

Evsel Atıksuların Fizikokimyasal Arıtımında Uçucu Külün Koagulant Olarak Kullanım Olanakları

Bülent SARI, Belgin BAYAT

*Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
Çevre Mühendisliği Bölümü, Balcalı, 01330 Adana-TÜRKİYE*

Geliş Tarihi 11.01.2000

Özet

Bu çalışmada, evsel atıksularda uçucu külün koagulant olarak etkinliği alüminyum sülfat ve demir klorür gibi koagulantlarla karşılaştırılarak incelenmiştir. Deneylerde; ülkemizdeki dört farklı termik santraldan temin edilen farklı kimyasal bileşimlere sahip uçucu kül örnekleri kullanılmıştır. Uçucu küllerle yapılan pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemlerinde etkin mekanizmanın, pH ve uçucu külün kimyasal bileşimine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Uçucu külün koagülant olarak etkinliği kalsiyum içeriğinin artmasıyla artmaktadır. En yüksek arıtma verimleri %77 kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), %73 biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ₅), %98 askıda katı madde (AKM) ve %95 bulanıklık giderimi ile Yeniköy Termik Santrali'nden çıkan uçucu kül kullanılarak elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Uçucu kül, Pıhtılaştırma-yumaklaştırma, Evsel atıksular.

Use of Fly Ash as a Potential Coagulant in the Physico-Chemical Treatment of Domestic Wastewater

Abstract

The effectiveness of fly ash as a coagulant for domestic wastewater treatment was investigated and compared with aluminium sulfate and ferric chloride. In these experiments, four fly ash samples with different chemical compositions obtained from different coal-fired power plants in Turkey were used. In all coagulation-flocculation experiments using fly ash, it was apparent that the predominant removal mechanism varied with the pH and the chemical components of the fly ash. According to our results, the effectiveness of fly ash as a coagulant improves with increasing calcium content. The highest removal efficiency (77% chemical oxygen demand [COD], 73% biochemical oxygen demand [BOD], 98% suspended solid [SS] and 95% turbidity) was attained with fly ash from the Yeniköy Power Plant.

Key Words: Fly ash, Coagulation-flocculation, Domestic wastewater.

Giriş

Ülkemizde enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla kurulan ve yakın gelecekte de kurulması kaçınılmaz olan termik santrallarda kömür kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Buna paralel olarak kömürün

yakılması sonrası büyük miktarlarda uçucu kül oluşmaktadır. Ülkemizde 1993 yılında yaklaşık 10 milyon ton uçucu kül katı atık olarak ortaya çıkmıştır (Yiğit, 1994). Uçucu küller genellikle termik santral yakınlarındaki atık depolama alanlarına dökülerek yığılmaktadır. Dünyada oluşan uçucu

külün %10'dan daha azı dolgu malzemesi, yol, baraj ve köprü yapımı, biriket, tuğla ve çimento imalatı, atıksu arıtımında koagulant ve adsorbant olarak kullanılmaktadır (Reed ve diğerleri, 1976).

Uçucu kül; yüksek karbon içeriği, birim hacimdeki geniş yüzey alanı ve içerdiği Al, Fe, Ca, Mg ve Si gibi elementlerden dolayı bir çok organik kirleticiyi uzaklaştırma kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle uçucu küllerin etkili bir koagulant ve adsorbant olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir (Johnson ve diğerleri, 1965; Deb ve diğerleri, 1967; Cheremisinoff, 1988; Vandenbusch ve Sell, 1992). Johnson ve diğerleri (1965), kanalizasyon sularının arıtıldığı ikincil arıtma çıkış sularını kullanarak uçucu külün kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve alkil benzen sülfonat (ABS) giderimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada kullanılan maksimum uçucu kül dozunda (8000 mg/L) maksimum KOİ (%56) ve ABS (%74) giderimleri tespit edilmiştir. Deb ve diğerleri (1967), evsel atıksuların arıtıldığı uzun havalandırma aktif çamur sistemi çıkış sularında uçucu külle KOİ giderimi üzerine çalışmış ve uçucu külün KOİ adsorpsiyonunun karıştırma süresi, başlangıç KOİ konsantrasyonu ve uçucu kül konsantrasyonu ile logaritmik olarak ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Cheremisinoff (1988) yaptığı çalışmada, uçucu kül ve kireç ile yapılan pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemlerinin sonunda yüksek oranda askıda katı madde (AKM) giderimi sağlandığını bildirmiştir. Vandenbusch ve Sell (1992) tarafından yapılan çalışmada ise ham ve asidifiye edilmiş formdaki uçucu kül, evsel ve endüstriyel atıksu karışımına uygulanan pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminde koagulant olarak kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda uçucu külün atıksulardan arıtılması güç organik maddeleri ve renk parametresini gidermede önemli bir potansiyele sahip olduğu belirtilerek ham küle nazaran asidifiye edilmiş uçucu kül çözeltisi ile daha yüksek arıtma verimleri elde edildiği bildirilmiştir.

Bu çalışmada, uçucu külün koagulant olarak etkinliği, ticari kullanımı yaygın alüminyum sülfat ve demir klorür gibi koagulantlarla karşılaştırılarak incelenmiş ve uçucu küllerle yapılan pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemleri sırasında etkin olan mekanizmalar belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla evsel atıksulardan KOİ, BOİ₅, AKM ve bulanıklık giderme verimleri incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Uçucu kül

Bu çalışmada kullanılan dört farklı uçucu kül örneği; Afşin-Elbistan, Yeniköy, Çatalağzı ve Seyitömer termik santrallerinden temin edilmiştir. Çatalağzı termik santralında yakıt olarak taşkömürü kullanılırken, diğerlerinde linyit kömürü kullanılmaktadır (Bayat, 1995). Uçucu küllerin kimyasal bileşimi kullanılan kömürün özelliklerine ve yanma verimliliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu yüzden kullanılan her bir uçucu kül örneğinin pH, partikül boyutu, elemental analizleri ve içerdiği elementlerin sudaki çözünürlükleri tespit edilmiştir (Bayat, 1998). Bu analizlere göre uçucu kül örneklerinin doyguluk pH'ları 10,5-12,8 arasında değişmektedir (Şekil 1). Bütün uçucu kül örnekleri çok ince tane boyutuna sahiptir. Afşin-Elbistan, Yeniköy ve Çatalağzı uçucu küllerinin ağırlıkça %50'si, Seyitömer uçucu külünün ise ağırlıkça %15'i 0,075mm'den küçüktür (Şekil 2). Hidroflorik asit (HF) eritisi içeren yaş kimyasal analiz ve atomik absorpsiyon spektrofotometre (AAS) (Perkin Elmer, Model 3100) kullanılarak yapılan elemental analiz sonuçları, Afşin-Elbistan ve Yeniköy uçucu küllerine göre Çatalağzı ve Seyitömer uçucu küllerinin oldukça yüksek silisyum dioksit (SiO₂), alüminyum oksit (Al₂O₃), demir oksit (Fe₂O₃) ve oldukça düşük kalsiyum oksit (CaO) içeriğine sahip olduğunu göstermektedir (Tablo 1). Uçucu kül kullanımının veya bertarafının çevresel etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için uçucu kül bünyesindeki farklı kimyasal bileşenlerin çözünme özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla uçucu kül numunesinden 1 g örnek alınarak 200ml saf su içerisinde 2 saat karıştırılarak bekletilmiştir. 2 saat sonra çözelti filtre edilmiş ve süzüntüdeki iyonlar AAS ile tespit edilmiş ve bu değerler Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi, özellikle Afşin-Elbistan ve Yeniköy uçucu külleri çözünürlüğü oldukça yüksek Ca içermektedir (Bayat, 1998).

Daha önce yapılan çalışmalarda da belirtildiği gibi uçucu külün başlıca içerdiği bileşikler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO olup bu bileşiklerin her biri atıksulardan KOİ, BOİ₅, AKM ve bulanıklık gibi parametrelerin pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemi ile gideriminde koagulant veya adsorbant olarak önemli bir etkiye sahip olabilirler (Johnson ve diğerleri, 1965; Deb ve diğerleri, 1967; Cheremisinoff, 1988; Vandenbusch ve Sell, 1992). Ayrıca uçucu külün içeriğindeki CaO'in küldeki oranı ve su içindeki çö-

Tablo 1. Koagulant olarak kullanılan uçucu kül örneklerinin Kimyasal Bileşimi (Bayat, 1998).

Element Oksit (%)	Uçucu Küller			
	Afşin-Elbistan	Yeniköy	Çatalağzı	Seyitömer
SiO ₂	15,14	15,35	47,69	53,50
Al ₂ O ₃	7,54	5,54	24,31	15,71
Fe ₂ O ₃	3,30	3,52	4,48	8,81
CaO	23,66	25,62	0,20	0,29
MgO	4,50	2,61	1,00	2,94
K ₂ O	0,28	0,41	3,50	1,19
Na ₂ O	0,57	0,27	0,58	0,77
TiO ₂	1,03	0,63	1,50	0,12
SO ₃	13,22	20,86	0,57	1,11
Cd*	8	8	4	-
Pb*	80	40	119	79
Zn*	80	71,6	138,3	112,6
Cu*	40	40	99	98
Cr*	298	80	138	455
Ni*	119	80	119	1976
Mn*	219	457	790	790
Kızdırma kaybı (%)	2,31	1,33	1,87	3,78

* mg ℓ^{-1} **Tablo 2.** Uçucu kül bünyesindeki elementlerin sudaki çözünürlükleri (Bayat, 1998).

Uçucu Kül	Element (mg ℓ^{-1})														
	Si	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	Ti	Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Ni	Mn
Afşin-Elbistan	3,1	0,2	-	280	3,6	1,0	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Yeniköy	-	0,5	-	490	0,9	6,0	9,0	-	-	-	-	-	-	-	-
Çatalağzı	0,7	-	-	30	2,4	1,0	4,0	-	-	0,2	1,9	-	-	-	-
Seyitömer	5,0	0,5	-	30	0,9	3,0	6,0	-	-	0,2	0,2	-	-	-	-

zünme oranı ayrı bir önem taşımakta olup, her iki oranın artması pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminin veriminin artmasını sağlayabilir. Bu açıdan araştırmada kullanılan uçucu küller Tablo 1 ve Tablo 2'deki veriler göz önünde bulundurulurken değerlendirilirse Yeniköy Termik Santral uçucu külünün diğer küllere göre atıksulardan bu parametreleri gidermede daha etkili olması beklenilebilir.

Atıksu özellikleri

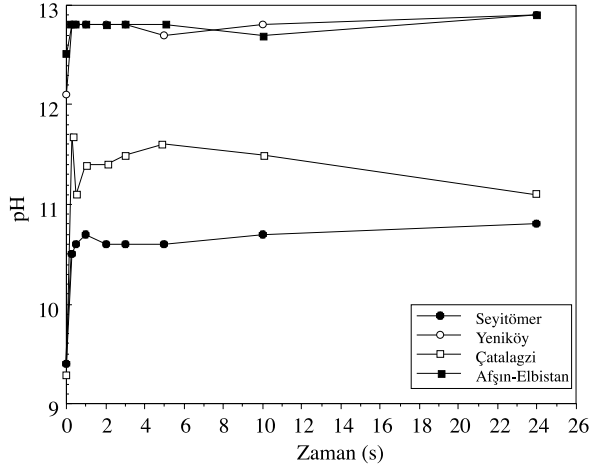
Çalışmanın bu aşamasında, deneysel çalışmada kullanılan evsel atıksuların özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Evsel atıksular Adana şehir kanalizasyon şebekesinden temin edilmiştir. Bütün numuneler 2 saatlik kompozit numuneler halinde alınmıştır. Deneylerden önce herbir numunenin sıcaklık, pH, bulanıklık, KOİ, BOİ₅ ve AKM analizleri yapılarak özellikleri belirlenmiştir. Bulanıklık ölçümleri TS 266'ya göre Bausch-Lomb Spektrometrisi

serisi No.21 spektrofotometre kullanılarak tespit edilmiştir. KOİ, BOİ₅ ve AKM analizleri ise atıksu analizlerinde kullanılan Standart Metodlar'a uygun olarak yapılmıştır (Standart Methods, 1985). Kullanılan evsel atıksuyun özellikleri Tablo 3'de verilmiştir. Tablodaki değerlere göre Adana şehir kanalizasyon şebekesinden alınan evsel atıksular orta-güçlü karakterli atıksu sınıfına girmektedir (Tchobanoglous ve Burton, 1991).

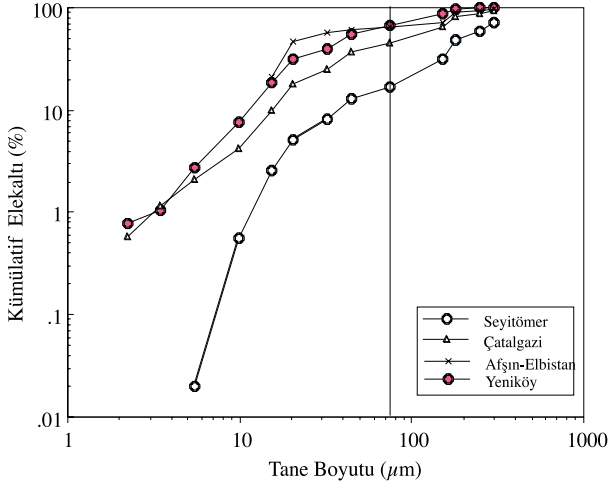
Pıhtılaştırma-yumaklaştırma deneyleri (Jar-Test)

Uçucu külün evsel atıksu arıtımında koagulant olarak etkinliğini belirlemek için 900 cm³ hacimli atıksu numuneleri 1000 cm³'lük 6 adet behere konularak, laboratuvar ortamında hızı 0-120 dev dak⁻¹ arasında ayarlanabilen altı pedallı jar-test düzeneğinde (Six Paddle Stirrer-Phipps & Bird Inc.) pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemine

tabi tutulmuştur. Ham uçucu küllerin hazırlanmış çeşitli dozlarının (1000-2000-3000-4000-5000 ve 6000 $\text{mg } \ell^{-1}$) her bir behere ilavesinden ve istenilen ortam pH'ı 2N H_2SO_4 ve NaOH ile ayarlandıktan hemen sonra atıksu numunelerine 2 dak süreyle 100 dev dak^{-1} hızda hızlı karıştırma, 30 dak süreyle 60 dev dak^{-1} hızda yavaş karıştırma ve oluşan yumakların çökmesi için 30 dak çöktürme işlemi uygulanmıştır. Çöktürme işlemi sonunda beherlerin üst kısmından 300 cm^3 su numunesi sifonla alınarak KOİ, BOİ₅, AKM ve bulanıklık parametreleri incelenmiştir. Ortam pH'ı 2 den 12 ye kadar değişen aynı deney serileri karşılaştırma yapmak amacıyla alüminyum sülfat ve demir klorürün çeşitli dozları kullanılarak (150-300-450-600-750 ve 900 $\text{mg } \ell^{-1}$) tekrar edilmiştir.



Şekil 1. Uçucu küllerin doygunluk pH'ları (Bayat, 1998).



Şekil 2. Uçucu küllerin tane boyut dağılımı (Bayat, 1998).

Her bir uçucu kül örneği, alüminyum sülfat ve demir klorür kullanılarak yapılan pıhtılaştırma-

yumaklaştırma işlemleri için optimum koşullar (koagulant dozu ve pH) jar test serileri ile saptanmıştır. Pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemi daha çok atıksulardan AKM giderimi için uygulandığından optimum koşulların belirlenmesinde çöktürme işlemi sonrası arıtılmış suyun AKM değerinin, Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği (SKKY, 1988) evsel nitelikli atıksular için deşarj standartları, 2 saatlik kompozit numune AKM değerine eşit ve daha az olması ($\leq 45 \text{ mg/L}$) dikkate alınmıştır (Tablo 4).

Tablo 3. Pıhtılaştırma - yumaklaştırma işleminde kullanılan ham evsel atıksuyun özellikleri.

Parametre	Değer
Sıcaklık	27 ($^{\circ}\text{C}$)
pH	8,5
Elektriksel İletkenlik (Eİ)	($\mu\text{S/cm}$) 1047
KOİ	($\text{mg } \ell^{-1}$) 536
BOİ ₅	($\text{mg } \ell^{-1}$) 327
AKM	($\text{mg } \ell^{-1}$) 162
Toplam Kjeldal Azotu (TKN)	($\text{mg } \ell^{-1}$) 16
Toplam Fosfor (TP)	($\text{mg } \ell^{-1}$) 5
Bulanıklık	(Ntu) 140

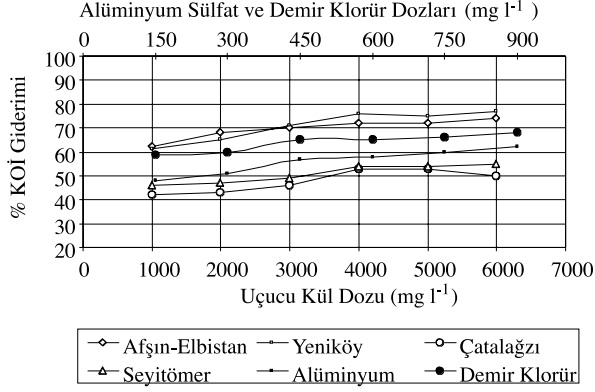
Tablo 4. Optimum koşulların belirlenmesinde kullanılan evsel nitelikli atıksular için alıcı ortam deşarj standartları (Sınıf 3: Kirlilik yükü ham BOİ₅ olarak 600 kg/gün ' den büyük, nüfus (10000) (SKKY, 1988).

Parametre	Birim	Kompozit Numune 2 saatlik
pH		6-9
KOİ	($\text{mg } \ell^{-1}$)	140
BOİ ₅	($\text{mg } \ell^{-1}$)	50
AKM	($\text{mg } \ell^{-1}$)	45

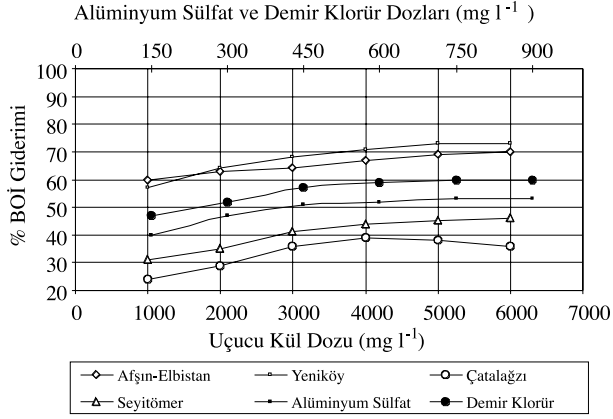
Deney Sonuçları ve Tartışma

Evsel atıksularda uçucu küllerle yapılan jar-test deneylerinde Afşin-Elbistan, Yeniköy, Çatalağzi ve Seyitömer termik santrallerinden temin edilen uçucu küllerin koagulant olarak etkinliği alüminyum sülfat ve demir klorür gibi koagulantlarla karşılaştırılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Yeniköy uçucu külü için 7, Afşin-Elbistan, Seyitömer, Çatalağzi uçucu külleri ile $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ için 7,5 ve FeCl_3 için ise 8-8,5 olarak belirlenen optimum pH ortamında yapılan

pihtılaştırma-yumaklaştırma deney serilerinde kullanılan her bir koagulant madde (uçucu kül, alüminyum sülfat, demir klorür) dozuna karşılık giderilen KOİ, BOİ₅, AKM ve bulanıklık değerleri sırasıyla Şekil 3, 4, 5 ve 6'da verilmektedir.



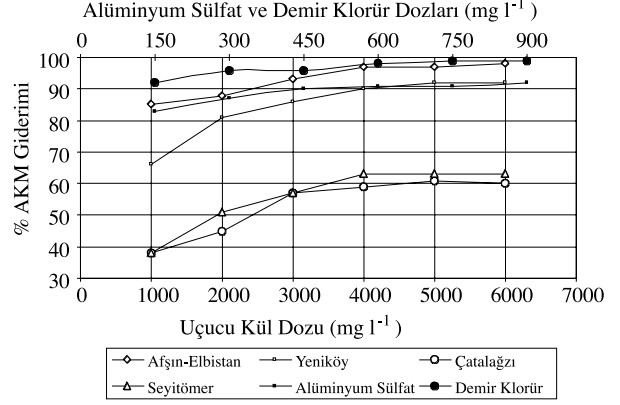
Şekil 3. Evsel atıksularda uçucu kül, alüminyum sülfat ve demir klorürle elde edilen KOİ giderme verimlerinin karşılaştırılması.



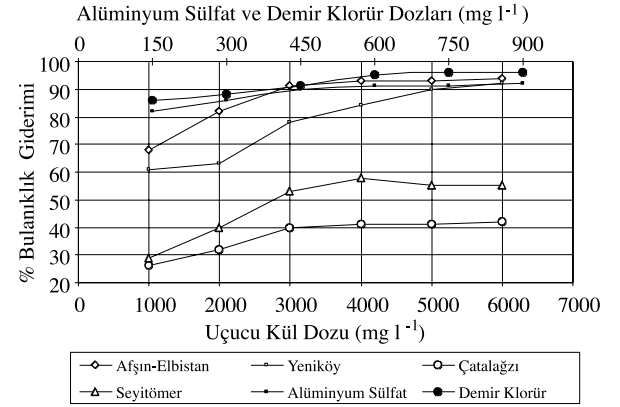
Şekil 4. Evsel atıksularda uçucu kül, alüminyum sülfat ve demir klorürle elde edilen BOİ₅ giderme verimlerinin karşılaştırılması.

Şekil 3'de görüldüğü gibi uygulanan optimum dozda (4000 mg l⁻¹) Yeniköy uçucu külü ile %76 KOİ giderimi sağlanırken bunu %72 ile Afşin-Elbistan, %54 ile Seyitömer ve %53 ile Çatalağzı uçucu külü takip etmektedir. Aynı şekilde uygulanan optimum dozda Yeniköy uçucu külü ile %71, Afşin-Elbistan uçucu külü ile %67, Seyitömer uçucu külü ile %44 ve Çatalağzı uçucu külü ile %39 BOİ₅ giderme verimi elde edilmiştir (Şekil 4). Diğer parametreler için uçucu kül sıralaması; Afşin-Elbistan, Yeniköy, Seyitömer ve Çatalağzı şeklinde olup optimum dozda sırası ile %97, %90, %63 ve %59 AKM

giderimi (Şekil 5), %93, %84, %58 ve %41 bulanıklık giderimi (Şekil 6) gözlenmiştir.



Şekil 5. Evsel atıksularda uçucu kül, alüminyum sülfat ve demir klorürle elde edilen AKM giderme verimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 6. Evsel atıksularda uçucu kül, alüminyum sülfat ve demir klorürle elde edilen bulanıklık giderme verimlerinin karşılaştırılması.

Bu elde edilen sonuçlara göre kullanılan dört uçucu kül örneğinin ikisi (Afşin-Elbistan ve Yeniköy), diğer ikisine (Çatalağzı ve Seyitömer) oranla tüm parametreler için daha yüksek giderme verimlerine sahiptir. Ayrıca benzer fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip uçucu kül örnekleri ile tüm parametreler için hemen hemen aynı oranda giderim elde edilmiştir (Şekil 1-2, Tablo 1-2). Bunun nedeni uçucu küllerin koagulant ve/veya adsorban özelliklerinin belirlenmeye çalışıldığı daha önceki çalışmalarda belirtildiği gibi uçucu külün içeriğindeki Si, Al, Fe, Ca, Mg ve C gibi başlıca elementlerin konsantrasyon değerleri ile sudaki çözünürlük oranları olabilir. Çünkü uçucu kül bünyesinde bulunan bu elementler pihtılaştırma-yumaklaştırma

işlemi sırasında önemli rol oynamaktadır (Mancy ve diğerleri, 1965; Smith ve Condra, 1983; Vandenbusch ve Sell, 1992).

Kullanılan uçucu küller; Si, Al ve Fe içerikleri açısından incelendiğinde Çatalağzı ve Seyitömer uçucu küllerinin diğer küllere (Afşin-Elbistan ve Yeniköy) kıyasla daha yüksek konsantrasyona sahip olduğu Tablo 1'de görülmektedir. Buna rağmen bu uçucu küllerin tüm parametreler için arıtma verimleri diğer ikisine oranla 1,5-2 kat daha düşüktür. Kullanılmış sulara KOİ ve BOİ₅ gibi organik kirlenmeyi temsil eden parametreler temel olarak çözünmüş ve çözünmemiş formda olabilirken, AKM ve bulanıklık parametreleri çoğunlukla negatif yüklü kolloidal partiküllerden ileri gelmektedir (Şengül ve Küçükgül, 1990). Kendiliğinden çökelemeyen bu tip negatif yüklü kolloidal partiküllerin durağanlığı izoelektrik noktanın altındaki pH'larda yüzey yükleri pozitif olan metal hidroksitler tarafından bozulup adsorbe edilerek giderilebilir. Yüzey elektriksel yüklerinin pozitif değerden negatif değere dönüştüğü izoelektrik nokta alümina (Al₂O₃) için pH=8.5, demir oksit (Fe₂O₃) için pH=6.7 civarında (Förstner ve Wittman, 1983) iken silisyum dioksit (SiO₂) için izoelektrik nokta pH=2.3 dür (Vandenbusch ve Sell, 1992). Bu çalışmada optimum pH belirlemek için yapılan deney serilerinde kullanılan uçucu küllerin koagulant ve/veya adsorban etkilerinin pH=7-8 aralığındaki çözeltilerde daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Uçucu küllerin içeriğindeki Si, Al ve Fe elementlerinin su ortamındaki çözünürlükleri (Tablo 2) çok az veya olmamakla beraber, küller izoelektrik nokta açısından irdelendiğinde bu kolloidal partiküllerin adsorbsiyon ve yük nötralizasyonu ile giderimlerinde özellikle Al₂O₃'ün çok az miktarda etkili olduğu tahmin edilmektedir. Zira sadece Al₂O₃'ün yüzeyi pH=7-8 aralığında pozitif yükle yüklü olduğundan, adsorbsiyon ile negatif yüklü kolloidler uzaklaştırmaları mümkündür.

Uçucu külün bünyesinde bulunan ve koagulant ve/veya adsorban etki gösterebilen diğer element ise Ca olup, kullanılan uçucu küller Ca elementi açısından değerlendirildiklerinde diğer elementlerin (Si, Al, Fe) tersine Afşin-Elbistan ve Yeniköy uçucu küllerinin diğer küllere göre daha fazla konsantrasyonda Ca elementine sahip olduğu görülmektedir (Tablo 1). Uçucu küllerin bünyesindeki Ca, Tablo 2'de de görüldüğü gibi su ortamında kolayca çözünmekte ve ortamın pH'nı yükseltmektedir. pH'nın yükselmesine bağlı

olarak çözünmüş formdaki kalsiyum, kalsiyum hidroksit yumakları halinde çöklerler. Çökme esnasında kolloidal tanecikler bu çökelekler içerisinde hapsedilip, tutularak uzaklaştırılır (Şengül ve Küçükgül, 1990). Ayrıca çözünmüş formdaki Ca; Al, Fe ve Si ile reaksiyona girip kalsiyum alümina silikat (CaO.Al₂O₃.2SiO₂), kalsiyum üç alüminat (Ca₃Al₂O₆), kalsiyum mono ferrit (CaO.Fe₂O₃) ve kalsiyum silisid (CaSi₂) gibi kompleksler oluşturarak pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminin verimini artırmaktadır (Vandenbusch ve Sell, 1992). Deneysel çalışmada kullanılan uçucu küller bu açıdan incelendiğinde uçucu küllerdeki kalsiyum içeriğinin artmasına paralel olarak arıtma verimlerinde de artışlar görülmüştür (Şekil 3-6).

Tablo 1'den de görüldüğü gibi deneylerde kullanılan uçucu küllerin kızdırma kayıplarına göre belirlenen yanabilir madde içerikleri çok düşük olduğundan uçucu kül içinde bulunan yanmamış karbon taneciklerinin adsorbsiyon işlemi ile kolloidal maddelerin gideriminde katkısı yok denecek kadar azdır.

Bu çalışmada kullanılan uçucu küller pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminde koagulant etkinlikleri açısından yeniden irdelendiklerinde, incelenen parametrelerin gideriminde hem Al₂O₃'ün adsorbsiyon ve yük nötralizasyon mekanizması (Çatalağzı uçucu külü hariç) (Tablo 2) hem de Ca(OH)₂ çökelekleri ile kolloidal maddelerin hapsedilerek uzaklaştırılma mekanizması ile birlikte özellikle fazla miktarda çözünmüş formda bulunan Ca'un Al, Fe ve Si ile birlikte oluşturdukları komplekslerin pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminde verim artırıcı yönde etkili olduğu tahmin edilmektedir. Bu üç mekanizmanın etkisi ile tüm parametreler için en yüksek giderme verimi yüksek konsantrasyonda Ca içeren Yeniköy ve Afşin-Elbistan uçucu külleri ile elde edilmiştir (Tablo 1 ve 2).

Şekil 3-6'da görüldüğü gibi ilave edilen uçucu kül doz miktarı arttıkça tüm parametrelerin giderme verimlerinde artış olmasına rağmen etkinlik derecesi azalmaktadır. Örneğin, en yüksek verimlerin elde edildiği Yeniköy uçucu külü göz önüne alınarak değerlendirilirse, maksimum dozda %77 KOİ, %73 BOİ₅, %98 AKM ve %95 bulanıklık giderimleri sağlanırken, optimum dozda %76 KOİ, %71 BOİ₅, %90 AKM ve %84 bulanıklık giderimleri elde edilmiştir. 2000 mg l⁻¹ doz artışında, giderimlerde sadece sırasıyla KOİ için %1, BOİ₅ için %2, AKM için %8 ve bulanıklık için %11 artış olmuştur. Diğer uçucu kül örnekleri içinde optimum dozla elde edilen

değerler ile maksimum dozla elde edilen değerler arasındaki yüzde olarak artış farkı çok az miktarda olup, bunun nedeni aşırı dozlaşma sonucu kolloidlerin restabilizasyon olması ve sonuç olarak elektriksel yükün tersine dönmesi veya kolloidal maddeler ile koagulant arasında köprü teşekkül etmemesinden dolayı adsorbsiyon işleminin gerçekleşmemesi olabilir.

Kullanılan uçucu küllerin koagulant etkinlikleri koagulant olarak ticari kullanımı yaygın olan alüminyum sülfat $[Al_2(SO_4)_3]$ ve demir klorür $[FeCl_3]$ ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yapılırken SKKY (1988) evsel nitelikli atıksular için deşarj standartları 2 saatlik kompozit numune AKM değerine (Tablo 4) göre belirlenen optimum koşullar göz önüne alınmıştır. Jar-test deney serileri ile optimum doz; uçucu küller için $4000 \text{ mg } \ell^{-1}$, $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$ için $750 \text{ mg } \ell^{-1}$ olarak (Şekil 3-6), optimum pH; Yeniköy uçucu küllü için 7, Afşin-Elbistan, Seyitömer, Çatalağzı uçucu külleri ile alüminyum sülfat için 7,5 ve demir klorür için ise 8-8,5 olarak belirlenmiştir. Karşılaştırma yapılırken her bir koagulant madde (uçucu küller, $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$) için belirlenen optimum dozlara göre optimum pH ortamında bulunan Al^{+3} ve Fe^{+3} derişimlerinin stokiyometrik değerleri göz önüne alınmıştır (Tablo 5). Ayrıca Tablo 5'de optimum koşullarda (doz ve pH) her bir koagulant madde için elde edilen KOİ, BOİ₅, AKM ve bulanıklık parametrelerini içeren çıkış suyu kalitesi ve giderme verimleri de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi SKKY (1988) evsel nitelikli atıksular için 2 saatlik kompozit numune AKM deşarj standardı Afşin-Elbistan ve Yeniköy uçucu külleri, $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$ ile sağlanırken Çatalağzı ve Seyitömer uçucu külleri ile maksimum dozun ($6000 \text{ mg } \ell^{-1}$) uygulandığı şartlarda dahi sağlanamamıştır (Şekil 5). Bu nedenle sadece Afşin-Elbistan ve Yeniköy uçucu külleri ile elde edilen değerler koagulant olarak ticari kullanımı yaygın olan $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$ değerleri ile karşılaştırılmış ve her iki uçucu küllünde pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminde KOİ ve BOİ₅ gideriminde daha etkin, AKM ve bulanıklık gideriminde ise $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$ kadar etkin olduğu belirlenmiştir (Tablo 5). Elde edilen bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir (Johnson ve diğerleri, 1965; Eye ve Basu, 1970; Vandenbusch ve Sell, 1992). Bunun ne-

deni, pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminde kullanılan $Al_2(SO_4)_3$ sadece Al^{+3} , $FeCl_3$ ise sadece Fe^{+3} içerirken uçucu küllerin Al, Fe, Si, Ca ve diğer elementleri içermesidir.

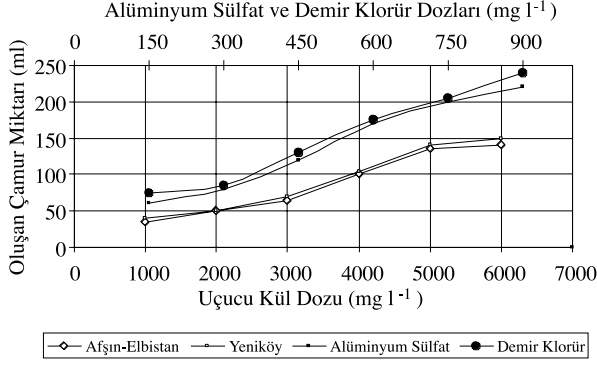
Uçucu küllerle yapılan pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemlerinde dikkat çeken bir diğer nokta ise çökeltme sonrası oluşan çamur hacim miktarlarıdır. $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$ dozlarına göre çok daha yüksek (5-6 kat) dozlarda uçucu küll kullanımasına rağmen, Afşin-Elbistan ve Yeniköy uçucu külleri ile yapılan pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemi sonunda oluşan çamurun hacmi daha azdır (Şekil 7). Elde edilen bu sonuç, uçucu küllerin içermiş olduğu özellikle Ca ve Mg gibi elementlerin çöktürmede de etkili olduğunu göstermektedir. Afşin-Elbistan ve Yeniköy uçucu küllerinin bu çalışmada göz önüne alınan parametreler bazında $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$ kadar koagulant etkinliğine sahip olması ve daha az hacimde çamur oluşturması hem işletme hem de ekonomi açısından önemli bir avantajdır. Çünkü yapılan piyasa araştırmasına göre uçucu küllün fabrika satış fiyatı ton bazında 0,95 Amerikan doları iken $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$ için ton bazında 240 dolar, her biri için taşıma maliyetinin de km-ton bazında 0,03 dolar olduğu belirlenmiştir (E.Y.A.Ş., 1999). Ayrıca pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminin fabrika satış + taşıma maliyetini içeren ekonomik analizi 1000 m^3 su için yapılırsa, bu çalışmada belirlenen optimum dozlarda [$4000 \text{ mg } \ell^{-1}$ uçucu küll, $750 \text{ mg } \ell^{-1}$ $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$], uçucu küllün ($4 \text{ dolar km}^{-1} \text{ ton}^{-1}$) $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$ 'ün ($180,4 \text{ dolar km}^{-1} \text{ ton}^{-1}$) her birine göre $176,4 \text{ dolar km}^{-1} \text{ ton}^{-1}$ daha avantajlı olduğu söylenebilir. Bunun yanısıra kullanılan yüksek doza rağmen $Al_2(SO_4)_3$ ve $FeCl_3$ 'e göre Afşin-Elbistan ve Yeniköy uçucu külleri ile optimum dozlarda yaklaşık olarak %40 daha az hacimli (Şekil 7), katı madde içeriği yüksek, nem içeriği düşük ve dolayısı ile daha iyi ve hızlı filtre edilebilen (Eye ve Basu, 1970) çamur elde edilmesi atıksu arıtma tesisi çamur işleme ünitelerinin (yoğunlaştırıcı, susuzlaştırma, filtreleme, kurutma yatakları vb.) yatırım ve işletme maliyetlerini de azaltıcı yönde etkiler. Katı atık deponi alanlarına nihai bertarafının yanısıra, atıksu arıtma çamur ünitelerinde işlenen çamur, organik ve inorganik içeriklerinden dolayı toprak iyileştirme (Cheremisinoﬀ, 1988), beton ve tuğla katkı maddesi olarak da kullanılabilir (Bayat ve Toraman, 1996; Bayat ve Bayat, 1997).

Tablo 5. Optimum koşullarda (doz ve pH) elde edilen çıkış suyu kalitesi.

Parametreler	Afşin- Elbistan	Yeniköy	Seytömer	Çatalağzı	Al ₂ (SO ₄) ₃	FeCl ₃
pH	7,5	7,0	7,5	7,5	7,5	8-8,5
	159,7 Al ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}	117,3 Al ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}	332,7 Al ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}	514,8 Al ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}	60,8 Al ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}	-
Doz *	92,4 Fe ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}	98,6 Fe ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}	246,7 Fe ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}	125,4 Fe ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}	-	155,3 Fe ⁺ ₃ mg ℓ^{-1}
KOI						
Kalan (mg ℓ^{-1})	150	129	247	252	214	182
Giderilen %	72	76	54	53	60	66
BOİ ⁵						
Kalan (mg ℓ^{-1})	108	95	183	199	154	131
Giderilen %	67	71	44	39	53	60
AKM						
Kalan (mg ℓ^{-1})	5	16	60	66	13	2
Giderilen %	97	90	63	59	92	99
BULANIKLIK						
Kalan Ntu	10	22	59	83	13	6
Giderilen %	93	84	58	41	91	96

Başlangıç Atıksu Değerleri: KOİ:536 mg ℓ^{-1} ; BOİ⁵:327 mg ℓ^{-1} ; AKM:162 mg ℓ^{-1} ; bulanıklık:140 Ntu; pH:8,15

* ortama katılan optimum koagulant dozuna göre optimum pH ortamında bulunan Al⁺₃ ve Fe⁺₃ derişimlerinin stokiyometrik değerleri



Şekil 7. Uçucu küller, alüminyum sülfat ve demir klorür için pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemi sonucunda oluşan çamur miktarlarının karşılaştırılması

Sonuçlar ve Öneriler

Evsel atıksuların pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemi ile arıtımında, koagulant olarak ticari kullanımı yaygın olan alüminyum sülfat ve demir klorür yerine uçucu küllerin koagulant olarak kullanılmasının mümkün olup olmadığını araştırdığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- i- İçeriğinde silis, alümina ve demir oksit gibi bileşenleri bulunduran uçucu küller pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminde ortamın pH'ına bağlı olarak negatif yüklü koloidal partiküllerin sebep olduğu parametrelerin gideriminde koagulant olarak etkinliğe sahiptir.
- ii- Afşin-Elbistan, Yeniköy, Çatalağzı ve Seyitömer termik santrallerinden temin edilen uçucu küllerin koagulant olarak etkinlikleri kalsiyum içeriklerine bağlı olarak değişmektedir. Uçucu külün Ca içeriği arttıkça pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminde evsel atıksulardan KOİ, BOİ₅, AKM ve bulanıklık gideriminde koagulant olarak etkinliği artmaktadır.
- iii- En yüksek arıtma verimleri Ca içeriği yüksek olan Yeniköy ve Afşin-Elbistan termik santral uçucu külleri kullanılarak elde edilmiştir. Ca içerikleri düşük Çatalağzı ve Seyitömer termik santral uçucu külleri bu iki küle göre oldukça düşük arıtma verimlerine sahiptir. Çünkü incelenen parametrelerin gideriminde hem Al₂O₃ adsorbsiyon ve yük nötralizasyon mekanizması (Çatalağzı uçucu külü hariç)

hem de Ca(OH)₂ çökelekleri içerisinde koloidal maddelerin hapsedilerek uzaklaştırılma mekanizması ile birlikte özellikle fazla miktarda çözülmüş formda bulunan kalsiyumun Al, Fe ve Si ile oluşturdukları kompleksleri pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminde verim arttırıcı yönde etkili olmaktadır.

- iv- Ca içeriği yüksek olan Yeniköy ve Afşin-Elbistan termik santral uçucu külleri koagulant olarak ticari kullanımı yaygın olan alüminyum sülfat ve demir klorüre göre KOİ ve BOİ₅ gideriminde daha etkin, AKM ve bulanıklık gideriminde ise onlar kadar etkinliğe sahiptir.
- v- Uçucu küller alüminyum sülfat ve demir klorür ile ekonomik açıdan karşılaştırıldıklarında, uçucu kül fabrika satış fiyatı + taşıma maliyeti bazında 176,4 dolar km⁻¹ ton⁻¹ daha ekonomiktir.
- vi- Uçucu külün içeriğindeki Ca ve Mg gibi elementler pıhtılaştırma-yumaklaştırma işleminden sonra uygulanan çökeltme işlemine de etkili olmaktadır. Çünkü alüminyum sülfat ve demir klorür dozlarına göre çok daha yüksek dozlarda uçucu kül kullanılmasına rağmen, Afşin-Elbistan ve Yeniköy uçucu külleri ile yapılan pıhtılaştırma-yumaklaştırma işlemi sonunda uygulanan çökeltme işlemi sonrası oluşan çamurun hacmi daha azdır. Bu sonuca göre atıksu arıtma tesisi çamur işleme ünitelerinin ön yatırım ve işletme maliyetlerinde de azalma olacağı söylenilebilir.
- vii- Uçucu küller için potansiyel bir kullanım alanının bulunması ve değerlendirilmesi hem termik santraller açısından uçucu külün stoklanma problemini ortadan kaldırabilmekte, hem de ilk elden çevresel sorunlara neden olması önlenmektedir.
- viii- Atıksu arıtma tesisi çamur ünitelerinde işlenen çamurun katı atık deponi alanlarında nihai bertarafının yanı sıra organik ve inorganik içeriklerinden dolayı toprak iyileştirme, beton ve tuğla katkı maddesi olarak da kullanılmaları mümkündür.

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir (Proje No: FBE.96 YL 171)

Kaynaklar

- Bayat, B. ve Bayat, O., "Soma Uçucu Külünün (TS 4563) İçinde Kullanımı", 2. Ulusal Çevre Müh. Kongresi TMMOB Çevre Müh. Odası, P-8, 4-5 Aralık, 1997.
- Bayat, O. and Toraman, Y., "Physical and Chemical Properties of Some Turkish Fly Ashes", Geosound, 26, 187-195, 1995.
- Bayat, O. and Toraman, Y., "Utilisation of Coal Fly Ash in Concrete", Proc. of the 1st Int. Symp. On Mine-Environmental Eng. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, July 29-31, 222-228. 1996.
- Bayat, O., "Characterization of Turkish Fly Ashes", Fuel, 77 (9/10), 1059-1066, 1998.
- Cheremisinoff, P., "Coal Flyash: Power Plant Waste or By-product", Power Engineering, July, 40-41, 1988.
- Deb, P. K., Rubin, A. J., Launder, A. W. and Mancy, K. H., "Removal of COD from Wastewater by Fly Ash", Proceedings of 21st Ind. Waste Conf., Purdue Univ., Indiana, Ext.Ser., 121, 848, 1967.
- Erlar Yapı A.Ş. Mıdır ve Hazır Beton İşletmeleri, İstanbul, Kişisel Görüşme, 1999.
- Eye, J. D. and Basu, T. K., "The Use of Fly Ash in Wastewater Treatment and Sludge Conditioning", Journal of WPCF, 42(5), R125-R135, 1970.
- Förstner, U. and Wittman, G. T. W., Metal Transfer between Solid and Aqueous Phases, In Springer-Verlag (ed.). The Aquatic Environment, New York, NY, USA, 207-210, 1983.
- Johnson, G. E., Kunka, L. M. and Field, J. H., "Use of Coal and Fly Ash as Adsorbents for Removing Organic Contaminants from Secondary Municipal Effluents", Ind. and Eng. Chem. Process Design and Development, 4(3), 323-327, 1965.
- Mancy, K. H., Gates, W. E., Eye, J. D. and Deb, P. K., "The Adsorption Kinetics of ABS on Flyash", Proceedings of 19th Ind. Waste Conf., Purdue Univ., Indiana, Ext. Ser. 146-160, 1965.
- Reed, G. D., Mitchel, D. T. and Parker, D. G., "Water Quality Effect of Aqueous Fly Ash Disposal", Proceedings of 31st Ind. Waste Conf., Purdue University, Ann Arbor Science, Mich., 337-345, 1976.
- SKKY, "Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Atıksuların Boşaltım Esasları", 4.9.1988 tarihli Resmi Gazete, 1988.
- Smith, J. W. and Condra, J., "Recovery of Wastewater Treatment Chemicals from Flyash", Journal of Environmental Engineering, 109 (5), 1168-1179, 1983.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16th ed., APHA-SWWA-WPCF, American Public Health Association, Washington DC, 1985.
- Şengül, F. ve Küçükgül, Y., Çevre Mühendisliğinde Fiziksel-Kimyasal Temel İşlemler ve Süreçler, Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Yayınları, 153, 211, İzmir, 1990.
- Tchobanoglous, G. and Burton, F. L., Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and Reuse, McGraw-Hill, Inc. Third Edition, 1991.
- TS-266, "Bulanıklık Tayini", UDK 662.6:543, Haziran 1984.
- Vandenbusch, M. B. and Sell, N. J., "Flyash as a Sorbent for the Removal of Biologically Resistant Organic Matter", Resources, Conservation and Recycling, 6, 95-116, 1992.
- Yiğit, E., "Türkiyede Linyit Madenciliği ve Sorunları", 2000'li Yıllara Doğru Linyit Sektörümüz Sempozyumu, Ankara, 9-25, 1994.