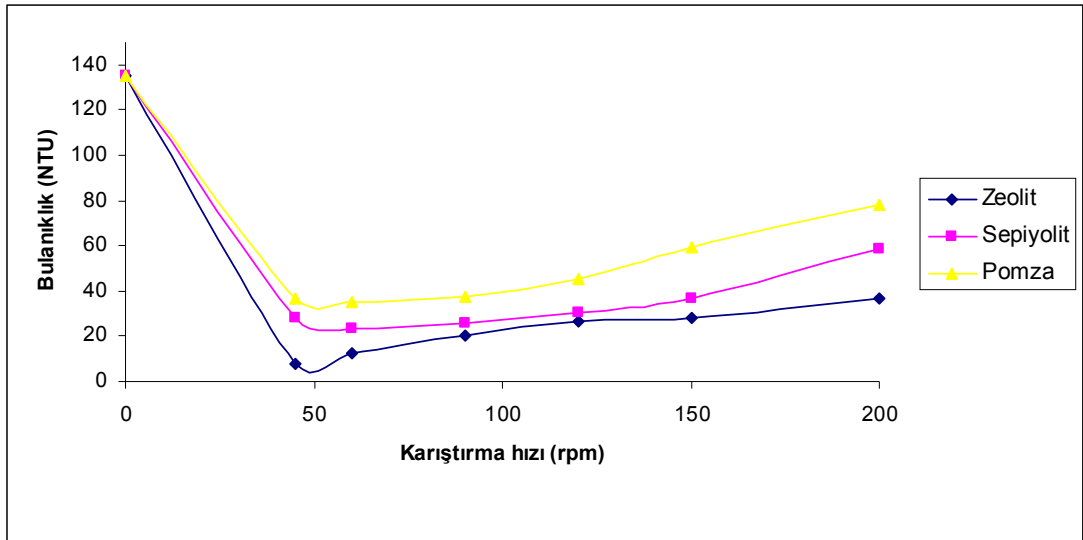
Şekil 4.20. Çökelme süresinin etkisi (Çizelge Ek 17)

Şekil 4.20'ye göre, zeolit, sepiyolit, pomza için optimum çökelme süresi 25 dakika olarak bulunmuştur. En iyi performansı sırasıyla zeolit, sepiyolit ve pomza

vermektedir. Çökelme süresi arttıkça traverten süspansiyonunun bulanıklığı da azalmaktadır. Belli bir süreden sonra bulanıklık yaklaşık sabitlenmektedir. Sepiyolit pomzadan daha hızlı çökelmeye neden olmaktadır.

#### 4.4.4. Karıştırma hızının doğal minerallerle sedimantasyona etkisi

Karıştırma hızının sedimantasyona etkisini belirleyebilmek amacıyla, her bir mineral için optimum dozajlarda, süspansiyonun doğal pH' ında (7,5), farklı karıştırma hızlarında (200, 150, 120, 90, 60, 45 dev/dk) deneyler yapılarak karıştırma hızının sedimantasyona etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.21'de sunulmuştur.



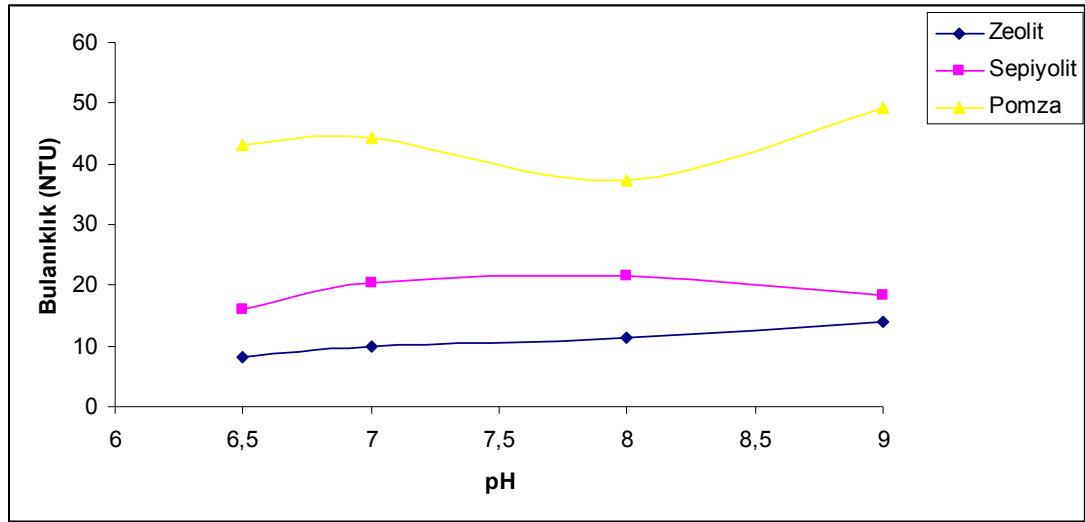
Şekil 4.21. Karıştırma hızının etkisi (Çizelge Ek 21)

Mineraller ile çalışıldığında kimyasal koagülantların aksine düşük karıştırma hızlarında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4.21'e göre; karıştırma hızı arttıkça süspansiyonun bulanıklığı da artmıştır. Zeolit için 90 sn optimum karıştırma süresinde en yüksek verimin % 94 olarak elde edildiği 45 dev/dk, sepiyolit için 120

sn optimum karıştırma süresinde en yüksek verimin % 82 olarak elde edildiği 60 dev/dk, pomza için ise 30 sn optimum karıştırma süresinde en yüksek verimin % 73 olarak elde edildiği 60 dev/dk optimum karıştırma hızı olarak belirlenmiştir.

#### 4.4.5. pH'ın doğal minerallerle sedimantasyona etkisi

Çalışılan tüm mineraller için doğal pH'ta (7,5), mineraller için belirlenen optimum şartlarda, pH'ın sedimantasyona etkilerini belirleyebilmek amacıyla farklı pH'lar da (6,5, 7, 8, 9) deneyler yapılarak, elde edilen sonuçlar Şekil 4.22'de sunulmuştur.



**Şekil 4.22.** Traverten süspansiyonun optimum şartlarda her bir mineral türü için uygun pH'ın belirlenmesi (Çizelge Ek 10)

Şekil 4.22'ye göre; her üç mineral için de pH'ın minerallerle traverten süspansiyonunun sedimantasyonu üzerine belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Ancak bulanıklık değerleri dikkate alındığında en uygun pH değeri doğal pH olarak kabul edilmiştir.

#### 4.5. Mermer Çamurunun Özelliklerinin Belirlenmesi

Kullanılan farklı koagülantlar, flokülantlar ve doğal mineraller ile optimum koşullarda elde edilen traverten çamurların yoğunlukları, askıda katı miktarı, katı madde içeriği ve çökme hızı değerleri hesaplanarak Tablo 4.1.'de sunulmuştur.

**Tablo 4.1.** Optimum koşullarda her bir kimyasal ve mineral için çamur özellikleri

| Kimyasal                                                            | Çamurun yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> ) | AKM ( mg/L) | Katı madde içeriği (%) | Vs (mm/dk) |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|------------------------|------------|
| Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .18H <sub>2</sub> O | 1,78                                    | 460.000     | 3.84                   | 420        |
| FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O                                | 0,78                                    | 170.000     | 5.02                   | 700        |
| NaAlO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O                               | 2,16                                    | 530.000     | 4,64                   | 600        |
| PACl                                                                | 2,16                                    | 350.000     | 4,64                   | 630        |
| Noniyonik                                                           | 2,64                                    | 920.000     | 2,89                   | 840        |
| Katyonik                                                            | 1,3                                     | 190.000     | 2,81                   | 860        |
| Anyonik                                                             | 1,89                                    | 190.000     | 4,08                   | 900        |
| Zeolit                                                              | 1,58                                    | 430.000     | 3,44                   | 730        |
| Sepiyolit                                                           | 1,08                                    | 160.000     | 6,72                   | 710        |
| Pomza                                                               | 0,34                                    | 60.000      | 3,77                   | 420        |

Tablo 4.1.'e göre koagülantlar arasında en yüksek çökme hızı ve katı madde içeriği FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O ile sağlanmaktadır. Buna karşılık FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O ile oluşan mermer çamurunun yoğunluğu diğer koagülantlarla elde edilen mermer çamurlarının yoğunluğundan daha düşüktür.

Flokülantlar arasında en yüksek çökme hızı ve en yüksek katı madde içeriği anyonik flokülant ile sağlanmıştır.

Mineraller arasında en yüksek çökelme hızı ve en yüksek çamur yoğunluğu zeolit ile elde edilirken, katı madde içeriği açısından zeolit, sepiyolit ve pomzaya göre daha düşük katı içerikli traverten çamuru oluşturmuştur.

Görüldüğü gibi, flokülantlar ile elde edilen çökelme hızları, koagülant ve doğal mineraller ile elde edilenlere göre daha fazladır. Çamurda AKM değerleri incelendiğinde yine doğal mineraller içerisinde en iyi sonucu veren zeolitin AKM değerinin flokülantlar içerisinde en iyi sonucu veren anyonik flokülant ve koagülantlar içerisinde en iyi sonucu veren  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'den daha yüksek AKM değeri verdiği gözlenmektedir. Çamurda askıda katı madde miktarının az olması sıvıda askıda kalan katı madde miktarının fazla olması anlamına gelmektedir. Bu durumda zeolit tesise geri gönderilen suyun temizliği bazında düşünüldüğünde en az katı madde içeren suyu vermektedir.

## 5. TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar sonucunda traverten süspansiyonunun flokülasyon ve koagülasyonuna koagülant, flokülant türü ve dozajı, karıştırma süresi ve hızı, çökme süresi ve ortam pH'nın etkileri incelenmiştir. Ayrıca kullanılan farklı koagülant/flokülantlar ve mineraller ile oluşan traverten çamurlarının özellikleri belirlenmiştir.

Sedimentasyon deneyinde traverten tozu süspansiyonuna herhangi bir kimyasal ilave edilmeden kendi kendine çöktürülmesi sonucunda ara yüzey yüksekliğinin, 72 saat sonra sabitlendiği gözlenmiştir.

Koagülasyon deneylerinde  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , PACl ile çalışılmıştır. Kogülasyonda en iyi verimi sırasıyla,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , PACl,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  vermiştir. Çalışılan tüm koagülantlar için belirlenen optimum dozaj ve bu dozajlarda ulaşılan minumum bulanıklık değerleri, koagülasyon verimleri ve çökme hızları Tablo 5.1'de sunulmuştur. Tablodan da görülebileceği gibi en iyi sonucu  $\text{Cl}^-$  esaslı koagülantlar vermiştir. Bu sonuç literatür de yapılan çalışmalarla da desteklenmektedir.

Tüm koagülantlar da belirli bir dozajdan sonra daha fazla koagülant ilavesi bulanıklığın artmasına sebep olmuştur. Ortama optimum dozajdan daha fazla koagülant ilavesi ile ortamda şarjın ters dönmesi ve sonrasında artan pozitif şarj nedeniyle koagülasyonu olumsuz etkilemektedir.

**Tablo 5.1.** Koagülasyonda kullanılan koagülantlar için optimum dozaj, bulanıklık, çökme hızları

| Koagülant                                               | Opt. Dozaj<br>(mg/L) | Bulanıklık,<br>(NTU) | Koagülasyon<br>verimi (%) | Çökme Hızı<br>(mm/dk) |
|---------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|
| $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ | 20                   | 34,35                | 73                        | 420                   |
| $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$               | 20                   | 18,38                | 86                        | 700                   |
| PACl                                                    | 10                   | 29,35                | 77                        | 630                   |
| $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$              | 300                  | 36,12                | 71                        | 600                   |

Deneysel çalışmalar sonucunda belirli bir karıştırma hızı/ süresine kadar düşen bulanıklık değerlerinin, süre/ hızın artmasıyla artmaya başladığı gözlenmiştir. Optimum karıştırma süresinden fazla karıştırma yapılması koagülantların tane yüzeyinde artmasına sebep olmakta ve bu durumda koagülasyonu olumsuz yönde etkilemektedir. Optimum karıştırma hızından fazla karıştırma hızı ise güçlü kesme kuvvetleri nedeniyle koagülasyon/ flokülasyonu yine olumsuz yönde etkilemektedir.

Koagülasyonda pH önemli bir parametredir. Traverten süspansiyonunun koagülasyonun da, çalışılan tüm koagülantlar için optimum pH değeri belirlenmiş ortam pH'nın alkali bir koagülant olan sodyum alüminat için koagülasyon verimi üzerine belirgin bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Koagülasyon da kullanılan tüm koagülantlar için belirlenen optimum koşullar Tablo 5.2'de sunulmuştur.

**Tablo 5.2.** Koagülasyonda kullanılan koagülantlar için optimum koşullar

| Koagülant                   | Opt. Dozaj<br>(mg/L) | Optimum<br>karıştırma<br>süresi (sn) | Optimum<br>çöktürme<br>süresi (dk) | Optimum<br>karıştırma<br>hızı(dev/dk) | pH  |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-----|
| $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ | 20                   | 90                                   | 25                                 | 200                                   | 8   |
| $FeCl_3 \cdot 6H_2O$        | 20                   | 120                                  | 25                                 | 200                                   | 8   |
| PACl                        | 10                   | 120                                  | 25                                 | 150                                   | 6,5 |
| $NaAlO_2 \cdot nH_2O$       | 300                  | 120                                  | 25                                 | 150                                   | 7   |

Flokülasyon deneylerinde anyonik, katyonik, noniyonik flokülantlar ile çalışılmıştır. Flokülasyonda en iyi verimi sırasıyla, anyonik flokülant, katyonik flokülant ve noniyonik flokülant vermiştir. Çalışılan tüm flokülantlar için belirlenen optimum dozaj ve bu dozajlarda ulaşılan minimum bulanıklık değerleri, flokülasyon verimleri ve çökelme hızları Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.3.** Flokülasyonda kullanılan flokülantların için optimum dozaj, bulanıklık, verim, çökelme hızları

| Flokülant | Opt. Dozaj<br>(mg/L) | Bulanıklık,<br>(NTU) | Verimi<br>(%) | Çökelme Hızı<br>(mm/dk) |
|-----------|----------------------|----------------------|---------------|-------------------------|
| Anyonik   | 2                    | 2,58                 | 97            | 900                     |
| Katyonik  | 2                    | 2,9                  | 96            | 860                     |
| Noniyonik | 8                    | 12,9                 | 85            | 840                     |

Anyonik flokülantın diğer flokülantlara göre daha iyi performansının olmasında polimer köprü mekanizmasının rolü vardır. Katyonik flokülantın negatif tane yüzeylerine adsorpsiyonu elektrostatik kökenlidir. Adsorpsiyonla beraber şarj nötralizasyonuna ilaveten köprüleme mekanizması da söz konusudur. Ancak molekül ağırlığı düşük olduğu için köprüleme dolayısıyla floküle etme kabiliyeti anyonik ve noniyoniklere göre düşüktür. Noniyonik flokülantın yumaklaşmış kıvrımlı yapısı nedeniyle taneler arası köprü oluşumu zorlaşmaktadır. Traverten tozu süspansiyonunun flokülasyonunda flokülant tipi ve dozajının, karıştırma süresi ve hızının, ortam pH'nın flokülasyona etkisi önemli rol oynamaktadır. Flokülasyon optimizasyon deney sonuçları Tablo 5.4'te sunulmuştur.

**Tablo 5.4.** Flokülasyonda kullanılan flokülantlar için optimum koşullar

| Flokülant | Opt. Dozaj<br>(mg/L) | Optimum<br>karıştırma<br>süresi (sn) | Optimum<br>çöktürme<br>süresi (dk) | Optimum<br>karıştırma<br>hızı(dev/dk) | pH |
|-----------|----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|----|
| Anyonik   | 2                    | 60                                   | 10                                 | 45                                    | 9  |
| Katyonik  | 2                    | 60                                   | 10                                 | 120                                   | 9  |
| Noniyonik | 8                    | 60                                   | 10                                 | 120                                   | 6  |

Flokülantın molekül ağırlığı arttıkça, flokülant daha çok partikül yüzeyine adsorbe olmakta buda flokülasyonu olumlu etkilemektedir. Mol ağırlığının artması çökelme hızının artmasına neden olmaktadır. Deneysel çalışmalarda flokülant molekül ağırlığının flokülasyona etkisi incelenmiş ve yüksek molekül ağırlığa sahip anyonik flokülant daha iyi çökelme sonucu vermiştir.

Flokülanın yük yoğunluğu flokülasyonun performansını etkiler. Flokülantın anyoniklik değeri arttıkça çökelme hızı artmakta ve floküle etme gücü de artmaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda, anyoniklik derecesi yüksek olan anyonik flokülant, anyoniklik derecesi düşük olan flokülanta göre daha iyi performans göstermiştir.

Kil mineralleri çarpışma olasılığını arttırarak sedimentasyon sağlamaları nedeniyle sedimentasyon işleminde kullanılabilir. Bu çalışmada zeolit, sepiyolit, pomza mineralleri kullanılmıştır. Çalışılan tüm mineraller için belirlenen optimum dozaj ve bu dozajlarda elde edilen minimum bulanıklık değerleri Tablo 5.5'te sunulmuştur.

**Tablo 5.5.** Sedimentasyonda kullanılan minerallerin optimum dozaj, bulanıklık, verim, çökelme hızları

| Mineral   | Opt.dozaj<br>(gr/500ml) | Bulanıklık<br>(NTU) | Verim<br>(%) | Çökelme Hızı<br>(mm/dk) |
|-----------|-------------------------|---------------------|--------------|-------------------------|
| Sepiyolit | 3                       | 23,23               | 82           | 710                     |
| Zeolit    | 3                       | 8,06                | 94           | 730                     |
| Pomza     | 1,5                     | 35,48               | 73           | 420                     |

Çalışılan deneysel parametrelerde koagülant ve flokülantlar için belirlenen genel bulgulardan farklı olarak, minerallerle sedimentasyonda düşük karıştırma hızlarında daha iyi verim elde edildiği gözlenmiştir. pH'ın minerallerle sedimentasyona belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Minerallerle gerçekleştirilen sedimentasyon deneyleri için optimum koşullar Tablo 5.6'da sunulmuştur.

**Tablo 5.6.** Sedimentasyonda kullanılan mineraller için optimum koşullar

| Mineral   | Opt.dozaj<br>(gr/500ml) | Optimum<br>karıştırma<br>süresi (sn) | Optimum<br>çöktürme<br>süresi (dk) | Optimum<br>karıştırma<br>hızı(dev/dk) | pH  |
|-----------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-----|
| Sepiyolit | 3                       | 120                                  | 25                                 | 60                                    | 7,5 |
| Zeolit    | 3                       | 90                                   | 25                                 | 45                                    | 7,5 |
| Pomza     | 1,5                     | 30                                   | 25                                 | 60                                    | 7,5 |

Kullanılan farklı koagülan/ flokülanlar ve doğal mineraller için belirlenen optimum koşullarda elde edilen traverten çamurlarının yoğunlukları, askıda katı madde, katı madde içeriği, çökelme hızları hesaplanarak tez içerisinde Tablo 4.1’de toplu halde sunulmuştur.

Tablo 4.1. incelendiğinde koagülanlar içerisinde en iyi çökelme hızını  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  verirken mineraller arasında zeolit, flokülanlar arasında ise anyonik flokülanın verdiği belirlenmiştir. Tüm flokülanlar kullanılan mineraller ve koagülanlara kıyasla çok yüksek çökelme hızına sahiptir. Buna karşılık mineraller kimyasal koagülanlar ile kıyaslandığında yakın değerler vermişlerdir.

## 5. SONUÇLAR

Traverten işleme tesisi atıksularındaki bulanıklığın fiziko-kimyasal yöntemlerle giderilmesi için yürütülen bu tez çalışmasında aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

Koagülasyon deneylerinde  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{PACl}$ ,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  ile çalışılmış ve koagülasyon da en iyi verimi sırasıyla  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{PACl}$  ve  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  vermiştir. Koagülasyon deneylerinde en yüksek koagülasyon verimini sağlayan koagülant % 86 koagülasyon verim, 18,38 NTU bulanıklık değeri ve 700 mm/dk çökme hızıyla  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  olmuştur. Çalışılan tüm koagülantlar için belirlenen optimum dozaj ve bu dozajlarda ulaşılan minimum bulanıklık değerleri ve koagülasyon verimleri incelendiğinde en iyi sonucu  $\text{Cl}^-$  esaslı koagülantlar vermiştir.

Flokülasyon deneylerinde anyonik, katyonik ve noniyonik flokülantlar ile çalışılmıştır. Flokülasyonda % 97 flokülasyon verimi, 2,58 NTU bulanıklık değeri ve 900 mm/dk çökme hızı ile en iyi performansı anyonik flokülant vermiştir.

Kil mineralleri çarpışma olasılığını arttırarak sedimantasyonu sağlamaları nedeniyle sedimantasyon işleminde kullanılabilir. Bu çalışmada alternatif olarak zeolit, sepiyolit, pomza mineralleri kullanılmıştır. Sedimantasyonda en iyi sonucu % 94 sedimantasyon verimi, 8,06 NTU bulanıklık değeri ve 730 mm/dk çökme hızı ile zeolit vermiştir.

Gerek elde edilen bulanıklık değerleri gerekse yüksek çökme hızına sahip olması nedeniyle flokülasyon işlemi traverten süspansiyonlarından bulanıklık giderimin de koagülantlara ve minerallere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak koagülantlar ve minerallerinde etkili bir giderim sağladığı söylenebilir. Traverten süspansiyonunun bulanıklık gideriminde koagülasyon+flokülasyon ile etkili bir giderim sağlamaktadır. Polimerler ile birlikte minerallerinde kullanımı ile daha etkili bir giderim sağlanılabileceği düşünülmektedir. Böylece hem maliyet açısından hem de çevre açısından daha olumlu sonuçlar elde edilebilecektir.

## KAYNAKLAR

- Akbulut, H., Güner, C., 2003. “Mermer ve Taş Ocaklarının Çevreye Olan Görsel Etkileri, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, AFYON, s 463-475
- Alptekin, A.M., Ersoy, B., Sarışık, A., Cengiz, İ., Gürcan, S., 2006. “PoliakrilamidEsaslı ve Farklı Mol Ağırlıklı Anyonik Polimerlerle Mermer Atıksularının Flokülasyonu”, Türkiye V. Mermer ve Doğal Taş Sempozyumu, s 439-445.
- Besra, L., Sengupta, D. K., Roy, S. K., 2006, Influence of unadsorbed and weakly adsorbed flocculants on separation properties of kaolin suspensions, International journal of mineral processing, 78, 101- 109
- Cengiz, İ., Sabah E., Erkan ,Z.E., 2004, ‘Geleneksel ve UMA Teknolojisinin Polimerlerin Flokülasyon Performansları Üzerine Bir Araştırma’, Madencilik Dergisi, Mart 2004, Madencilik Dergisi, Cilt 43, Sayı 1, s 15-20
- Chen, Y., Liu, S., Wang, G., 2007, A kinetic investigation of cationic starch adsorption and flocculation in kaolin suspension, Chemical Engineering Journal, 133, 325 - 333
- Davutluoğlu, C., 2008, “Termik Santral Bacagazı Arıtma Tesisi Kaynaklı Koagülasyon Çamurunda Florür Giderimi”, Kimya ABD Yüksek Lisans Tezi, ADANA, s 57
- Ersoy, B.,2003. “Mermer İşleme Tesisi Su arıtımında Kullanılan Flokülantların Tanıtımı”, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu, AFYON, s 449-462.
- Ersoy, B., Alptekin, A., Sarışık, Gürcan, S., 2005. “Doğal Taş İşleme Tesis Atıksularından Bulanıklığın Giderilmesinde Farklı Yöntemlerin ve Farklı Koagülantların Etkisi”, Madencilik ve Çevre Sempozyumu, ANKARA
- Görhan, G., Kahraman, E., Demir, İ., Başpınar, M.S., 2008. “Mermer Tozu ve Atıklarının Kullanım Alanlarının Araştırılması”, Türkiye IV. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu, AFYON
- Gregory, John, 1989, Fundamental of flocculation, Critical Reviews in Environmental Controls, 19,3,185 - 230

- Gündüz, L., Şentürk, A., Sarışık, A., 1996. “Mermer Teknolojisi”, Mermer Teknolojisi Dergisi, SDÜ Müh. Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ISPARTA
- Hogg, R., 2000, “Flocculation and Dewatering, Int J. Miner. Process”, 58, 223–236
- İpekoğlu, 2007. “Susuzlandırma ve Yöntemleri”, DEÜ Müh. Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İZMİR, s 34-50
- Kavaklı, M., 2003, Mermer İşleme Tesisleri Proses Atıksularının Özellikleri, Arıtımı ve Kontrolü, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İZMİR, 313-326
- Mortimer, D.A., 1991, Synthetic polyelectrolyte a review, Polym. Int., 25, 29-41
- Mpofu, P., Mensah, J. A., Ralston, J., 2003, Investigation of the effect of the polymer structure type on flocculation rheology and dewatering behaviour of kaolinite dispersions, International journal of Mineral Processing, vol 71, 268
- Mpofu, P., Addoi-Mensah, J., 2004, Flocculation and dewatering behaviour of smectite dispersions: effect of polymer structure type, Minerals Engineering, 17, 411-423
- Oğul, K., 2005, Mermer İnce Atıklarının Koagülasyonu ve Flokülasyonu, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ESKİŞEHİR, 92 s.
- Owen, A., T., Fowel, P.D., Swift, J.D., The impact of polyacrylamide flocculant solution age on flocculation performance, International journal of mineral processing, 67, 123 - 144
- Önal, M., 2007. “Mermer Teknolojisi Ders Notları”, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, MALATYA
- Öteyaka, B., Yamık, A., Uçar, A., Şahbaz, O., Yılmaz, B., 2005, Seyitömer killilerinin çökelme davranışları, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik kongresi ve Fuarı, IMCET 2005, 297- 303
- Sabah, E., Cengiz, İ., Erkan, Z.E., 2004, Geleneksel ve UMA Teknolojisinin Polimerlerin Flokülasyon Performansları Üzerine Bir Araştırma, Madencilik Dergisi, Mart 2004, Madencilik Dergisi, Cilt 43, Sayı 1, s 15-20
- Scott, J.P., Fowell, P.O., Ralph, D.E., Farrow, J.B., 1996, The shear degradation of high molecular –weight flocculant solutions, J. Appl. Polym. Science, 62, 2097-2106

- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY), ‘‘Numune Alma ve Analiz Metodları Tebliği’’, 1991, 20748 Sayılı ve Resmi Gazete, ANKARA
- Yıldız, A., H., 2008, Mermer Toz Atıklarının Yol İnşaatında Değerlendirilmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat ABD.,Doktora Tezi, ISPARTA, s172
- Yılmazer, Y., 2006, Baritin polimerler ile flokülasyonu ve katyoniklerin etkisi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, KONYA, 50 s

## EKLER

### DENEYSEL VERİLER

Çizelge Ek-1

| <b>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O</b> |                  | <b>FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O</b> |                  | <b>PACI</b>  |                  | <b>NaAlO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O</b> |                  |
|--------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|------------------|--------------|------------------|------------------------------------------|------------------|
| Dozaj (mg/L)                                                       | Bulanıklık (NTU) | Dozaj (mg/L)                            | Bulanıklık (NTU) | Dozaj (mg/L) | Bulanıklık (NTU) | Dozaj (mg/L)                             | Bulanıklık (NTU) |
| 0                                                                  | 127,4            | 0                                       | 127,4            | 0            | 127,4            | 0                                        | 127,4            |
| 10                                                                 | 46               | 10                                      | 54,36            | 10           | 29,35            | 10                                       | 70               |
| 20                                                                 | 34,35            | 20                                      | 18,38            | 20           | 46,46            | 20                                       | 68,65            |
| 50                                                                 | 57,42            | 50                                      | 42,9             | 50           | 59,03            | 50                                       | 66,45            |
| 150                                                                | 72,26            | 150                                     | 73,54            | 150          | 39,35            | 150                                      | 60,65            |
| 250                                                                | 59,5             | 250                                     | 50,97            | 250          | 38,06            | 250                                      | 37,65            |
| 300                                                                | 60,97            | 300                                     | 74,19            | 300          | 69,03            | 300                                      | 36,12            |
| 400                                                                | 66,66            | 400                                     | 65,16            | 400          | 69,67            | 400                                      | 59,35            |

Çizelge Ek-2

| <b>Sepiyolit</b> |                  | <b>Pomza</b> |                  | <b>Zeolit</b> |                  |
|------------------|------------------|--------------|------------------|---------------|------------------|
| Dozaj (gr)       | Bulanıklık (NTU) | Dozaj (gr)   | Bulanıklık (NTU) | Dozaj (gr)    | Bulanıklık (NTU) |
| 0                | 135,48           | 0            | 135,48           | 0             | 135,48           |
| 0,25             | 46,77            | 0,25         | 89,03            | 0,25          | 55,81            |
| 0,5              | 24,51            | 0,5          | 88,38            | 0,5           | 24,84            |
| 1                | 35,48            | 1            | 73,55            | 1             | 40               |
| 1,5              | 32,26            | 1,5          | 35,48            | 1,5           | 61,29            |
| 2                | 51,61            | 2            | 51,94            | 2             | 53,87            |
| 2,5              | 37,09            | 2,5          | 68,71            | 2,5           | 45,81            |
| 3                | 23,23            | 3            | 63,23            | 3             | 8,06             |
| 3,5              | 61,61            | 3,5          | 66,45            | 3,5           | 53,23            |
| 4                | 26,45            | 4            | 78,71            | 4             | 59,03            |

Çizelge Ek-3

| <b>%40 Katyonik YMA</b> |                  | <b>% 40 Anyonik YMA</b> |                  | <b>Noniyonik</b> |                  |
|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Dozaj (mg/L)            | Bulanıklık (NTU) | Dozaj (mg/L)            | Bulanıklık (NTU) | Dozaj (mg/L)     | Bulanıklık (NTU) |
| 0                       | 87               | 0                       | 87               | 0                | 87               |
| 1                       | 8,06             | 1                       | 11,61            | 1                | 21,29            |
| 2                       | 2,9              | 2                       | 2,58             | 2                | 24,51            |
| 4                       | 3,55             | 4                       | 5,81             | 4                | 26,4             |
| 6                       | 9,35             | 6                       | 15,16            | 6                | 25,16            |
| 8                       | 10               | 8                       | 6,13             | 8                | 12,9             |
| 10                      | 28,76            | 10                      | 16,77            | 10               | 46,13            |

**Çizelge Ek-4**

| % 40 Anyonik OMA |                  | %40 Katyonik OMA |                  | %30 Anyonik OMA |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Dozaj (mg/L)     | Bulanıklık (NTU) | Dozaj (mg/L)     | Bulanıklık (NTU) | Dozaj (mg/L)    | Bulanıklık (NTU) |
| 0                | 87               | 0                | 87               | 0               | 87               |
| 1                | 36,12            | 1                | 38,06            | 1               | 8,06             |
| 2                | 34,19            | 2                | 27,42            | 2               | 13,23            |
| 4                | 26,45            | 4                | 31,94            | 4               | 15,48            |
| 6                | 8,06             | 6                | 59,68            | 6               | 30,65            |
| 8                | 18,06            | 8                | 71,94            | 8               | 40               |
| 10               | 10,96            | 10               | 84,52            | 10              | 41,29            |

**Çizelge Ek-5**

| $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ |                | $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ |                | PACI       |                | $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ |                |
|---------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|----------------|------------|----------------|--------------------------------------------|----------------|
| Zaman (dk)                                              | Yükseklik (cm) | Zaman (dk)                                | Yükseklik (cm) | Zaman (dk) | Yükseklik (cm) | Zaman (dk)                                 | Yükseklik (cm) |
| 0                                                       | 26             | 0                                         | 26             | 0          | 26             | 0                                          | 26             |
| 5                                                       | 21,5           | 5                                         | 12             | 5          | 16             | 5                                          | 15             |
| 10                                                      | 18,5           | 10                                        | 3              | 10         | 13,5           | 10                                         | 8              |
| 15                                                      | 18             | 15                                        | 0,5            | 15         | 8,5            | 15                                         | 3              |
| 30                                                      | 15             | 30                                        | 0,5            | 30         | 3              | 30                                         | 1              |

**Çizelge Ek- 6**

| Sepiyolit  |                | Zeolit     |                | Pomza      |                |
|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
| Zaman (dk) | Yükseklik (cm) | Zaman (dk) | Yükseklik (cm) | Zaman (dk) | Yükseklik (cm) |
| 0          | 26             | 0          | 26             | 0          | 26             |
| 5          | 11             | 5          | 10             | 5          | 21,5           |
| 10         | 3,5            | 10         | 3              | 10         | 14,5           |
| 15         | 3              | 15         | 2,5            | 15         | 8,5            |
| 20         | 3              | 20         | 2,5            | 20         | 5              |
| 25         | 3              | 25         | 2,5            | 25         | 4              |
| 30         | 3              | 30         | 2,5            | 30         | 4              |

**Çizelge Ek-7**

| %40 Katyonik YMA |                | %40 Anyonik YMA |                | Noniyonik  |                |
|------------------|----------------|-----------------|----------------|------------|----------------|
| Zaman (sn)       | Yükseklik (cm) | Zaman (sn)      | Yükseklik (cm) | Zaman (sn) | Yükseklik (cm) |
| 0                | 26             | 0               | 26             | 0          | 26             |
| 60               | 13             | 1               | 4              | 60         | 15             |
| 90               | 5,5            | 2               | 3,5            | 90         | 6              |
| 180              | 3,25           | 10              | 3              | 180        | 4              |
| 240              | 2              | 30              | 3              | 240        | 4              |

Çizelge Ek-8

| %40 Katyonik OMA |                | %30 Anyonik OMA |                |
|------------------|----------------|-----------------|----------------|
| Zaman (sn)       | Yükseklik (cm) | Zaman (sn)      | Yükseklik (cm) |
| 0                | 15             | 0               | 26             |
| 10               | 11             | 60              | 13             |
| 20               | 7              | 90              | 5,5            |
| 30               | 4              | 180             | 3,25           |
| 60               | 3,75           | 240             | 2              |

Çizelge Ek-9

| $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ |                  | $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ |                  | PACI |                  | $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ |                  |
|---------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------|------------------|------|------------------|--------------------------------------------|------------------|
| pH                                                      | Bulanıklık (NTU) | pH                                        | Bulanıklık (NTU) | pH   | Bulanıklık (NTU) | pH                                         | Bulanıklık (NTU) |
| 6,5                                                     | 96,77            | 6,5                                       | 99,68            | 6,5  | 29,35            | 6,5                                        | 40,32            |
| 7                                                       | 68,71            | 7                                         | 60,65            | 7    | 59,58            | 7                                          | 32,25            |
| 8                                                       | 33,23            | 8                                         | 21,15            | 8    | 74,51            | 8                                          | 42,26            |
| 9                                                       | 60,64            | 9                                         | 57,41            | 9    | 70,96            | 9                                          | 29,35            |

Çizelge Ek-10

| Sepiyolit |                  | Zeolit |                  | Pomza |                  |
|-----------|------------------|--------|------------------|-------|------------------|
| pH        | Bulanıklık (NTU) | pH     | Bulanıklık (NTU) | pH    | Bulanıklık (NTU) |
| 6,5       | 16,13            | 6,5    | 8,06             | 6,5   | 43,23            |
| 7         | 20,32            | 7      | 10               | 7     | 44,19            |
| 8         | 21,61            | 8      | 11,25            | 8     | 37,41            |
| 9         | 18,38            | 9      | 13,87            | 9     | 49,35            |

Çizelge Ek-11

| %40 Katyonik YMA |                  | % 40 Anyonik YMA |                  | Noniyonik |                  | % 30 Anyonik OMA |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|------------------|------------------|------------------|
| pH               | Bulanıklık (NTU) | pH               | Bulanıklık (NTU) | pH        | Bulanıklık (NTU) | pH               | Bulanıklık (NTU) |
| 6                | 12,58            | 6                | 13,22            | 6         | 18,38            | 6                | 25,89            |
| 9                | 6,45             | 9                | 12,26            | 9         | 38,71            | 9                | 10,32            |
| 11               | 89               | 11               | 90               | 11        | 94               | 11               | 96               |

Çizelge Ek-12

| $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ |                  | $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ |                  | PACI       |                  | $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ |                  |
|---------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------|------------------|------------|------------------|--------------------------------------------|------------------|
| Zaman (sn)                                              | Bulanıklık (NTU) | Zaman (sn)                                | Bulanıklık (NTU) | Zaman (sn) | Bulanıklık (NTU) | Zaman (sn)                                 | Bulanıklık (NTU) |
| 0                                                       | 127,4            | 0                                         | 127,4            | 0          | 127,4            | 0                                          | 127,4            |
| 30                                                      | 82,25            | 30                                        | 89,35            | 30         | 54,19            | 30                                         | 87,09            |
| 60                                                      | 39,35            | 60                                        | 58,38            | 60         | 50               | 60                                         | 50,32            |
| 90                                                      | 34,35            | 90                                        | 25,16            | 90         | 55,16            | 90                                         | 44,19            |
| 120                                                     | 36,45            | 120                                       | 18,38            | 120        | 29,68            | 120                                        | 36,12            |
| 150                                                     | 36,45            | 150                                       | 18,38            | 150        | 29,75            | 150                                        | 36,77            |

Çizelge Ek-13

| Sepiyolit  |                  | Zeolit     |                  | Pomza      |                  |
|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|
| Zaman (sn) | Bulanıklık (NTU) | Zaman (sn) | Bulanıklık (NTU) | Zaman (sn) | Bulanıklık (NTU) |
| 0          | 135,48           | 0          | 135,48           | 0          | 135,48           |
| 30         | 60,32            | 30         | 44,52            | 30         | 43,23            |
| 60         | 61,94            | 60         | 25,16            | 60         | 36,58            |
| 90         | 53,55            | 90         | 8,06             | 90         | 35,98            |
| 120        | 23,23            | 120        | 10               | 120        | 35,48            |
| 150        | 35,78            | 150        | 17,87            | 150        | 40,57            |

Çizelge Ek-14

| %40 Katyonik YMA |                  | % 40 Anyonik YMA |                  | Noniyonik  |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------|------------------|
| Zaman (sn)       | Bulanıklık (NTU) | Zaman (sn)       | Bulanıklık (NTU) | Zaman (sn) | Bulanıklık (NTU) |
| 0                | 87               | 0                | 87               | 0          | 87               |
| 15               | 24,19            | 15               | 13,87            | 15         | 30,97            |
| 30               | 21,29            | 30               | 6,77             | 30         | 22,26            |
| 60               | 7,74             | 60               | 3,55             | 60         | 17,09            |
| 90               | 5,93             | 90               | 3,55             | 90         | 14,51            |
| 120              | 2,9              | 120              | 2,58             | 120        | 13,1             |
| 150              | 3,2              | 150              | 2,75             | 150        | 12,9             |
| 180              | 4,9              | 180              | 3,5              | 180        | 18,25            |

Çizelge Ek-15

| % 30 Anyonik YMA |                  | % 40 Anyonik OMA |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Zaman (sn)       | Bulanıklık (NTU) | Zaman (sn)       | Bulanıklık (NTU) |
| 0                | 87               | 0                | 87               |
| 15               | 12,9             | 15               | 11,29            |
| 30               | 2,9              | 30               | 12,58            |
| 60               | 2,9              | 60               | 19,68            |
| 90               | 2,9              | 90               | 8,39             |
| 120              | 2,9              | 120              | 8,39             |
| 150              | 2,9              | 150              | 8,39             |
| 180              | 3,23             | 180              | 9,35             |

Çizelge Ek-16

| $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ |                  | $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ |                  | PACI       |                  | $NaAlO_2 \cdot nH_2O$ |                  |
|-----------------------------|------------------|----------------------|------------------|------------|------------------|-----------------------|------------------|
| Zaman (dk)                  | Bulanıklık (NTU) | Zaman (dk)           | Bulanıklık (NTU) | Zaman (dk) | Bulanıklık (NTU) | Zaman (dk)            | Bulanıklık (NTU) |
| 0                           | 127,4            | 0                    | 127,4            | 0          | 127,4            | 0                     | 127,4            |
| 5                           | 125              | 5                    | 90,32            | 5          | 122,42           | 5                     | 90,96            |
| 10                          | 112              | 10                   | 77,74            | 10         | 110,97           | 10                    | 70               |
| 15                          | 104,9            | 15                   | 65,16            | 15         | 89,68            | 15                    | 64,52            |
| 20                          | 85,16            | 20                   | 53,55            | 20         | 74,52            | 20                    | 54,52            |
| 25                          | 34,36            | 25                   | 18,4             | 25         | 29,36            | 25                    | 38,45            |
| 30                          | 34,35            | 30                   | 18,38            | 30         | 29,35            | 30                    | 36,12            |

Çizelge Ek-17

| Sepiyolit  |                  | Zeolit     |                  | Pomza      |                  |
|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|
| Zaman (dk) | Bulanıklık (NTU) | Zaman (dk) | Bulanıklık (NTU) | Zaman (dk) | Bulanıklık (NTU) |
| 0          | 135,48           | 0          | 135,48           | 0          | 135,48           |
| 5          | 135              | 5          | 94,84            | 5          | 129,03           |
| 10         | 110,84           | 10         | 76,13            | 10         | 71,61            |
| 15         | 93,42            | 15         | 50,32            | 15         | 67,74            |
| 20         | 56,55            | 20         | 39,68            | 20         | 60,65            |
| 25         | 28,71            | 25         | 11,29            | 25         | 30,32            |
| 30         | 23,23            | 30         | 8,06             | 30         | 30,36            |

Çizelge Ek-18

| %40 Katyonik YMA |                  | %40 Anyonik YMA |                  | Noniyonik  |                  |
|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------|------------------|
| Zaman (dk)       | Bulanıklık (NTU) | Zaman (dk)      | Bulanıklık (NTU) | Zaman (dk) | Bulanıklık (NTU) |
| 0                | 87               | 0               | 87               | 0          | 87               |
| 5                | 15               | 5               | 13               | 5          | 37,09            |
| 10               | 2,9              | 10              | 2,58             | 10         | 13,87            |
| 15               | 2,9              | 15              | 2,58             | 15         | 13,22            |
| 20               | 2,9              | 20              | 2,58             | 20         | 12,9             |
| 25               | 2,9              | 25              | 2,58             | 25         | 12,9             |
| 30               | 2,9              | 30              | 2,58             | 30         | 12,9             |

Çizelge Ek-19

| %30 Anyonik OMA |                  | %40 Anyonik OMA |                  |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| Zaman (dk)      | Bulanıklık (NTU) | Zaman (dk)      | Bulanıklık (NTU) |
| 0               | 87               | 0               | 87               |
| 5               | 22,9             | 5               | 23,22            |
| 10              | 22,58            | 10              | 21,94            |
| 15              | 2,9              | 15              | 17,74            |
| 20              | 2,9              | 20              | 10               |
| 25              | 2,9              | 25              | 9,68             |
| 30              | 2,9              | 30              | 9,68             |

Çizelge Ek-20

| $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ |                  | $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ |                  | PACl                     |                  | $\text{NaAlO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ |                  |
|---------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------|------------------|--------------------------|------------------|--------------------------------------------|------------------|
| Karıştırma Hızı (dev/dk)                                | Bulanıklık (NTU) | Karıştırma Hızı (dev/dk)                  | Bulanıklık (NTU) | Karıştırma Hızı (dev/dk) | Bulanıklık (NTU) | Karıştırma Hızı (dev/dk)                   | Bulanıklık (NTU) |
| 0                                                       | 127,4            | 0                                         | 127,4            | 0                        | 127,4            | 0                                          | 127,4            |
| 45                                                      | 98,06            | 45                                        | 63,87            | 45                       | 79,03            | 45                                         | 60,32            |
| 60                                                      | 78,39            | 60                                        | 53,55            | 60                       | 65,16            | 60                                         | 60,65            |
| 90                                                      | 58,39            | 90                                        | 55,81            | 90                       | 55               | 90                                         | 56,45            |
| 120                                                     | 64,51            | 120                                       | 43,55            | 120                      | 44,19            | 120                                        | 41,29            |
| 150                                                     | 62,26            | 150                                       | 41,61            | 150                      | 35,68            | 150                                        | 36,77            |
| 200                                                     | 34,35            | 200                                       | 18,38            | 200                      | 29,35            | 200                                        | 36,12            |

Çizelge Ek-21

| Sepiyolit                   |                     | Zeolit                      |                     | Pomza                       |                     |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| Karıştırma Hızı<br>(dev/dk) | Bulanıklık<br>(NTU) | Karıştırma Hızı<br>(dev/dk) | Bulanıklık<br>(NTU) | Karıştırma Hızı<br>(dev/dk) | Bulanıklık<br>(NTU) |
| 0                           | 135,48              | 0                           | 135,48              | 0                           | 135,48              |
| 45                          | 28,06               | 45                          | 8,06                | 45                          | 36,45               |
| 60                          | 23,23               | 60                          | 12,26               | 60                          | 35,48               |
| 90                          | 25,48               | 90                          | 20,32               | 90                          | 37,65               |
| 120                         | 30,32               | 120                         | 26,45               | 120                         | 45,54               |
| 150                         | 36,77               | 150                         | 28,38               | 150                         | 59,68               |
| 200                         | 58,74               | 200                         | 37,09               | 200                         | 78,06               |

Çizelge Ek-22

| %40 Katyonik YMA            |                     | % 40 Anyonik YMA            |                     | Noniyonik                   |                     |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| Karıştırma Hızı<br>(dev/dk) | Bulanıklık<br>(NTU) | Karıştırma Hızı<br>(dev/dk) | Bulanıklık<br>(NTU) | Karıştırma Hızı<br>(dev/dk) | Bulanıklık<br>(NTU) |
| 0                           | 87                  | 0                           | 87                  | 0                           | 87                  |
| 45                          | 36,77               | 45                          | 4,2                 | 45                          | 55,48               |
| 60                          | 19,68               | 60                          | 4,1                 | 60                          | 47,35               |
| 90                          | 8,71                | 90                          | 4                   | 90                          | 38,35               |
| 120                         | 4,5                 | 120                         | 3,56                | 120                         | 12,9                |
| 150                         | 2,9                 | 150                         | 3,45                | 150                         | 25,81               |
| 200                         | 3,2                 | 200                         | 2,58                | 200                         | 48,54               |

Çizelge Ek-23

| %30 Anyonik OMA             |                     | % 40 Anyonik OMA            |                     |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| Karıştırma Hızı<br>(dev/dk) | Bulanıklık<br>(NTU) | Karıştırma Hızı<br>(dev/dk) | Bulanıklık<br>(NTU) |
| 0                           | 2,9                 | 0                           | 8,38                |
| 45                          | 5,16                | 45                          | 8,71                |
| 60                          | 6,45                | 60                          | 11,94               |
| 90                          | 11,29               | 90                          | 39,68               |
| 120                         | 35,48               | 120                         | 44,19               |
| 150                         | 49,35               | 150                         | 62,90               |
| 200                         |                     | 200                         |                     |







