

## Alum çamurlarının ikili şartlandırılması

Elif YILMAZ KOCAKULAK\*, Lütfi AKÇA

İTÜ İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

### Özet

*Bu çalışmada ikili polielektrolit (PE) şartlandırmayla alum çamurlarının susuzlaşabilirliği araştırılmıştır. Farklı PE dozajlarının şartlandırmaya etkileri araştırılmıştır İyi bir şartlandırma ve dolayısıyla susuzlaşabilirliğin elde edilebilmesi için optimum şartlandırıcı ve şartlandırıcı dozu belirlenmiştir En uygun şartlandırıcı olarak katyonik (Hyd. CP 509), anyonik(Hyd.7170) ve noniyonik (Hyd.8000) PE'ler seçilerek deneyler yürütülmüştür. Çamur numuneleri değişik karıştırma koşulları altında tekli ve ikili şartlandırmaya tabi tutularak susuzlaşabilirlik özellikleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çamurun yumak direnci ve zeta potansiyeli ölçülerek susuzlaşabilirlik üzerine etkileri araştırılmıştır. İkili şartlandırma deneylerinde şu sonuçlara ulaşılmıştır. İkili şartlandırmada tekli şartlandırmaya göre daha iyi susuzlaşabilirlik sağlanmakta, daha az PE ilavesi ile minimum KES değerine ulaşılmakta ve daha güçlü yumaklar elde edilmektedir. **Anahtar Kelimeler:** İkili şartlandırma, susuzlaştırma, flokülasyon, polielektroli, kapiler emme süresi.*

### Dual polymer conditioning of alum sludges

#### Abstract

*In this study, alum sludge dewatering is experimented by dual conditioning. The effects of the different polyelectrolytes dosages on conditioning are researched Optimum conditioner and conditioner dosages have been determined in order to obtain dewatering and a better conditioning by the experiments made in this research. Hyd. CP 509(cationic), Hyd. 7170(anionic) and Hyd. 8000(nonionic) type polyelectrolytes are used in this study as more appropriate conditioners. Dewatering properties of single and dual conditioning are measured and compared each other. Floc strength and zeta potantiel are measured and their effects on dewatering are researched. The results in dual conditioning experiments are as follows: Dual conditioning provides a better dewatering compared to single conditioning. Minimum CST values are reached by adding less polyelectrolyte in dual conditioning. Floc strength is better in dual conditioning. It has been observed on dual conditioning experiments that dewatering obtained by adding cationic polyelectrolyte on anionic polyelectrolyte is better than adding anionic polyelectrolyte on cationic polyelectrolyte. It has been observed that dewatering which is obtained in dual conditioning experiments by adding nonionic polyelectrolyte on cationic polyelectrolyte is better than dewatering obtained by adding cationic polyelectrolyte on nonionic polyelectrolyte.*

**Keywords:** Dual conditioning, dewatering, flocculation, polyelectrolyte, capillary suction time (CST).

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Elif YILMAZ KOCAKULAK. Elif\_yk@hotmail.com; Tel: (212) 356 56 19.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Alum çamurlarının ikili şartlandırılması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 23.07.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 27.07.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.12.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Bu çalışmanın amacı, arıtma çamurlarının daha kolay susuzlaştırılması için yapılacak kimyasal şartlandırmanın daha verimli ve etkili hale getirilmesine katkıda bulunmaktır. Şartlandırıcı olarak en yaygın kullanıma sahip olan PE'lerin ikili şartlandırma yapılarak daha verimli ve etkili kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma su arıtma (alum) çamurları üzerinde yapılan deneylerle yürütülmüştür. Susuzlaştırılmaları zor olan bu tip çamurların daha etkili bir şekilde nasıl şartlandırılacağından yola çıkılarak ikili şartlandırma yapılmasına karar verilmiştir. Son yıllarda ikili şartlandırma ile ilgili yapılan çalışmalar da dikkate alınarak deneyler hem tekli hem de ikili şartlandırma yapılarak yürütülmüştür. Araştırma kapsamında yürütülen deneylerle iyi bir şartlandırma ve dolayısıyla susuzlaşabilirliğin elde edilebilmesi için önce uygun şartlandırıcı ve optimum şartlandırıcı dozu belirlenmiştir Daha sonra değişik karıştırma koşulları uygulanarak hem tekli ve hem de ikili şartlandırma için en uygun karıştırma şartı elde edilmiştir. Bu karıştırma şartı ve optimum doz değerleri dikkate alınarak yürütülen tekli ve ikili şartlandırma deneylerinden elde edilen veriler çerçevesinde çamurların susuzlaşabilirlikleri; kapiler emme süresi, yumak direnci ve kullanılan PE miktarı açısından birbirleri ile kıyaslanmıştır. Seçilen en uygun karıştırma şartında farklı PE dozajlarının tekli ve ikili şartlandırmaya etkileri araştırılmıştır. Tekli ve ikili şartlandırma yapılan çamur numunelerinin susuzlaşabilirlik özellikleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. İkili ve tekli şartlandırmada ilave edilen PE'lerin etkilerini ve yumak stabilitesinin değişimini gözlemleyebilmek için zeta potansiyeli ölçümleri yapılmıştır.

## Literatür

Su arıtma sistemlerinde çamurların oluştuğu başlıca birimler çökelme ve filtre üniteleridir. Çökeltim havuzlarından önce genellikle pıhtılaştırma ve yumaklaştırma yapılmaktadır. Pıhtılaştırmada alum kullanılması halinde oluşan çamurlara alum çamuru denilmektedir.

Alum'un ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ ) su ile reaksiyonu sonucu oluşan alüminyum hidroksitli çamurun yapısı jelatinimsi ve gerilmelere karşı direnç-

sizdir. Alüminyum için bağlı su miktarı %40 olup %20'den fazla katı muhtevalı alüminyum hidroksit floklarının mekanik olarak susuzlaştırılması zordur. Düşük basınçlı mekanik cihazları; vakum filtreler, santrifüjler, belt presler çamurdaki serbest suyu alabilmelerine rağmen hidrojen bağlı suyu alamazlar. Arıtma çamurlarında mekanik susuzlaştırma ile ancak %40-45 katı konsantrasyonuna ulaşılabilir. Jelatinimsi ve sıkışabilme özelliği zayıf olan alum çamuru mekanik susuzlaştırma öncesi %0.5-2 oranlarında katı konsantrasyonundadır.

## Numune alma

Çamur numuneleri Kağıthane İçme Suyu Arıtma tesisinde bulunan Yıldırım Beyazıt Han durultucu dip çamur ve filtre yıkama suyundan alınmıştır. Çamurun karakteristikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan çamur karakteristikleri

Katı Madde (%)	0.5- 2
pH	6.5 – 7
Zeta Potansiyeli (mV)	-11.5 / -13
ALSO <sub>4</sub> Dozu(tesisten )	40 gr /m <sup>3</sup>
PE Dozu(tesisten )	1 gr/m <sup>3</sup>
Ham Çamur KES'i	90-120 sn

## Polielektrolitlerin özellikleri, hazırlanışı, kullanım süresi ve saklama şartları

Arıtma tesisinden farklı zamanlarda tedarik edilen her bir numunenin katı madde miktarı farklı olabileceğinden deneylere başlamadan önce her defasında katı madde ölçümü yapılmıştır. Katı madde esas alınarak önceden belirlenen PE dozları (mg PE/grKM) deney yapılacak numune hacmine bağlı olarak ml olarak belirlenmiştir.

Deneylerde kullanılan şartlandırıcılar farklı tipte PE çözeltileridir. PE çözeltileri %0.1'lik hazırlanarak deneylerde kullanılmıştır. Hyd.8000, Hyd.7170, Hyd.CP 509, Hyd.8140, Hyd.CP 503, Cos.1440-C, Cos.1442-C, Cos.1190-A, ve Cos.1130-A tipi PE'ler deneylerde kullanılan polielektrolitlerdir. PE'ler imalatçı firma tarafından verilen aktivitelerini koruma bilgileri çerçevesinde deneylerde kullanılmıştır. Aktivitelerini koruma süresi genelde literatürde de verildiği gibi en fazla 2-3 gün olup yapılan deneylerde

hazırlanan PE çözeltileri en geç iki gün içinde kullanılmıştır. Yapılan bütün ölçümlerde Standart Metotlardan faydalanılmıştır.

### Deney düzeneği ve özellikleri

Şartlandırma deneyleri için ISCO marka dijital Jartest aleti kullanılmıştır. Jartest aleti 0-300rpm arasında karıştırma hızına sahiptir. Altı adet numune aynı anda bu cihazla şartlandırılabilir. Cihazda zaman ayarlaması yapılabilir. Şartlandırılacak numuneler cihaza yerleştirildikten sonra çalışılacak şartlandırma devri ve karıştırma süresi ayarlanmakta ve işlem başlatılmaktadır. İşlem bittiğinde cihaz kendiliğinden durmaktadır.

KES ölçümleri “W.P.R.L Tip:92/1” cihazıyla yapılmıştır. KES cihazıyla numuneden süzülen süzütünün filtre kağıdının belirli bir alanını kaplamasıyla filtrasyon süresi otomatik olarak ölçülür. Deney başlangıcında, çamur numunesi çelik silindiri tamamen dolduracak şekilde koyulur. Çelik silindir içindeki numune filtreye emme basıncı uygulayacağından süzüntü filtre kağıdındaki boşluklardan ilerlemeye başlar. İlerleyen süzüntü ilk elektron çiftine ulaştığında elektronik zamanlayıcı çalışmaya başlar. Süzüntü üçüncü elektroda ulaştığında zamanlayıcının çalışması sona erer ve KES aletinden numunenin kapiler emme süresi saniye olarak okunur.

Flok direnci “Yumak direnci ölçüm cihazı/Tip 317” kullanılarak değerlendirilmeye çalışılmıştır. Tekli veya ikili şartlandırılmaya tabii tutulan çamur numuneleri bu cihaza ait 250 ml’lik beher içerisine alınarak 1000 rpm’lik bir karıştırma hızında sırasıyla 10, 40 ve 100 sn karıştırılmış ve bu zamanlardaki KES değerleri ölçülmüştür. Karıştırma zamanına karşı KES grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen bu grafiklerden yumak direnci hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Yumak kuvvetini daha iyi tanımlayabilmek için Rc parametresi kullanılmıştır (Lotito vd.,1990).

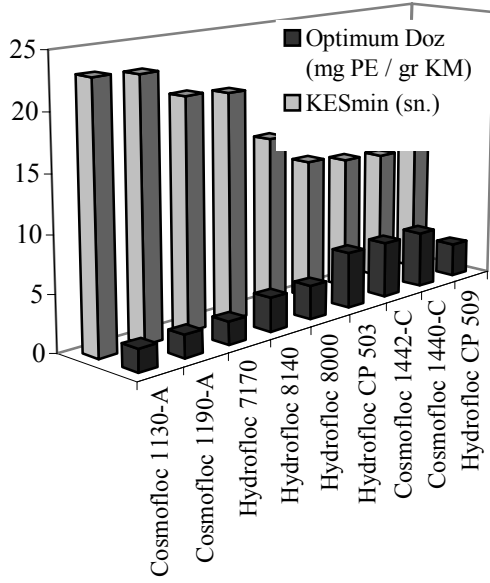
$$Rc = KES_{100} + \frac{[KES_{40} - [KES_{10} + (KES_{100} - KES_{10})/3]]}{KES_{10} - KES_0} \quad (1)$$

Burada Rc yumak direnci katsayısı,  $1/Rc$  yumak direnci olarak tanımlanan bir parametre,  $KES_{10}$ ,  $KES_{40}$  ve  $KES_{100}$  sırasıyla 10, 40 ve 100 saniyede okunan KES değerleridir.  $KES_0$  değeri numunenin seçilen karıştırma koşullarında şartlandırmaya tabii tutulmasından sonra ölçülen KES değeridir. Bu bağıntı, hızlı karıştırma süresine bağlı olarak yumakların kırılması ve dolayısıyla KES değerinin artmasına dayanarak yumak direnci için izafi bir değer vermektedir.

Mikro işlem donanımlı Zeta Metre 3.0 cihazı ile zeta potansiyeli ölçülmüştür. Şartlandırılan çamur numuneleri zeta metrede ölçülmeye başlanmadan önce ultrasonik cihazında ses dalgaları yardımıyla numune içindeki flokların daha küçük boyutlara parçalanması ve süspansiyon halinde durmaları sağlanmıştır. Numunenin olduğu bölüme cihaza yerleştirildikten sonra gerekli mikroskobik ayarlar yapılmış ve akım verilerek değişik partiküllerin belirli aralıklardan geçiş zamanları not edilmiştir. Cihaz bu değerleri otomatik olarak hafızasına almakta ve işlem sonunda ortalama bir zeta potansiyeli değeri vermektedir.

### Optimum şartlandırıcı ve şartlandırıcı dozunun belirlenmesi

İkili şartlandırma çalışmalarında kullanılan PE’lerin belirlenmesi için çalışmanın ilk aşamasında alum çamurları için en uygun PE dozu ve PE tipinin belirlenmesine çalışılmıştır. Daha sonra numuneler 100rpm’de 30sn’lik bir hızlı karıştırmaya ve 45rpm’de 90sn’lik bir yavaş karıştırmaya tabii tutularak şartlandırılmış ve kapiler emme süreleri (KES) ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre yüksek moleküler ağırlıklı katyonik (Hyd.CP 509), anyonik (Hyd. 7170) ve noniyonik (Hyd.8000) PE’ler en uygun şartlandırıcılar olarak seçilmiş ve deneylerde bu şartlandırıcılar kullanılmıştır. Şartlandırıcıların seçiminde en düşük doz değerinde en küçük KES değerlerinin elde edilebilmesi hususu dikkate alınmış ve bu koşulları sağlayan şartlandırıcıların seçilmesi esas alınmıştır. Şekil 1’de optimum şartlandırıcı dozunun belirlenmesinde kullanılan bütün PE’lerin KES değerleri ile doz değerleri arasındaki değişimler görülmektedir.



Şekil 1. Değişik PE tiplerinin optimum doz ve KES değişimleri (100rpm-30sn / 45rpm-90sn)

### Tekli şartlandırmada esas alınan karıştırma şartları ve süreleri

Uygun şartlandırıcılar seçildikten sonra 100rpm-30sn /45rpm-90sn'lik karıştırma şartı uygulanarak numuneler yeniden şartlandırılmış ve KES değerleri ölçülmüştür. Şartlandırılan numuneler yumak direnci ölçüm aletinde 1000 rpm'de sırayla 10, 40 ve 100 saniye karıştırılarak her karışım zamanı için KES değerleri elde edilmiştir. Karıştırma zamanına göre elde edilen KES değerleri kullanılarak yumak direnci değerleri hesaplanmıştır (Lotito vd.,1990). Elde edilen veriler çerçevesinde KES-Doz, KES-Zaman ve Yumak direnci-Doz grafikleri çizilmiştir. KES-Zaman grafiklerinin değerlendirmesinden sonra bazı doz değerlerinde bu karışım şartının yetersiz olduğu görülmüştür.

Çalışmada yeterli karışım, ortama ilave edilen polimerin tamamının partikül yüzeylerine adsorbe olduğu ve eşzamanlı olarak gerçekleşen yumaklaşma-kırılma reaksiyonlarında yumaklaşmanın hakim olduğu zamanın tamamlanıp kırılma dönemine girildiği süre olarak tanımlanmaktadır. İlk karıştırmanın yeterli yapılması durumunda yüksek hızlı karıştırma zamanına bağlı olarak KES değerlerinin artması beklenmelidir. Oysa bazı dozlarda KES değerleri azalma eğilimi göstermektedir. Bu da ilk karışımın yetersiz

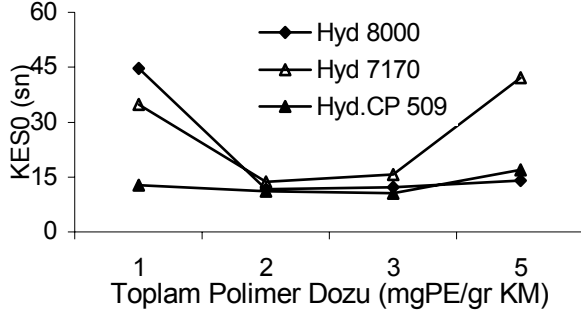
olduğu anlamına gelmektedir. Bu sebeple karışım koşulları 300rpm-60/45rpm-90sn alınarak yukarıda verilen adımlar aynen uygulanmış ve aynı grafikler çizilmiştir 300rpm-60/45rpm-90sn.'lik karıştırma şartında elde edilen KES-Zaman grafiklerinin değerlendirmesinden sonra yine bazı doz değerlerinde de yetersizliğin olduğu görülmüştür. Karıştırma devri 300rpm sabit tutularak aynı PE'lerde farklı karıştırma zamanları alınarak (90-180sn.) deneyler yürütülmüştür Yeni karıştırma koşullarıyla şartlandırmadan sonraki prosedürler daha öncekilerle aynı alınmıştır.

### Tekli şartlandırmada en uygun karıştırma koşulları

Yapılan deneyler süresince en uygun karıştırma koşulu 300rpm-180sn/45rpm-90sn olarak elde edilmiştir. Bu karıştırma koşulu esas alınarak aynı PE'ler daha geniş doz aralıkları seçilerek şartlandırılmış ve susuzlaştırma üzerine KES, yumak direnci ve zeta potansiyelinin etkileri araştırılmıştır Elde edilen en uygun karıştırma koşulunda katyonik, anyonik ve noniyonik PE'ler için toplam polimer dozuna bağlı olarak KES<sub>0</sub> değerinde meydana gelen değişimler Şekil 2'de gösterilmektedir.

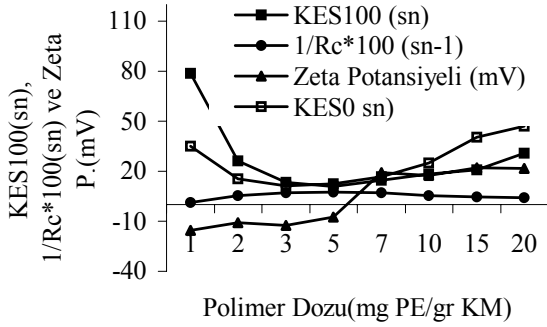
Katyonik, anyonik ve noniyonik PE'lerle yapılan tekli şartlandırmanın sonucunda alum çamuru tekli şartlandırmak için en uygun PE'nin katyonik PE olduğu görülmüştür. Eksi yüklü çamur partikülleri üzerine pozitif yüklü katyonik PE ilave edilerek yeterli karışım sağlandığında elektriksel çekme kuvvetlerinden dolayı partikül ve PE bir araya gelerek yük nötralizasyonunu gerçekleştirmektedir. Yük nötralizasyonu oluşan partiküller arasında elektriksel itme söz konusu olmadığından flokülasyon ile partiküllerin birbirlerine yaklaştırılmaları kolaylaşmaktadır.

300rpm-180sn/45rpm-90sn.'lik karıştırma şartında gerçekleştirilen tekli şartlandırma deney sonuçlarından elde edilen KES<sub>0</sub>, KES<sub>100</sub>, yumak direnci ve zeta potansiyeli değerlerinin birbirlerine göre değişimleri katyonik, anyonik ve noniyonik PE için sırasıyla Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmektedir.

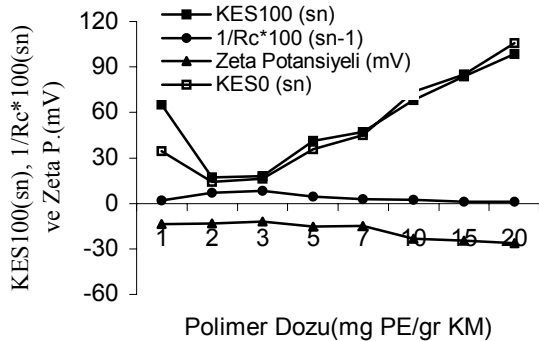


Şekil 2. Toplam PE dozunun bir fonksiyonu olarak KES<sub>0</sub>'da meydana gelen değişimler (300rpm-180sn / 45rpm-90sn.)

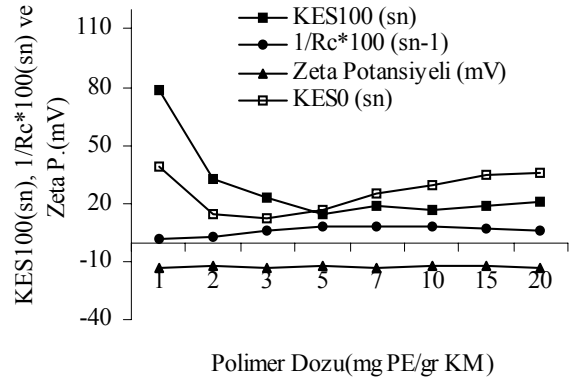
Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'den de görüleceği üzere KES<sub>0</sub> ve KES<sub>100</sub> eğrilerinin değişimi birbirlerine paraleldir. Bu da ideal şartların yakalandığını göstermesi açısından önemlidir. KES<sub>0</sub> değerinin minimum olduğu noktada her üç PE içinde yumak direnci değerleri yüksek bir değere ulaşmaktadır.



Şekil 3. Hydrofloc CP 509 tipi PE ile şartlandırmada doz-KES<sub>0</sub>, KES<sub>100</sub>, yumak direnci ve zeta potansiyeli değişimleri (300rpm-180sn-45rpm-90sn)



Şekil 4. Hydrofloc 7170 tipi PE ile şartlandırmada doz-KES<sub>0</sub>, KES<sub>100</sub>, yumak direnci ve zeta potansiyeli değişimleri



Şekil 5. Hydrofloc 8000 tipi PE ile şartlandırmada doz-KES<sub>0</sub>, KES<sub>100</sub>, yumak direnci ve zeta potansiyeli değişimleri (300rpm-180sn-45rpm-90sn)

Katyonik PE ile yapılan tekli şartlandırmada en küçük KES değeri 3 mgPE/gr KM dozunda 11.1 sn olarak ve en yüksek yumak direnci değeri de 5 mgPE/grKM dozunda 7.5 sn<sup>-1</sup> olarak elde edilmiştir (Şekil 3). Anyonik PE ile yapılan tekli şartlandırmada en küçük KES değeri 3 mgPE/gr KM dozunda 16.1 sn olarak ve en yüksek yumak direnci değeri de yine 3 mgPE/grKM dozunda 8.2 sn<sup>-1</sup> olarak elde edilmiştir (Şekil 4). Noniyonik PE ile yapılan tekli şartlandırmada en küçük KES değeri 3 mgPE/gr KM dozunda 11.95 sn olarak ve en yüksek yumak direnci değeri de yine 3 mgPE/grKM dozunda 8.02 sn<sup>-1</sup> olarak elde edilmiştir (Şekil 5). Optimum koşulların elde edildiği bu noktalarda yumaklar en güçlü yapılarına kavuşmuşlardır. Bu tez kapsamında bağlı su miktarı ölçülmemiştir. Ancak literatürde yapılan çalışmalardan yola çıkılarak KES değerinin minimum olduğu bu noktalarda, partikül içerisindeki bağlı su muhtevasının ilave edilen PE ile optimum seviyede yer değiştirerek minimum KES değerinin elde edilmesini sağlamış olduğu düşünülmektedir. Artan PE dozajlarında aşırı yüklemekten dolayı KES muhtemelen bağlı su muhtevasının artmasından dolayı artmaktadır. Aşırı doz ilavesinde çamur partikülleri üzerine ilave edilen PE diğer partiküllere bağlanmak yerine ilk bağlandığı partikül üzerini kaplamayı tercih etmektedir. Bu durumda yeniden stabil partiküller oluşmaktadır. Aşırı doz ilavelerinde yumakların yapıları bozulmakta ve dolayısıyla susuzlaşma azalabilmektedir.

### **İkili şartlandırma ve optimizasyonu**

Susuzlaştırılmaları zor olan çamurların daha etkili bir şekilde şartlandırılabilmesi için seçilen karıştırma koşullarında iki adet uygun PE'nin ardışık olarak şartlandırılacak numuneye ilave edilmesiyle yapılan şartlandırma ikili şartlandırma olarak tanımlanır. İkili şartlandırma ile ilgili şu ana kadar yapılan çalışmalardan ikili şartlandırmanın tekli şartlandırmadan daha iyi bir susuzlaşabilirlik sergilediği görülmüştür. İkili şartlandırmada; tekli şartlandırmada kullanılan PE ile aynı veya daha az miktarda PE kullanılarak daha iyi susuzlaşabilirlik elde edilebilir. Ardışık olarak ikili PE kullanılması çamur susuzlaşabilirliğini artırmaktadır. İkili şartlandırma ile ince partiküllerin tutulması verimi yükselmekte, susuzlaştırılan kekin katı muhtevası artmakta ve belt filtre ortamının tıkanması azalmaktadır (Senthilathan ve Sigler, 1993). İkili şartlandırmada PE'lerin ilave sırası ve oranları susuzlaştırmayı etkilemektedir. Uygun oranlardaki ardışık ikili şartlandırmalar yumaklaşmayı artırmaktadır. İlave edilecek PE dozlarının doğru tespit edilmesi çamur şartlandırılmasında önemlidir. Çünkü aşırı dozaj hem maliyeti artırmakta hem de susuzlaştırmayı düşürmektedir. En iyi PE dozajı, sıvı içerisinde bulunan partiküllerin yüzey yükünün düşük olması ve parçaların yumak haline gelebilme özelliğiyle alakalıdır (Christensen vd 1993). Tek PE ile şartlandırmada yumaklaşma genelde yük nötralizasyonundan kaynaklanmaktadır. Ancak ikili şartlandırma sisteminde yük nötralizasyonuna ilave olarak polimer-polimer etkileşimleri parçacıklar arasındaki yakınlaşmayı ve sonuç olarak yumaklaşmayı çok etkin hale getirmektedir. Polimer köprüleri ile üretilen yumaklar genellikle yük nötralizasyonu veya elektrostatik yama etkisiyle üretilen yumaklardan daha dirençlidir. Ancak köprülenme ile üretilen yumakların kırılması genellikle geri dönüşümsüz bir olaydır. Yani kırılan yumaklar tekrar bir araya gelemezler. Bunun nedeni muhtemelen yumak parçaları üzerine adsorblanmış olan polimer zincirlerinin kırılması olarak açıklanabilir. Yük nötralizasyonu ve elektrostatik yama ile oluşturulan yumakların kırılması halinde tekrar bir araya getirilmeleri kolaydır (Stratton, R.A., 1983). Bu husus iki mekanizmayı ayırt etmek için kullanışlı bir metot olabilir.

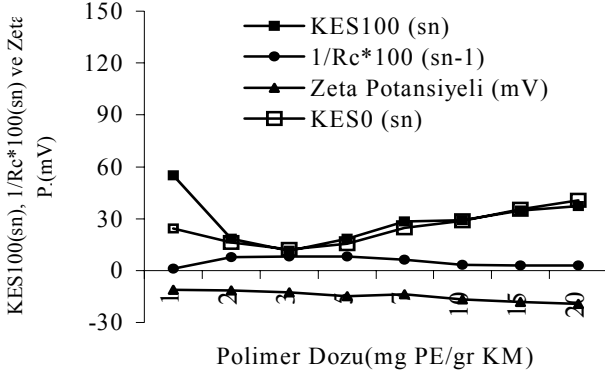
### **İkili şartlandırmada esas alınan karıştırma şartları ve süreleri**

Tekli şartlandırma deney sonuçlarından, en uygun görülen üç adet şartlandırıcı için elde edilen optimum doz aralığı baz alınarak ikili şartlandırma yapılmıştır. Tek bir şartlandırıcı kullanılarak elde edilen optimum doz değerini aşmayacak şekilde iki şartlandırıcı dozajı seçilen karıştırma koşullarında ilave edilerek ikili şartlandırma yapılmıştır. Birinci seçilen şartlandırıcı numuneye ilave edildikten sonra Jarrest cihazında 100rpm-30sn/45rpm-90sn'lik karıştırma koşullarına tabii tutulmuştur. Daha sonra ikinci şartlandırıcı ilave edilerek yine 100rpm-30sn/45rpm-90sn'lik karıştırma şartı uygulanmıştır. KES değerleri ölçülmüştür. Şartlandırılan numuneler yumak direnci ölçüm aletinde 1000rpm'de sırayla 10, 40 ve 100 saniye karıştırılarak her karışım zamanı için KES değerleri elde edilmiştir. Karıştırma zamanına göre elde edilen KES değerleri kullanılarak yumak direnci değerleri hesaplanmıştır (Lotito vd., 1990). Elde edilen veriler çerçevesinde KES-Doz, KES-Zaman, Yumak direnci-Doz ve Zeta potansiyeli-Doz grafikleri çizilmiştir. Daha sonra karıştırma koşulları 300rpm-180sn/45 rpm-90sn +300rpm-180sn/45 rpm-90sn seçilerek yeniden ikili şartlandırma yapılmıştır. Bir önceki deneydeki adımlar aynen uygulanmıştır.

### **İkili şartlandırmada en uygun karıştırma koşulları**

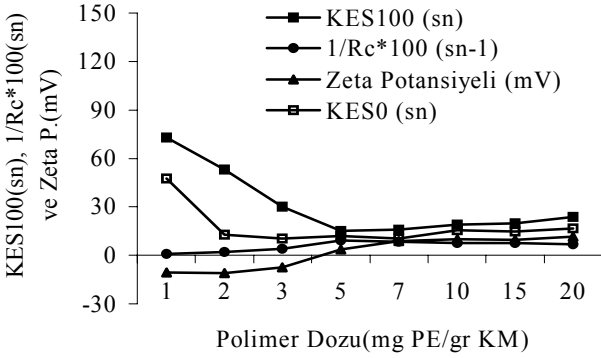
Yapılan deney sonuçlarından en uygun karıştırma koşulunun ikili şartlandırma için 300rpm-180sn/45rpm-90sn+300rpm-180sn/ 45 rpm-90sn olduğu ve en uygun doz oranının ise 1:1 olduğu görülmüştür. En uygun karıştırma şartı ve doz oranı esas alınarak ve doz aralıkları genişletilerek (1-20mgPE/grKM) ikili şartlandırma ile ilgili son deneysel çalışma yapılmıştır.

300rpm-180sn/45rpm-90sn+300rpm-180sn/ 45 rpm-90sn.'lik karıştırma şartında katyonik ve anyonik PE kombinasyonları kullanılarak gerçekleştirilen ikili şartlandırma deney sonuçlarından elde edilen KES<sub>0</sub>, KES<sub>100</sub>, yumak direnci ve zeta potansiyeli değerlerinin birbirlerine göre değişimleri Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmektedir.



Şekil 6. Hydrofloc CP 509 ve hydrofloc 7170 tipi PE'lerle ikili şartlandırmada doz- $KES_0$ ,  $KES_{100}$ , yumak direnci ve zeta potansiyeli değişimleri

Şekil 6'dan görüleceği gibi Hyd. Cp 509 tipi katyonik PE üzerine Hyd. 7170 tipi anyonik polielektrolit ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmada 3 mgPE /gr KM dozunda 12.10 sn.'lik en düşük  $KES_0$  değeri elde edilmiştir. Yine bu doz değerinde 8.20sn'lik en yüksek yumak direnci değerine ulaşılmıştır. Bu optimum noktada en iyi susuzlaşabilirlik ve en iyi yumak yapıları elde edilmiştir.  $KES_0$  ve  $KES_{100}$  arasındaki korelasyon da şekilden görülmektedir.

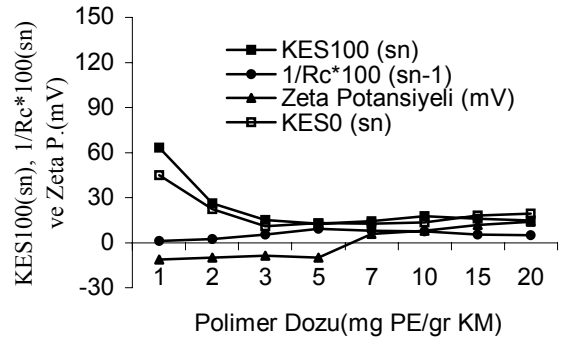


Şekil 7. Hydrofloc 7170 ve hydrofloc CP 509 tipi PE'lerle ikili şartlandırmada doz- $KES_0$ ,  $KES_{100}$ , yumak direnci ve zeta potansiyeli değişimleri

Şekil 7'den görüleceği gibi Hyd. 7170 tipi anyonik PE üzerine Hyd. CP 509 tipi katyonik PE ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmada 3 mgPE /gr KM dozunda 10.20 sn'lik en düşük  $KES_0$  değeri elde edilmiştir. 5 mgPE /gr KM

dozunda ise 9.28 sn<sup>-1</sup>'lik en yüksek yumak direnci değerine ulaşılmıştır. En güçlü yumaklar 5 mgPE/gr KM dozunda elde edilmiştir.

300rpm-180sn/45rpm-90sn+300rpm-180sn/ 45 rpm-90sn.'lik karıştırma şartında katyonik ve noniyonik PE kombinasyonları kullanılarak gerçekleştirilen ikili şartlandırma deney sonuçlarından elde edilen  $KES_0$ ,  $KES_{100}$ , yumak direnci ve zeta potansiyeli değerlerinin birbirlerine göre değişimleri Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmektedir.



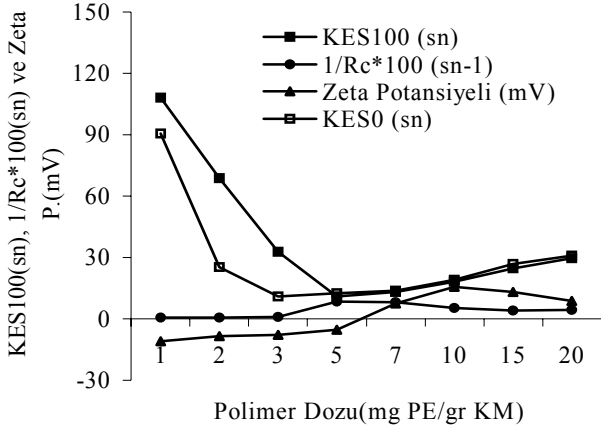
Şekil 8. Hydrofloc CP 509 ve hydrofloc 8000 tipi PE'lerle ikili şartlandırmada Doz- $KES_0$ ,  $KES_{100}$ , yumak direnci ve zeta potansiyeli değişimleri

Şekil 8'den görüleceği gibi Hyd. CP 509 tipi katyonik PE üzerine Hyd. 8000 tipi noniyonik polielektrolit ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmada 3 mgPE /gr KM dozunda 10.65 sn'lik en düşük  $KES_0$  değeri elde edilmiştir. 5 mgPE /gr KM dozunda ise 9.15sn<sup>-1</sup>'lik en yüksek yumak direnci değerine ulaşılmıştır. En güçlü yumaklar 5 mgPE/gr KM dozunda elde edilmiştir.

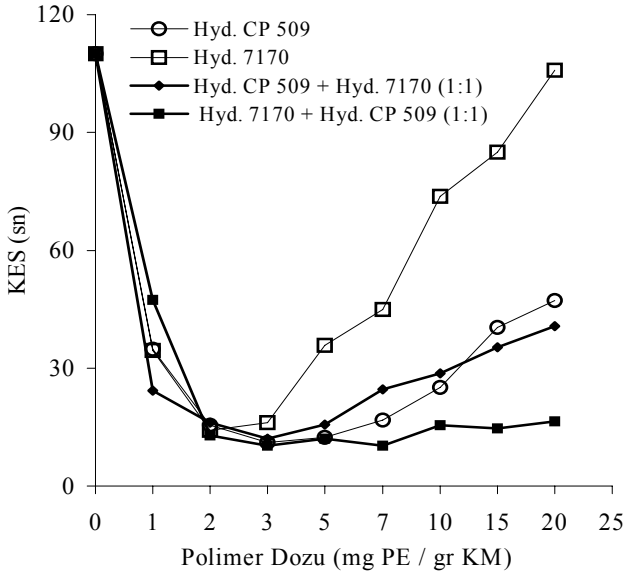
Şekil 9'dan görüleceği gibi Hyd. 8000 tipi noniyonik PE üzerine Hyd. CP 509 tipi katyonik PE ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmada 3 mgPE /gr KM dozunda 11.05 sn'lik en düşük  $KES_0$  değeri elde edilmiştir. 5 mgPE /gr KM dozunda ise 8.35sn<sup>-1</sup>'lik en yüksek yumak direnci değerine ulaşılmıştır. En güçlü yumaklar 5 mgPE/gr KM dozunda elde edilmiştir.

300rpm-180sn/45rpm-90sn'lik karıştırma şartında katyonik ve anyonik PE'lerle yapılan tekli şartlandırmadan ve 300rpm-180sn/45rpm-90sn

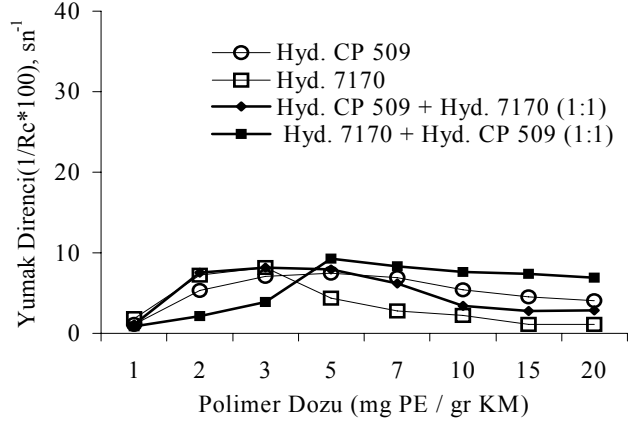
+300rpm-180sn/45rpm-90sn'lik karıştırma şartında katyonik+anyonik ve anyonik+katyonik PE kombinasyonları kullanılarak yapılan ikili şartlandırmadan doza bağlı olarak elde edilen KES değerlerindeki değişimler tekli ve ikili şartlandırmanın daha iyi yorumlanabilmesi için toplu halde Şekil 10'da, doza bağlı yumak direnci değişimleri Şekil 11'de ve yine doza bağlı zeta potansiyelindeki değişimler de Şekil 12'de gösterilmektedir.



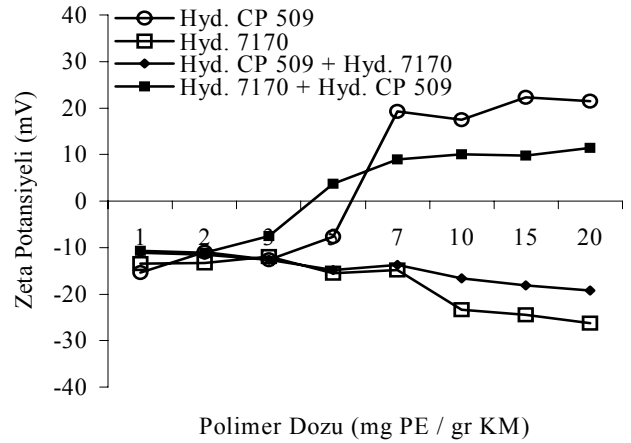
Şekil 9. Hydrofloc CP 509 ve hydrofloc 8000 tipi PE'lerle ikili şartlandırmada doz-KES<sub>0</sub>, KES<sub>100</sub>, yumak direnci ve zeta potansiyeli değişimleri



Şekil 10. Katyonik ve anyonik PE kullanılarak yapılan tekli ve ikili şartlandırmadaki doz-KES değişimleri



Şekil 11. Katyonik ve anyonik PE kullanılarak yapılan tekli ve ikili şartlandırmadaki doz-yumak direnci değişimleri



Şekil 12. Katyonik ve anyonik PE kullanılarak yapılan tekli ve ikili şartlandırmadaki doz-zeta potansiyeli değişimleri

Şekil 10'dan da görüleceği üzere tekli PE ile şartlandırmada katyonik PE ile şartlandırılan çamurun anyonik PE ile şartlandırılan çamurdan daha iyi bir susuzlaşma gösterdiği görülmektedir. Katyonik PE ile yapılan tekli şartlandırmada en düşük KES değeri 3mg PE/gr KM dozunda 11.10 sn olarak elde edilmektedir. İkili PE ile şartlandırmada ise, çamurun önce anyonik ve sonra da katyonik PE ile şartlandırılmasından elde edilen susuzlaşabilirliğin, çamurun önce katyonik sonra anyonik PE ile şartlandırılmasından elde edilen susuzlaşabilirlikten daha iyi olduğu görülmektedir. Anyonik PE üzerine katyonik PE ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmada en düşük KES değeri yine



3mgPE/gr KM dozunda 10.20 sn olarak elde edilmektedir. Elde edilen bu veriler çerçevesinde ikili şartlandırmanın tekli şartlandırmaya oranla nispeten daha iyi bir susuzlaşabilirlik sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca yine Şekil 10'dan görüleceği gibi sadece 3mgPE/grKM'lik optimum doz değerinde değil bu noktadan sonraki doz değerlerinde de susuzlaşabilirlik ikili şartlandırmada bariz şekilde daha iyidir.

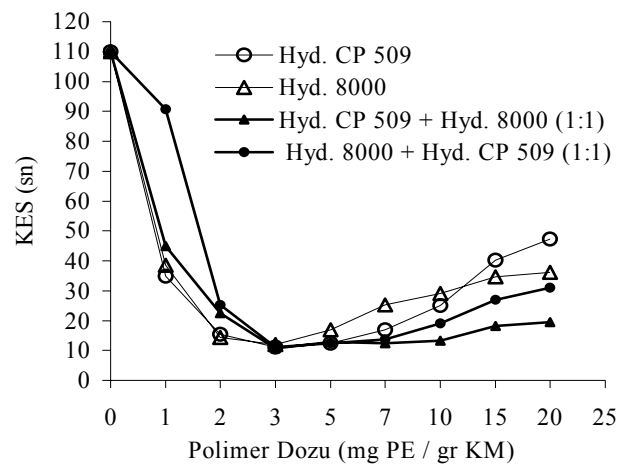
Şekil 11'de görüleceği üzere en güçlü yumaklar anyonik PE üzerine katyonik PE ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmadan elde edilmiştir. Bu kombinasyon kullanılarak yapılan ikili şartlandırmada 5 mgPE/gr KM dozunda elde edilen yumak direnci değeri  $9.28\text{sn}^{-1}$ 'dir. Optimum doz değerine kadar tekli ve ikili şartlandırmada elde edilen yumakların direnci arasında anlamlı farklar olmamasına rağmen optimum noktadan sonra ikili şartlandırmadan elde edilen yumakların daha güçlü olduğu görülmektedir.

Şekil 12'de görüleceği üzere tekli şartlandırma yapılarak ölçülen zeta potansiyeli eğrileri tam olarak ilave edilen polimerlerin etkileşim mekanizmalarını göstermektedir. Bu da susuzlaşabilirlik ile zeta potansiyeli arasında ilişki kurulmasına olanak sağlar İkili şartlandırmadaki zeta potansiyeli değerleri iki PE'nin etkileşiminden sonraki değerleri gösterdiğinden yumak etkileşimlerini tam olarak göstermemektedir. Anyonik PE üzerine katyonik PE ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmada reaksiyonların şu şekilde gerçekleştiği düşünülmektedir: İkili şartlandırmada alum çamuru üzerine ilk ilave edilen Hyd. 7170 tipi PE negatif yüklü bir PE'dir Şartlandırmanın ilk aşamasında her iki grubun da aynı yükte olmasından dolayı muhtemelen köprüleme mekanizması hakim olmaktadır. Kimyasal kuvvetler elektriksel itme ve çekme kuvvetinin üstesinden gelmiş olabileceği için adsorpsiyon oluşmuştur. Anyonik PE partikülün bir veya birden fazla yüzeyi üzerine adsorbe olmuştur. Çözelti içerisinde polimer zincir halkalarının uzanarak diğer alum partiküllerinin boş yüzeyine bağlanmış olmaları muhtemeldir. Böylelikle köprüleme mekanizması gerçekleşir. İlk etapta oluşan yumak yapıları çok güçlü değildir. Bu yüzden tekli şartlandırmada anyonik PE kulla-

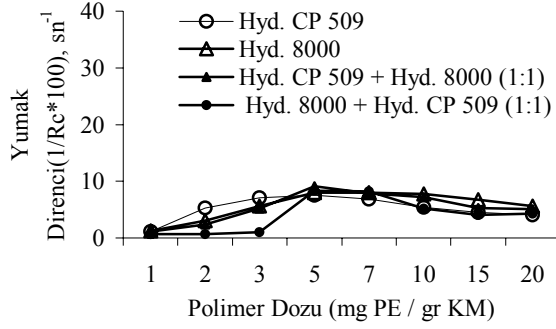
nılarak elde edilen değerler iyi sonuçlar vermiştir. PE ilavesinden önce partikül etrafındaki eksi yük yoğunluğu belirli bir miktarda iken anyonik PE'nin partiküller üzerine adsorbe olmasıyla ortamda eksi yük yoğunluğu çok fazla artmıştır. İkinci olarak katyonik PE'nin ilave edilmesiyle muhtemelen zıt yük farkından dolayı elektriksel çekme kuvveti oluşmuş ve yük nötralizasyonu optimum seviyede gerçekleşmiştir. Dolayısıyla minimum iyi bir susuzlaşabilirlik elde edilmiştir.

Alum çamuru üzerine ilk önce katyonik PE'nin ilave edilmesiyle yük nötralizasyonu oluştuğu varsayılır. Böylelikle destabil hale gelen partiküllerin bir araya gelmeleri kolaylaşır. İkinci olarak anyonik PE ilave edilmesiyle de köprüleme mekanizması gerçekleşir.

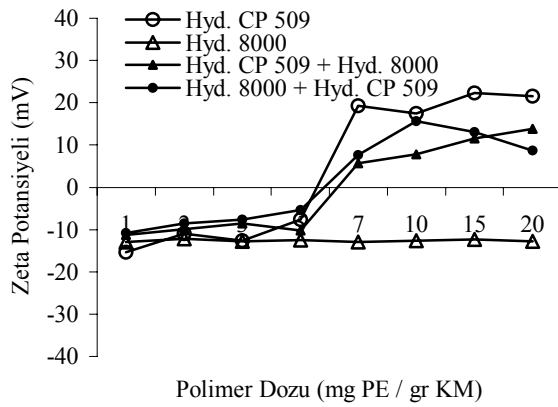
300rpm-180sn/45rpm-90sn'lik karıştırma şartında katyonik ve noniyonik PE'lerle yapılan tekli şartlandırmadan ve 300rpm-180sn/45rpm-90sn + 300rpm-180sn/45rpm-90sn'lik karıştırma şartında katyonik+noniyonik ve noniyonik+katyonik PE kombinasyonları kullanılarak yapılan ikili şartlandırmadan doza bağlı olarak elde edilen KES değerlerindeki değişimler toplu halde Şekil 13'de, doza bağlı yumak direnci değişimleri Şekil 14'de ve yine doza bağlı zeta potansiyelindeki değişimlerde Şekil 15'de gösterilmektedir.



Şekil 13. Katyonik ve noniyonik PE kullanılarak yapılan tekli ve ikili şartlandırmadaki doz-KES değişimleri



Şekil 14. Katyonik ve anyonik PE kullanılarak yapılan tekli ve ikili şartlandırmadaki doz-yumak direnci değişimleri



Şekil 15. Katyonik ve noniyonik PE kullanılarak yapılan tekli ve ikili şartlandırmadaki doz-zeta potansiyeli değişimleri

Şekil 13'den tekli PE ile şartlandırmada, katyonik PE ile şartlandırılan çamurun noniyonik PE ile şartlandırılan çamurdan daha iyi bir susuzlaştırma gösterdiği görülür. İkili PE ile şartlandırmada ise, çamurun önce katyonik ve sonra noniyonik PE ile şartlandırılmasından elde edilen susuzlaşabilirliğin çamurun önce noniyonik sonrada katyonik PE ile şartlandırılmasından elde edilen susuzlaşabilirlikten daha iyi olduğu görülmektedir. Önce noniyonik sonra da katyonik PE ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmadan da tekli şartlandırmaya göre daha iyi susuzlaşabilirlik elde edilmiştir. Katyonik PE üzerine noniyonik PE ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmada en düşük KES değeri 3mgPE/gr KM dozunda 11.65 sn olarak elde edilmiştir. Katyonik PE ile yapılan tekli şartlandırmada ise en düşük KES değeri 3mg PE/gr KM dozunda

11.10 sn olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler çerçevesinde katyonik ve noniyonik PE kombinasyonu kullanılarak yapılan bu ikili şartlandırmanın tekli şartlandırmaya oranla daha iyi bir susuzlaşabilirlik sağladığı görülmektedir. Şekil 14'de görüleceği üzere en güçlü yumaklar katyonik PE üzerine noniyonik PE ilave edilerek yapılan ikili şartlandırmadan elde edilmiştir. Bu kombinasyon kullanılarak yapılan ikili şartlandırmada 5 mgPE/gr KM dozunda elde edilen yumak direnci değeri 9.15sn<sup>-1</sup>'dir.

Çamur ilk olarak katyonik PE ile şartlandırıldığı zaman önce katyonik PE çamur partikülleri üzerine adsorbe olmakta ve ilk yumak oluşmaktadır. Sonradan ilave edilen noniyonik PE'nin hidrojen bağı ve van der Waals kuvvetlerinden dolayı katyonik PE'nin kuyruk ve halkaları üzerine adsorbe olduğu düşünülmektedir. Negatif yüklü çamur yüzeyleri ve katyonik PE'ler arasında elektrostatik etkileşimden dolayı oldukça kompakt ön yumaklar oluşur. Daha sonra noniyonik PE'lerin ilave edilmesiyle bu yumaklar daha geniş ve kuvvetli yumaklara dönüşür. Geniş ve kuvvetli yumaklar susuzlaşabilirliğin artmasını sağlar.

## Sonuçlar ve tartışma

Alum çamurlarında, tekli şartlandırma yerine, iki farklı kimyasal ardışık olarak uygulamak suretiyle yapılan ikili şartlandırma ile daha verimli bir şartlandırma yapıp yapılamayacağının ve şartlandırmayı etkileyen karışım şartlarının optimizasyonu gayesi ile yapılan bu çalışmadan çıkarılan başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Yüksek moleküler ağırlıklı katyonik (Hyd. CP. 509), anyonik (Hyd. 7170) ve noniyonik (Hyd. 8000) PE'lerle yapılan tekli şartlandırmada en iyi susuzlaştırma katyonik PE kullanımından elde edilmiştir. Katyonik PE kullanılarak yapılan şartlandırmada optimum doz aralığı 3-5 mgPE/gr KM, anyonik PE kullanılarak yapılan tekli şartlandırmada optimum doz aralığı 2-5 mgPE/gr KM ve noniyonik PE kullanılarak yapılan şartlandırmada optimum doz aralığı ise yine 3-5 mgPE/gr KM olarak elde edilmiştir.

2. Tez kapsamında alum çamuru kullanılarak yapılan bütün deneylerde Yumak direnci ile KES<sub>100</sub> arasında belirgin korelasyonlar elde edilmiştir. 100 saniye gerçek susuzlaşma ekipmanlarında karşılaşılabilecek kesme kuvvetine maruz kalma sürelerine yakın değerler olduğu için bu korelasyonların elde edilmesi susuzlaşabilirliğin kıyaslanması açısından önemlidir.

3. Tekli şartlandırma yapıldıktan sonra ölçülen zeta potansiyeli değerlerinde polimer ve partikül etkileşimlerini yorumlamak mümkün olmuştur. Bu yüzden tekli şartlandırmada zeta potansiyeli değerleri susuzlaşabilirliğin yorumlanmasında kullanılabilir bir parametre olarak kabul edilebilir. Ancak ikili şartlandırmada elde edilen zeta potansiyeli okumaları her iki PE'nin etkileşiminden sonraki değerleri yansıttığı ve dolayısıyla da ara polimer-partikül etkileşimleri göstermediğinden susuzlaşabilirliğin değerlendirilmesinde etkili bir parametre değildir.

4. İkili PE ile şartlandırmada, çamurun önce anyonik ve sonra katyonik PE ile şartlandırılmasında, çamurun önce katyonik sonra anyonik PE ile şartlandırılmasından daha iyi bir susuzlaştırma elde edilmiştir. Katyonik ve anyonik PE kombinasyonları kullanılarak yapılan ikili şartlandırmadan elde edilen susuzlaştırmanın katyonik ve anyonik PE'lerin ayrı ayrı kullanılmasıyla yapılan tekli şartlandırmadan elde edilen susuzlaştırmadan nispeten daha iyi olduğu görülmüştür. Ancak alum çamuru kullanılarak katyonik ve anyonik PE kombinasyonları ile yapılan tekli ve ikili şartlandırma deney sonuçlarından elde edilen verilere göre, ikili ve tekli şartlandırmadan elde edilen susuzlaşabilirlikler arasında özellikle optimum noktalara kadar anlamlı sayılabilecek farkların oluşmadığı gözlenmiştir. Optimum dozajdan fazla dozlarda ise ikili şartlandırmadan elde edilen susuzlaşabilirliğin tekli şartlandırmada elde edilen susuzlaşabilirliğe göre daha belirgin ve anlamlı olduğu görülmüştür. Katyonik ve anyonik PE kullanılarak yapılan ikili şartlandırmada elde edilen yumak güçlerinin tekli şartlandırmaya oranla ve özellikle optimum dozdan sonraki doz değerlerinde belirgin şekilde iyi olduğu görülmüştür. İkili şartlandırmadan elde edilen yumakların yumak yapıları

daha iyi ve gerilmeler karşısındaki deformasyonları tekli şartlandırmada elde edilen yumaklara göre daha az olarak elde edilmiştir.

5. İkili PE ile şartlandırmada, çamurun önce katyonik sonrada noniyonik PE ilave edilerek şartlandırılmasından elde edilen susuzlaşabilirliğin çamurun önce noniyonik sonra da katyonik PE ilave edilerek şartlandırılmasından elde edilen susuzlaşabilirlikten daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca hem noniyonik+katyonik ve hem de katyonik+noniyonik PE kombinasyonları kullanılarak yapılan ikili şartlandırmalardan elde edilen susuzlaşabilirliklerin tekli şartlandırma yapılarak elde edilen susuzlaşabilirliklerden daha iyi olduğu görülmüştür. Katyonik ve noniyonik PE kombinasyonları kullanılarak yapılan ikili şartlandırmadan elde edilen yumakların her bir PE'nin tekli şartlandırma yapılmasından elde edilen yumaklardan daha güçlü olduğu görülmüştür.

6. Yumak direnci yumakların susuzlaştırma ekipmanlarında karşılaştıkları kesme kuvvetleri karşısında kolaylıkla parçalanmamasını gösteren bir parametre olup çamur şartlandırılmasında sadece KES ve özgül direnç gibi parametrelerin yanında dikkate alınması gereken bir parametredir. Bu çalışmada yumak direncini en üst seviyeye çıkarmak için şartlandırmada uygulanacak karıştırma şiddetinin şartlandırıcı dozuna göre değiştiği ve yüksek dozlarda yüksek karıştırma şiddetleri uygulamak suretiyle elde edilen yumakların direncinin yüksek olduğu görülmüştür. Santrifüj gibi yüksek kesme kuvvetlerinde çalışan susuzlaştırma ekipmanları için şartlandırma yapılacağı zaman karıştırma şiddetinin uygulamalarda kullanılan değerlerden daha yukarda olması gerektiği görülmüştür.

## Kaynaklar

- Aixing, F., Nicholas, J., Somasundaran, P., (2000). A study of dual polymer flocculation, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **162**, 141-148.
- Campbell, H.W., ve Crescuola, P.J., (1989). Control of Polymer Addition for Sludge Conditioning: A demonstration study, *Water Science and Technology*, **21**, 1309-1317.

- Chitikela, S., Dentel, S.K., (1998). Dual-chemical conditioning and dewatering of anaerobically digested biosolids: laboratory evaluations, *Water Environment Research*, **70**, 5, 1062-1069.
- Christensen, J.R., Sorensen, P.B., Christensen, G.L., Hansen, J.A., (1993). Mechanism for overdosing in sludge conditioning, *Journal of Environmental Engineering*, **119**, 1, January/February, ASCE.
- Eriksson, L., Alm, B. ve Alden, Y., (1989). Relations between flocculation mechanism, floc structures and separation properties. Proc. Eng. Found. Conf. Newyork, 179-193
- Eriksson, L., ve Alm, B., (1993). Characterization of activated sludge and conditioning with cationic polyelectrolytes, *Water Science and Technology*, **28**, 1, 203-212.
- Glasgow, L.A., (1982). An experimental study of floc strength, *Jche Journal*, **28**, 5, 779-785.
- Gregory, J., (1985). The Action of Polymeric Flocculants, Department of Civil Engineering University College London, Gower Street London WC1E 6 BT England.
- Lee, C.H. ve Liu, J.C., (2000). Exchange sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning, *Water Research*, **34**, 18, 4430-4436.
- Lee, C.H., Liu, J.C., (2001). Sludge dewaterability and floc structure in dual polymer conditioning, *Advance in Enviromental Research*, **5**, 129-136.
- Novak, J., Haugan, B., (1980). Mechanism and methods for polymer conditioning of activated sludge, *Journal WPCF*, **52**, 10, 2571-2580.
- Pan, J., Huang, C., ve Gang Fu, C., (2000). Effect of surfactant on alum sludge conditioning and dewatering, *Water Science and Technology*, **41**, 8, 17-22.
- Senthilnathan, P.R., ve Sigler, R.G., (1993). Improved sludge dewatering by dual polymer conditioning, *Water Science and Technology*, **28**, 1, 53-57.
- Sharma, M.G., Yan, Y, Graeme J.J., Biggs, S., (2003). Dewatering properties of dual-polymer-flocculated systems, *International journal of mineral processing*, 1652-1666.
- Stratton, R.A., (1983). *Tappi Journal*, **66**, 3, 141.
- Swerin, A., Glad, G., Nordmark, ve Ordberg, L., (1997). Adsorption and flocculation in suspensions by two cationic polymers- Simultaneous and sequential addition, *Journal of pulp and paper science*, **23**, 8, August, 389-393.
- Lotito, V., Minini, G. ve Spinosa, L., (1990). Models of sewage sludge conditioning, *Water Science and Technology*, **22**, 12, 163-172.
- Yu, X., Somasundaran, P., (1993). Enhanced flocculation with double flocculants *Colloids and Surfaces a: Physicochemical and Engineering Aspects*, **81**, 17-23.