

8. ÇAMUR MİNİMİZASYONU (İP 8)

Projenin minimizasyon iş paketi (İP 8) kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda çamur miktarının azaltılması ve çamur stabilizasyon derecesinin artırılması hedeflenerek, yedi bölgeden seçilmiş birer adet evsel ve kentsel atıksu arıtma tesislerinden alınan arıtma çamuru örneklerine mekanik (ultrasonik, vurgulu elektrik alanı uygulaması), termal (mikrodalga), kimyasal (Fenton, ozon ve alkali) ve biyolojik (enzimatik arıtım) olmak üzere çeşitli dezentegrasyon teknikleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların istatistiksel analizlerine yönelik çalışmalar yapılarak en uygun minimizasyon yöntemleri ve optimum uygulama dozları belirlenmiştir. İP 8 çamur minimizasyonu çalışmalarına ilişkin gerçekleştirilen tüm istatistiksel analiz sonuçları detaylı olarak EK F-III'de verilmektedir.

Projede, İP8 kapsamında yapılan çamur minimizasyonu çalışmaları, İP9 kapsamında ele alınan çamur stabilizasyonu çalışmaları ile koordineli olarak yürütülmüştür. Uygulanan dezentegrasyon işlemine bağlı olarak, çamur stabilizasyon çalışmaları sonucunda stabilizasyon derecesinin artırılması ve çamur miktarının azaltılması hedeflenmiştir. Minimizasyon çalışmaları sonucunda her bölgenin arıtma çamurları için en etkili bulunan dezentegrasyon yöntemi, bir sonraki aşama olan İP9 kapsamındaki çamur stabilizasyonu işlemleri öncesinde arıtma çamurlarına ön-arıtma işlemi olarak uygulanmış ve çamurlara uygulanan minimizasyon tekniklerinin stabilizasyon derecesinin artırılmasına, organik maddenin indirgenmesine (ülkemiz mevzuatı gereklerini yerine getirmek amacıyla özellikle Toplam Organik Karbon (TOK) ve Çözünmüş Organik Karbon (ÇOK) parametrelerin indirgenmesi) ve patojen giderimine olan etkileri araştırılmıştır. Stabilizasyon çalışmaları laboratuvar ölçekli reaktörlerde gerçekleştirilmiş olup, mekanik, kimyasal, termal ve biyolojik dezentegrasyon uygulanmış çamur örneklerini içeren reaktörler ile dezentegrasyon uygulanmamış çamur örneklerini içeren “kontrol” reaktörleri ile çalışılmıştır. Minimizasyon çalışmalarında Tablo 8.1'de verilen, yedi coğrafi bölgeden seçilmiş atıksu arıtma tesislerinin aktif çamur geri devir hattından alınan sulu arıtma çamuru örnekleri kullanılmıştır.

İP 8 kapsamında arıtma çamurlarına uygulanan dezentegrasyon yöntemlerinin optimizasyonu ve en etkili dezentegrasyon yönteminin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen deneysel ve istatistiksel analiz çalışmaları sonucunda, **ultrasonikasyon** ve **mikrodalga dezentegrasyon yöntemleri**, tüm bölgelerde seçilen atıksu arıtma tesisi çamurları için **en etkili minimizasyon teknikleri olarak belirlenmiştir**.

Tablo 8.1 : Yedi bölgede seçilen atıksu arıtma tesisleri

Numune No	Numunenin Alındığı Bölge	Numunenin Alındığı Tesis	Evsel/Kentsel Arıtma Türü
1	Marmara	İstanbul Bahçeşehir-İstanbul	Evsel
2	Marmara	İzmit Kullar-Kocaeli	Kentsel
3	Doğu Anadolu	Elazığ	Kentsel
4	Güneydoğu Anadolu	GASKİ 1	Kentsel
5	Karadeniz	Akçakoca	Evsel
6	Karadeniz	Bafra-Samsun	Kentsel
7	İç Anadolu	Ankara	Kentsel
8	İç Anadolu	Nevşehir	Evsel
9	İç Anadolu	Tatlar-Ankara	Kentsel
10	Akdeniz	Seyhan-Adana	Kentsel
11	Ege	Çiğli-İzmir	Kentsel
12	Ege	Foça-İzmir	Evsel
13	Akdeniz	Antalya-Lara	Evsel

Bu nedenle, İP 9 kapsamında gerçekleştirilen aerobik ve anaerobik stabilizasyon çalışmaları öncesinde seçilen tüm AAT arıtma çamurlarına, ultrasonikasyon ve mikrodalga dezentegrasyonları uygulanmıştır. Biyolojik dezentegrasyon yöntemi olan enzim ön-arıtımı ise uygulama yönteminin gereği olarak İP 9 kapsamında gerçekleştirilen aerobik ve anaerobik stabilizasyon işlemleri sırasında arıtma çamurlarına tatbik edilmiştir.

Bu çalışmalara ek olarak atıksu arıtma çamurunda kalıntı antibiyotik tespiti çalışmaları da yürütülmüş ve çamura adsorbe olan antibiyotiğin gideriminde yüksek oksidasyon konsantrasyonunun gerekliliğine ilişkin çalışmalar yapılmıştır.

Çalışmalar sırasında yapılan analizler Standart Metotlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir (APHA, 2005). Analizlerde kullanılan ölçüm yöntemleri aşağıdaki gibidir:

- **pH:** 4500-H B Elektrokimyasal Metot (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **Redox Potansiyeli:** 2580 B Elektrokimyasal Metot (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **İletkenlik:** 2510 B Method (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **KOİ:** 5220 D Method Closed Reflux, Colorimetric (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **TOK:** 5310 A Method (APHA, AWWA-WPCF-2006)

- **Toplam Katı Madde (TKM):** 2540 B (APHA, AWWA-WPCF-2006) Gravimetrik Metot
- **Uçucu Askıda Katı Madde (UAKM):** 2540 D and E (APHA, AWWA-WPCF-2006) Gravimetrik Metot
- **Toplam Uçucu Katı Madde (TUKM):** 2540 G (APHA, AWWA-WPCF-2006) Gravimetrik Metot
- **Alkalinite:** 2320 B Titrimetrik Metot (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **Toplam Kjeldahl Azotu (TKN):** 4500 E Titrimetrik Metot (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **Amonyak Azotu:** 4500 E Titrimetrik Metot (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **Nitrit, nitrat:** 4500 Kolorimetrik Metot (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **Fosfor:** 4500-P E Method Ascorbic Acid (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **Klorür:** 4500-Cl B Method Argentometric (APHA, AWWA-WPCF-2006)
- **Sülfat:** 4500-SO4-2 E Turbidimetrik Metot (APHA, AWWA-WPCF-2006)

İP8 kapsamında ilgili proje grupları tarafından yapılan çalışmalar aşağıda sunulmaktadır.

8.1. BÜ Grubu Tarafından Yapılan Çalışmalar

8.1.1. Dezentegrasyon İşlemleri

İP 8 kapsamında, BÜ Proje Grubu tarafından Karadeniz ve Marmara Bölgeleri'nden seçilen atıksu arıtma tesislerinden alınmış arıtma çamurlarına uygulan dezentegrasyon yöntemlerinin optimizasyon çalışmaları yapılmış ve her bölgenin arıtma çamurları için uygulanabilecek etkili dezentegrasyon yönteminin belirlenmesine yönelik deneysel çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir. BÜ Proje Grubu tarafından, dezentegrasyon uygulamaları için seçilen tesisler; **Marmara Bölgesi'nde** İzmit Kullar Atıksu Arıtma Tesisi (kentsel) ve İstanbul Bahçeşehir Atıksu Arıtma Tesisi (evsel), **Karadeniz Bölgesi'nde** ise Samsun Bafra Atıksu Arıtma Tesisi (kentsel) ve Düzce Akçakoca Atıksu Arıtma Tesisi (evsel)'dir. Alınan çamur numunelerinin standart karakterizasyon analiz sonuçları Tablo 8.2'de verilmektedir.

AAT'lerin aktif çamur geri devir hattından alınan arıtma çamuru örneklerine mekanik dezentegrasyon yöntemlerinden ultrasonikasyon, termal dezentegrasyon yöntemlerinden mikrodalga ön arıtımı ve kimyasal dezentegrasyon yöntemlerinden ise Fenton ve ozon ile dezentegrasyon yöntemleri uygulanmıştır. Çamur numunelerine uygulanan dezentegrasyon işlemlerinin verimleri çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ) ölçümlerine dayanan dezentegrasyon derecesi (DD) parametresine göre değerlendirilmiştir.

Tablo 8.2 : Çalışmalarda Kullanılan Arıtma Çamurlarının Özellikleri

Parametre	Birim	İzmit Kullar AAT	İstanbul Bahçeşehir AAT	Samsun Bafra AAT	Düzce Akçakoca AAT
TKM	mg/L	7719	5243	13397	3581
TUKM	mg/L	5943	3930	9378	2685
AKM	mg/L	6695	4719	12057	3224
UAKM	mg/L	4755	3750	7654	2361
pH	-	7,18	7,53	7,63	7,71
Alkalinite	mg CaCO ₃ /L	600	900	1600	500
İletkenlik	µS/cm	986	779	971	521
Tuzluluk	%	0,3	0,2	0,3	0,1
TKOİ	mg/L	11649	3433	8587	10396
ÇKOİ	mg/L	109	214	206	546
ÇOK	mg/L	22	47	67	105
TKN	mg/L	648	451	389	354
NH ₄ -N	mg/L	13,75	11,55	14,40	77,0
NO ₃ -N	mg/L	3,0	6,0	4,0	2,0
NO ₂ -N	mg/L	2,0	2,0	0,0	0,0
TP	mg/L	205	28	326	150
ÇTP	mg/L	57	19	77	34
PO ₄ -P	mg/L	35,9	6,1	56,3	22,4
Sıkışabilirlik	%	9,54	15	15,06	165,85
Kapiler Emme Süresi (KES)	sn	30	21,8	20	44,6
Toplam Koliform (TK)	[kob/100mL]	3,8x10 ⁵	1,2x10 ⁵	1,4x10 ⁵	4,5x10 ⁵
Fekal Koliform (FK)	[kob/100mL]	3,8x10 ⁵	3,1x10 ⁵	2,1x10 ⁵	1,1x10 ⁵
Fekal Streptokok (FS)	[kob/100mL]	8,5x10 ⁵	3,3x10 ⁵	6,3x10 ⁵	1,3x10 ⁵

Dezenteğrasyon dereceleri Müller ve Pelletier'in (1998) yöntemine göre aşağıda verilen formülden hesaplanmıştır.

$$DD_{KOI} = (\text{ÇKOİ} - \text{ÇKOİ}_0) / (\text{ÇKOİ}_{NaOH} - \text{ÇKOİ}_0) \times 100$$

burada;

DD_{KOI} : Dezenteğrasyon Derecesi

ÇKOİ : Dezenteğre edilmiş çamurun üstsuyundaki ÇKOİ değeri, mg/L

ÇKOİ_0 : Orjinal (dezenteğre edilmemiş) çamurun üstsuyundaki ÇKOİ değeri, mg/L

ÇKOİ_{NaOH} : Kimyasal olarak 1mol/L NaOH ile oda sıcaklığında, 20 ± 1 °C, 24 saat boyunca dezenteğre edilmiş çamurun üstsuyundaki ÇKOİ değeri, mg/L (Bougrier vd., 2005).

8.1.1.1. Alkali Dezenteğrasyon Çalışmaları

Alkali dezenteğrasyon optimizasyonu, Marmara ve Karadeniz Bölgeleri'nde seçilen AAT'lerin aktif çamur geri devir hattından alınan çamur numunelerinin pH değerlerini 2 N NaOH ilavesi ile 10, 11 ve 12'ye çıkarmak ve bu değerlerde 2, 6, 12 ve 24 saat tutmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Alkali ön-arıtım uygulamalarında 400 mL'lik çamur numuneleri ile çalışılmıştır.

Belirlenen pH değerlerine ulaşmak için arıtma çamurlarına eklenen NaOH miktarları Tablo 8.3'de, seçilen tesislerden alınan çamurlara alkali dezenteğrasyon işleminin sonrasında elde edilen ÇKOİ ve dezenteğrasyon dereceleri Tablo 8.4'de verilmektedir.

Alkali dezenteğrasyon işleminin sonrasında dezenteğre edilmiş çamur numunelerinde kapiler emme süresi (KES), viskozite ve partikül boyut dağılımı analizleri gerçekleştirilmiş olup, elde edilen değerler Tablo 8.5, Tablo 8.6 ve Tablo 8.7'de gösterilmiştir.

Tablo 8.3 : Uygulanan Alkali Dezentegrasyon Sırasında Uygulanan NaOH Miktarları (ml)

Atıksu Arıtma Tesisi	Ham Çamur pH Değerleri	Alkali pH Değerleri	Alkali Arıtma Zamanı (saat)	Eklenen NaOH Miktarı (ml)
İzmit Kullar AAT	6,62	10		2,5
	6,74	11	2	3,4
	6,62	12		5,9
	6,62	10		2,6
	6,61	11	6	3,9
	6,65	12		6,3
	6,62	10		2,4
	6,63	11	12	3,3
	6,64	12		6,2
	6,63	10		2,5
	6,6	11	24	3,5
	6,59	12		6,3
İstanbul Bahçeşehir AAT	6,58	10		2,5
	6,6	11	2	3,4
	6,48	12		5
	6,64	10		2
	6,74	11	6	3,3
	6,84	12		4,8
	6,61	10		2,1
	6,65	11	12	3,4
	6,64	12		5
	6,73	10		2
	6,65	11	24	3,1
	6,63	12		4,8
Samsun Bafra AAT	7,13	10		2,2
	7,03	11	2	3,8
	7,15	12		5,9
	7,02	10		2,5
	7,18	11	6	3,7
	7,01	12		6,6
	7,08	10		2,2
	7,1	11	12	3,8
	7,12	12		6,1
	7,16	10		2,4
	6,99	11	24	4
	7,13	12		6,4
Düzce Akçakoca AAT	6,33	10		2,5
	6,35	11	2	3,5
	6,35	12		5,3
	6,39	10		2,5
	6,36	11	6	3,4
	6,42	12		5,1
	6,35	10		2,5
	6,37	11	12	3,4
	3,68	12		5,1
	6,37	10		2,5
	6,36	11	24	3,5
	6,53	12		4,9

Tablo 8.4 : Marmara ve Karadeniz Bölgeleri'nde Seçilen Dört Tesisin Çamurlarına Uygulanan Alkali Dezenteğrasyon İşlemi Sonrası Elde Edilen ÇKOİ Konsantrasyonları (mg/L) ve Dezenteğrasyon Dereceleri (DD, %)

Atıksu Arıtma Tesisi	pH	Alkali Arıtma Zamanı (saat)	ÇKOİ (mg/L)	DD (%)
Kullar	6,62	0	390	
	10		792	4,25
	11	2	1618	12,97
	12		3256	30,26
	10		818	4,52
	11	6	1852	15,44
	12		3990	38,01
	10		921	5,61
	11	12	1905	15,99
	12		4088	39,05
	10		677	3,04
	11	24	2192	19,03
12		4117	39,35	
Bahçeşehir	6,62	0	212	
	10		1570	14,31
	11	2	2575	24,89
	12		4309	43,16
	10		792	6,11
	11	6	2340	22,43
	12		2937	28,71
	10		802	6,22
	11	12	1990	18,73
	12		2606	25,22
	10		882	7,05
	11	24	1958	18,40
12		2587	25,01	
Samsun Bafra	7,13	0	290	
	10		741	7,94
	11	2	1682	24,51
	12		2810	44,38
	10		1060	13,56
	11	6	1979	29,75
	12		3671	59,55
	10		108	13,81
	11	12	1985	29,85
	12		3246	52,07
	10		925	11,19
	11	24	1940	29,06
12		3165	50,64	
Düzce Akçakoca	6,33	0	580	
	10		792	4,16
	11	2	1087	9,95
	12		1566	19,38
	10		760	3,54
	11	6	1342	14,97
	12		2268	33,18
	10		745	3,24
	11	12	1339	14,91
	12		1988	27,67
	10		664	1,64
	11	24	1354	15,20
12		1736	22,73	

Tablo 8.5 : Alkali Dezentegrasyon İşlemi Sonrası Çamurlarda Elde Edilen Kapiler Emme Süresi (KES) Sonuçları

Atıksu Arıtma Tesisi	pH	Alkali Arıtma Zamanı (saat)	KES (saniye)
Kullar	6,62	0	17,6
	10		162,4
	11	2	461,5
	12		992,5
	10		181,4
	11	6	661,1
	12		1200,4
	10		151,4
	11	12	590,3
	12		1402,2
	10		142,6
	11	24	617,1
12		1669,6	
Bahçeşehir	6,62	0	32,1
	10		256
	11	2	798,7
	12		1845,3
	10		126,5
	11	6	645,3
	12		1070,7
	10		128,6
	11	12	658,2
	12		1084,2
	10		75,3
	11	24	540,9
12		801,5	
Samsun Bafra	7,13	0	84,9
	10		393,9
	11	2	773,4
	12		1737,3
	10		271,2
	11	6	709,1
	12		1972,6
	10		284,5
	11	12	742,8
	12		1865,7
	10		358,4
	11	24	691,5
12		1534,2	
Düzce Akçakoca	6,33	0	499,2
	10		346,5
	11	2	370,8
	12		866,3
	10		236,8
	11	6	394,2
	12		661,1
	10		218,7
	11	12	381,6
	12		645,8
	10		165,7
	11	24	495,3
12		1122,1	

Tablo 8.6 : Alkali Dezentegrasyon İşlemi Sonrası Çamurlarda Ölçümlenen Viskozite Sonuçları

Atıksu Arıtma Tesisi	pH	Alkali Arıtma Zamanı (saat)	Viskozite	
			cp	%
Kullar	6,62	0	8	0,4
	10	2	32	1,6
	11		30	1,5
	12		36	1,8
	10	6	40	2
	11		32	1,6
	12		34	1,7
	10	12	36	1,8
	11		32	1,6
	12		30	1,5
	10	24	38	1,9
	11		34	1,7
12	32		1,6	
Bahçeşehir	6,62	0	14	0,7
	10	2	34	1,7
	11		36	1,8
	12		30	1,5
	10	6	18	0,9
	11		14	0,7
	12		16	0,8
	10	12	14	0,7
	11		18	0,9
	12		16	0,8
	10	24	14	0,7
	11		16	0,8
12	18		0,9	
Samsun Bafra	7,13	0	42	2,1
	10	2	22	1,1
	11		24	1,2
	12		26	1,3
	10	6	24	1,2
	11		24	1,2
	12		24	1,2
	10	12	24	1,2
	11		26	1,3
	12		24	1,2
	10	24	32	1,6
	11		24	1,2
12	24		1,2	
Düzce Akçakoca	6,33	0	44	2,2
	10	2	10	0,5
	11		10	0,5
	12		10	0,5
	10	6	8	0,4
	11		10	0,5
	12		12	0,6
	10	12	10	0,5
	11		12	0,6
	12		14	0,7
	10	24	6	0,3
	11		8	0,4
12	10		0,5	

Tablo 8.7 : Alkali Dezentegrasyon İşlemi Sonrası Çamurlarda Elde Edilen Partikül Boyutu Analizi Sonuçları

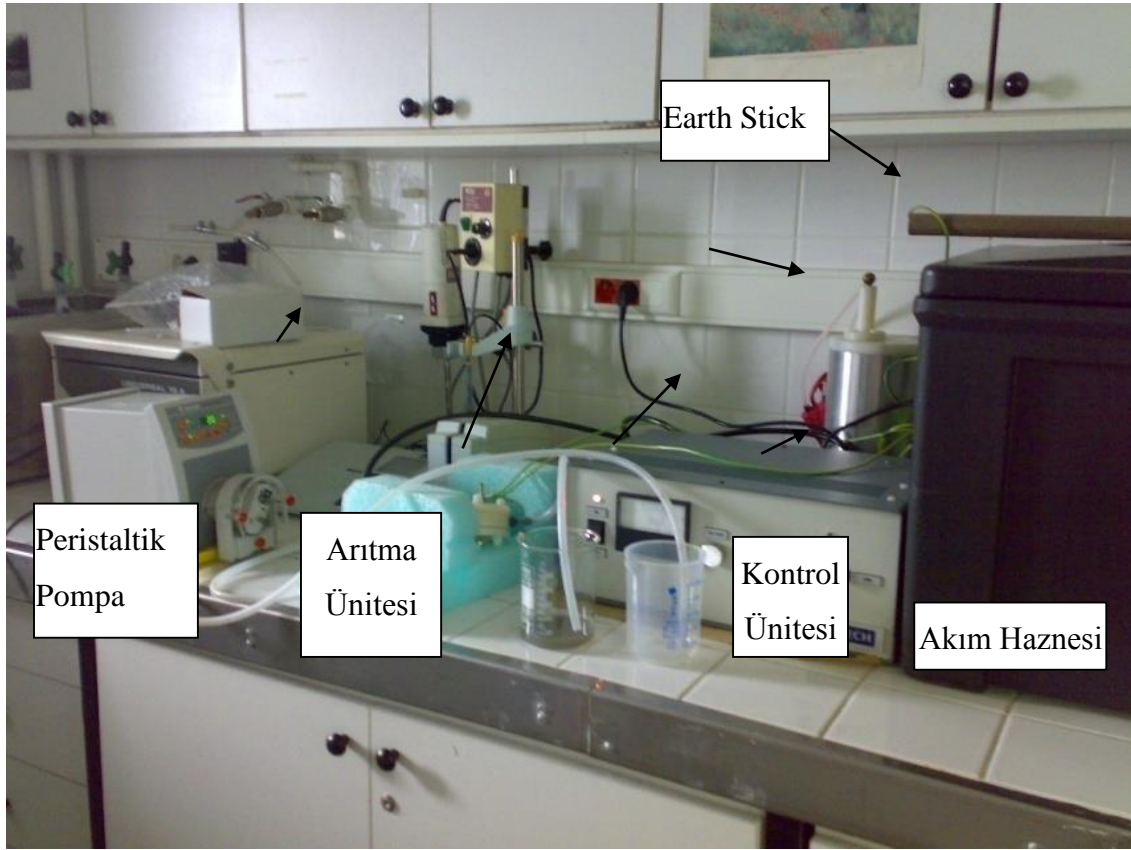
Atıksu Arıtma Tesisi	pH	Alkali Arıtma Zamanı (saat)	Partikül Boyutu (µm)				
			d(0,1)	d(0,5)	d(0,9)	D[3,2]	D[4,3]
Kullar	6,62	0	18,295	57,781	141,734	34,794	73,044
	10		17,351	56,192	132,949	32,972	70,213
	11	2	17,578	57,204	135,624	33,2	73,921
	12		16,386	52,786	142,217	29,586	75,342
	10		15,597	49,19	122,35	29,691	66,627
	11	6	16,677	48,84	115,664	28,211	60,383
	12		15,956	51,071	130,765	28,21	67,134
	10		15,625	50,115	125,714	29,167	67,134
	11	12	16,712	49,088	121,548	30,125	67,134
	12		16,121	51,116	131,116	29,687	67,134
	10		16,917	52,877	130,162	32,139	68,754
	11	24	17,354	54,489	165,577	28,02	74,939
12		15,985	50,47	128,901	34,902	63,652	
Bahçeşehir	6,62	0	19,039	55,784	145,286	36,106	83,573
	10		20,371	59,929	140,04	38,14	80,228
	11	2	22,266	67,033	176,377	41,974	114,037
	12		19,877	54,04	126,955	33,745	72,066
	10		18,763	49,635	125,292	34,006	67,635
	11	6	18,609	49,359	133,7	31,584	83,448
	12		16,812	46,001	122,639	26,383	62,871
	10		18,415	49,235	124,112	33,095	66,614
	11	12	18,584	49,215	133,64	31,104	82,987
	12		16,541	45,984	121,456	25,972	62,105
	10		19,296	52,262	128,723	34,902	71,574
	11	24	18,663	48,731	122,402	32,043	70,751
12		18,417	50,275	149,58	30,209	76,803	
Samsun Bafra	7,13	0	20,509	62,447	745,226	39,571	192,911
	10		12,368	37,058	83,722	21,834	45,061
	11	2	12,978	41,16	94,292	23,364	50,525
	12		11,972	36,237	92,703	20,327	49,947
	10		14,493	43,305	99,008	26,271	58,118
	11	6	13,324	39,972	95,034	23,529	51,636
	12		12,396	36,207	91,528	20,444	48,342
	10		13,245	42,237	98,875	26,002	57,486
	11	12	12,321	38,846	93,468	23,025	50,402
	12		11,089	35,105	90,217	20,321	47,287
	10		14,413	42,809	97,735	25,39	52,886
	11	24	13,396	40,592	95,746	23,678	51,31
12		12,362	36,726	94,889	20,711	48,548	
Düzce Akçakoca	6,33	0	13,585	40,378	100,306	23,216	56,172
	10		8,068	22,902	69,582	13,019	38,631
	11	2	7,304	21,322	92,153	11,576	44,695
	12		6,224	20,641	135,134	10,028	53,74
	10		12,518	34,659	98,538	20,496	56,594
	11	6	7,496	22,258	108,495	11,842	49,94
	12		7,353	26,128	147,384	11,585	59,596
	10		12,615	33,896	99,423	20,154	57,326
	11	12	9,605	24,352	110,587	13,863	51,065
	12		8,402	27,136	150,418	10,875	59,615
	10		10,068	28,538	107,158	16,247	55,276
	11	24	9,408	30,377	196,673	15,854	65,963
12		7,104	25,563	216,46	11,785	81,374	

Alkali dezentegrasyon çalışmalarına ilişkin istatistiksel sonuçlar (EK F-III) incelendiğinde:

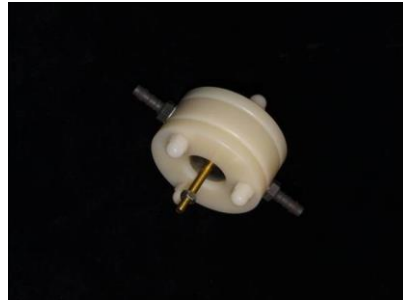
- pH düzeyleri arasında yapılan çoklu karşılaştırma testleri sonucunda, tüm pH düzeyleri arasında dezentegrasyon derecesinin anlamlı farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. pH düzeyi arttıkça dezentegrasyon derecesi (%) de anlamlı olarak artmaktadır. pH=10 iken ortalama dezentegrasyon % 6,887, pH=11 iken % 19,755, pH=12 iken % 36,148'dir.
- pH düzeyi arttıkça KOİ konsantrasyonu da anlamlı olarak artmaktadır. pH=10 iken ortalama KOİ konsantrasyonu 2,844, pH=11 iken 6,010, pH=12 iken 9,731'dir.
- Yapılan Üç Yönlü ANOVA sonucunda, KES değerlerindeki değişim yönünden tesisler arasında anlamlı ($p=0,000$), pH düzeyleri arasında anlamlı ($p=0,000$), uygulama süreleri arasında anlamsız ($p=0,999$) fark bulunmuştur. Aşağıdaki ortalamalar tablosundan da görüldüğü gibi pH düzeyi arttıkça KES değişimi de anlamlı olarak artmaktadır. pH=10 iken ortalama KES değişimi 4,491, pH=11 iken 15,773, pH=12 iken 33,691'dir.
- Yapılan Üç Yönlü ANOVA sonucunda, viskozite (%) değerleri yönünden tesisler arasında anlamlı ($p=0,000$), pH düzeyleri arasında anlamlı ($p=0,898$), uygulama süreleri arasında da anlamsız ($p=0,141$) fark bulunmuştur. Tesislere göre ortalama viskozite değerleri incelendiğinde, en yüksek ortalamanın (1,692) Kocaeli'nde, en düşük ortalamanın (0,50) Düzce'de ölçüldüğü görülmektedir.
- Tesisler için partikül boyutu açısından yapılan çoklu karşılaştırma testleri sonucunda, Samsun ile diğer tüm tesisler arasında ve Düzce ile diğer tüm tesisler arasında anlamlı fark bulunmuştur. Genel olarak Samsun ve Düzce'de ölçülen partikül boyutlarının daha küçük olduğu söylenebilir.

8.1.1.2.Vurgulu Elektrik Alanı (PEF) Çalışmaları

İP8 iş paketi kapsamında, BÜ Grubu tarafından uygulanan diğer bir dezentegrasyon yöntemi vurgulu elektrik alanı uygulamasıdır. Alternatif bir dezentegrasyon yöntemi olarak arıtma çamurlarına uygulanan vurgulu elektrik alanı (Pulsed Electric Field (PEF)) uygulaması, iki elektrot arasına yerleştirilmiş işlem haznesi içindeki likit maddeye bir seri kısa süreli (10 ns – 20 μ s), yüksek voltaj (10–50 kV/cm) vurgularının uygulanması işleminden ibarettir. Arıtılacak likit iki elektrot arasından akar ve yüksek voltaja maruz kalır. Elektrotlar karbon, titanyum, altın ve platin gibi inert maddelerden yapılmışlardır. PEF sistemi Şekil 8.1 ve Şekil 8.2'de gösterilmektedir.



Şekil 8.1 : Vurgulu Elektrik Alanı (PEF) Sistemi



Şekil 8.2 : Vurgulu Elektrik Alanı Uygulamasında Arıtmanın Gerçekleştiği Ünite

Vurgulu elektrik alanı uygulamasının çamur dezentegrasyonuna etkilerini görmek için çamurlara 0,5 N NaOH ilavesi ile farklı pH larda (3,0; 5,0; 6,8; 9,0 ve 11,0) ve farklı şiddetlerde elektrik alanı uygulanmıştır. Dezentegrasyon işlemi, Marmara Bölgesi'nde seçilen İzmit Kullar AAT'den alınan çamur numuneleri ile gerçekleştirilmiştir. Çamur karakteristiklerine ilişkin analiz sonuçları Tablo 8.8'de verilmiştir.

Tablo 8.8 : İzmit Kullar AAT'den Alınan Kontrol Çamuru Karakterizasyonu

Parametre	Kontrol Çamuru (İzmit Kullar AAT)
pH	6,9
Alkalinite (mg/L CaCO ₃)	430
ORP (mV)	125
KOİ (g/L)	8,19
ÇKOİ (g/L)	0,12
TKM (g/L)	7,05
TAKM (g/L)	4,37
UKM (g/L)	5,64
UAKM (g/L)	3,09
TKN (mg/L)	258
İletkenlik (μS/cm)	1068

Çamurların iletkenliği, vurgulu elektrik alanı uygulanması açısından büyük önem taşımaktadır. Yüksek iletkenliğe sahip maddeler küçük pikler yapar ve bu arıtma yöntemi için uygun olmayabilir.

Diğer bir önemli faktör de jeneratör tarafından sağlanan vurgu profilidir. Bu çalışmada vurgu profili monopolar, dörtgensel ve mikrosaniyeler mertebesindedir.

Arıtma çamuru numunelerine farklı süre ve şiddetlerde uygulanan vurgulu elektrik alanı çalışması sonucunda elde edilen çözünmüş KOİ konsantrasyonları ve buna bağlı olarak hesaplanan dezentegrasyon dereceleri Tablo 8.9'da verilmektedir.

Tablo 8.9 : Vurgulu Elektrik Alanı Uygulamasının Çamur Dezentegrasyonuna Etkileri

Vurgulu Elektrik Alanı Şiddeti (kV/cm)	Uygulama Süresi (sn)	ÇKOİ (mg/L)	ÇKOİ Artışı (%)	DD (%)
0	0	471,6	0	0
20	3,0	540,8	14,7	1,8
20	4,5	580,4	23,1	2,9
20	6,0	596,9	26,6	3,3
20	7,5	633,2	34,3	4,3
20	9,0	652,9	38,4	4,8
25	3,0	577,1	22,4	2,8
25	4,5	633,1	34,3	4,3
25	6,0	686,0	45,4	5,7
25	7,5	715,6	51,7	6,5
25	9,0	771,0	63,6	7,9
30	3,0	620,7	31,5	4,0
30	4,5	685,9	45,4	5,7
30	6,0	784,8	66,4	8,3
30	7,5	827,7	75,5	9,5
30	9,0	880,5	86,7	10,9

Elde edilen sonuçlar, vurgulu elektrik alanı şiddetinin ve süresinin çamur dezentegrasyonu üzerinde oldukça etkili olduğunu ve artan elektrik alanı şiddeti ve uygulama süresinin dezentegrasyon derecesini arttırdığını göstermektedir. Atıksu çamur numunelerine 3; 4,5; 6; 7,5 ve 9 saniyelik beş ayrı süreyle ve 20, 25, 30 kV/cm'lik üç ayrı şiddetle uygulanan vurgulu elektrik alanı denemeleri sonucunda elde edilen maksimum dezentegrasyon derecesi 30 kV/cm elektrik alanı şiddeti ve 9 saniyelik uygulama ile %10,9 olarak bulunmuştur. Uygulanan elektrik akımı çamurdaki katı maddeleri dezentegre ederek mikroorganizmaların hücre zarlarını parçalamış ve hücre içi organik maddeleri açığa çıkararak, çözünmüş KOİ değerlerinin artmasına neden olmuştur.

Qin vd. (1995b) mikroorganizmalar için ölümcül vurgulu elektrik alanı etkisinin elektrik alan şiddeti, vurgu süresi ve vurgu sayısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Vurgulu elektrik alanı uygulamasının çamurların susuzlaştırılabilirliğine etkisi, çamur numunelerinin özgül filtre direnci, kapiler emme süresi ve sıkıştırılabilirlikleri cinsinden ölçülerek takip edilmiştir (Tablo 8.10, Tablo 8.11 ve Tablo 8.12).

Sonuçlar vurgulu elektrik alanı uygulamasının, çamurların özgül filtre direncini arttırırken, kapiler emme süresini ve sıkıştırılabilirliğini artırarak çamurların susuzlaştırılabilirliğini olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir.

Tablo 8.10 : Vurgulu Elektrik Alanı Uygulamasının Çamur Susuzlaştırılabilirliğine Etkisi: Özgül Filtre Direnci

Çamur Numunesi	Özgül Filtre Direnci (SRF) (m/kg)
Ön arıtma uygulanmamış çamuru	420 x 1011
Vurgulu elektrik alanı uygulanmış çamur	1180 x 1011
Polimer ile şartlandırılmış çamur	55 x 1011
Vurgulu elektrik alanı uygulanmış ve polimer ile şartlandırılmış çamur	130 x 1011

Tablo 8.11 : Vurgulu Elektrik Alanı Uygulamasının Çamur Susuzlaştırılabilirliğine Etkisi: Kapiler Emme Süresi (KES)

Elektrik Alan Şiddeti (kV/cm)	KES (sn)
0	9,2
5	9,5
10	10,7
20	13,5
30	14,2

Tablo 8.12: Vurgulu Elektrik Alanı Uygulamasının Çamur Susuzlaştırılabilirliğine Etkisi: Sıkıştırılabilirlik (compactibility)

Elektrik Alan Şiddeti (kV/cm)	Sıkıştırılabilirlik (Çamur Keki Kuru Maddesi, %)
0	6,50
5	6,56
10	6,80
20	7,20
30	7,50

Tüm elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, vurgulu elektrik alanı uygulaması ile arıtma çamurlarının dezentegrasyonu sağlanabilmiş; fakat bu dezentegrasyon yöntemi çamur numunelerinin susuzlaştırılabilirliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. DD verimleri dikkate alınarak tüm dezentegrasyon yöntemleri karşılaştırıldığında, vurgulu elektrik alanı uygulamasının, ultrasonikasyon ve mikrodalga yöntemine göre daha düşük bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle, vurgulu elektrik alanı uygulamasının arıtma çamurları için en etkili dezentegrasyon yöntemi olamayacağı görüşüne varılarak diğer seçilen üç tesis için vurgulu elektrik alanı çalışmalarının yapılmasına gerek olmadığı düşünülmüştür.

8.1.1.3.Fenton Oksidasyonu Çalışmaları

Seçilen AAT aktif çamur geri devir hattı çamur numuneleri üzerinde yürütülen Fenton oksidasyonu deneyleri, 400 mL hacmindeki örnekler üzerinde $\text{pH} = 3,0 \pm 0,2$ 'de ve $T=20^\circ\text{C}$ sıcaklıkta farklı H_2O_2 (50, 60 ve 70 mg H_2O_2 / g TKM) ve Fe^{2+} (50, 70 ve 90 mg Fe^{2+} / g H_2O_2) konsantrasyonları eşliğinde gerçekleştirilmiştir. Fenton oksidasyonu deneylerinin başlangıç adımında, her bir çamur örneğinin pH değerini 3.0 ± 0.2 aralığına getirmek amacıyla 6 N H_2SO_4 çözeltisinden faydalanılmıştır. Fe^{2+} kaynağı olarak $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ tuzu (Merck, Almanya) kullanılmış ve %2'lik Fe^{2+} çözeltisi günlük olarak hazırlanmıştır. Oksidasyon reaksiyonunda gereken H_2O_2 konsantrasyonları ise, yoğunluğu 1.13 g/mL ve saflığı %35 olan stok H_2O_2 çözeltisi aracılığıyla elde edilmiştir. pH ayarlaması ve ihtiyaç duyulan Fe^{2+} ile H_2O_2 konsantrasyonlarının eklenmesi sonrasında, çoklu manyetik karıştırıcılar kullanılarak 60 dakika boyunca 100 devir/dakika değerinde hızlı karıştırma işlemi uygulanmıştır. Oksidasyon tepkimesi, her bir çamur numunesine %5'lik $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisi ilave edilerek pH değerinin 7-8 aralığına getirilmesi sayesinde durdurulmuştur. İkinci pH ayarlaması adımı sonucunda meydana gelen $\text{Fe}(\text{OH})_3$ floklarının dağılmaması için çoklu manyetik karıştırıcıların hızı yavaş karıştırmaya (30 devir/dakika değerine) göre yeniden düzenlenmiştir. 30 dakika boyunca uygulanan yavaş karıştırma işleminin ardından her bir çamur numunesi, 10 dakika süresince 9000 devir/dakika hızında santrifüjlenmiştir. Santrifüj kullanımı sonunda elde edilen çamur sıvıları, Millipore marka 0,45 μm gözenek çapındaki membran filtreler (Millex HV, PVDF) aracılığıyla süzülmüştür. Fenton oksidasyonu esnasında reaksiyona girmeden artakalan H_2O_2 bulunup bulunmadığından emin olmak için çözünmüş formdaki çamur numunelerine peroksit test stripleri (Merckoquant® 1.10081, Almanya) daldırılmıştır. Peroksit test striplerinin kullanılması sonucunda, çözünmüş formdaki çamur numunelerinin H_2O_2 içermediği gözlemlenmiştir. Çözünmüş formdaki çamur numunelerinin KOI konsantrasyonları, ISO 6060

kapalı refluks titrimetrik yöntemi uyarınca ölçülmüştür (ISO 6060, 1986). Fenton oksidasyonu deneylerinde elde edilen sonuçlar, Tablo 8.13'te verilmektedir.

Tablo 8.13 : Seçilen dört adet tesis çamurlarına uygulanan fenton prosesi dezentegrasyon işlemi sonrası hesaplanan dezentegrasyon dereceleri

Numune	TKM (mg/L)	mg H ₂ O ₂ / g TKM	mg Fe ²⁺ / g H ₂ O ₂	ÇKOİ (mg/L)	ΔÇKOİ (mg/L)	Dezentegrasyon Derecesi (%)		
Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	9400	---	---	122	---	---		
		50	50	50	168	46	0,61	
			70	70	174	52	0,69	
	90		90	342	220	2,90		
	60	50	187	65	0,86			
		70	350	228	3,01			
		90	340	218	2,87			
		70	50	390	268	0,54		
			70	163	41	3,48		
90			341	219	2,89			
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	5900	---	---	210	---	---		
		50	50	50	326	116	1,23	
			70	70	405	195	2,07	
	90		375	165	1,75			
	60	50	566	356	3,79			
		70	559	349	3,71			
		90	419	209	2,23			
	70	50	407	197	2,1			
		70	422	212	2,25			
90		451	241	2,56				
Samsun Bafra AAT (Evsel)		3200	---	---	194	---	---	
			50	50	50	241	47	0,81
				70	70	272	78	1,36
	90	231		37	0,65			
	60	50	222	28	0,48			
		70	296	102	1,77			
		90	234	40	0,69			
	70	50	198	4	0,07			
		70	239	45	0,77			
90		215	21	0,35				
Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)		620	---	---	561	---	---	
			50	50	50	709	148	2,89
				70	70	709	148	2,89
	90	90		709	148	2,89		
	60	50	720	159	3,11			
		70	650	89	1,74			
		90	788	227	4,43			
	70	50	789	228	4,47			
		70	752	191	3,74			
90		696	135	2,64				

Fenton uygulaması sonrasında dezentegre edilmiş çamur numunelerinde kapiler emme süresi (KES), viskozite ve partikül boyut dağılımı analizleri gerçekleştirilmiş olup, elde edilen değerler Tablo 8.14 ve Tablo 8.15'te gösterilmiştir.

Tablo 8.14 : Fenton ile dezentegre edilen çamurlarda gerçekleştirilen kapiler emme süresi (KES) ve viskozite analizleri sonuçları

Numune	TKM (mg/L)	mg H ₂ O ₂ / g TKM	mg Fe ²⁺ / g H ₂ O ₂	KES (sn)	Viskozite (cP)
Kocaeli	9400	---	---	25,9	34,8
Kullar		50	50	12,9	15,6
AAT			70	12,8	13,6
(Kentsel)			90	19,6	37,6
		60	50	13,7	14,4
			70	18,1	29,6
			90	21,4	33,6
		70	50	13,1	12,8
			70	13,7	29,2
			90	21,3	34,4
İstanbul	5900	---	---	---	---
Bahçeşehir		50	50		
AAT			70	15,3	18,0
(Evsel)			90		
		60	50	21,1	17,2
			70	23,7	26,4
			90	13,5	17,2
		70	50	14,9	18,0
			70	13,7	17,6
			90	14,3	17,6
Samsun	3200	---	---	---	---
Bafra		50	50	16,8	17,6
AAT			70	22,0	18,4
(Evsel)			90	20,3	
		60	50	14,5	15,2
			70	12,5	16,0
			90	15,8	13,6
		70	50	17,1	15,2
			70	20,7	16,8
			90	13,3	14,8
Düzce	620	---	---	---	---
Akçakoca		50	50		
AAT			70	17,7	13,2
(Kentsel)			90		
		60	50	20,5	14,0
			70	47,9	13,6
			90	16,5	12,0
		70	50	29,5	14,4
			70	21,3	14,0
			90	20,2	13,6

Tablo 8.15 : Fenton ile dezentegre edilen çamurların partikül boyutu analizi sonuçları

	Yüzeysel ağırlık ortalaması D[3.2]	Hacimsel ağırlık ortalaması D[4.3]	d (0.1) µm	d (0.5) µm	d (0.9) µm
Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)					
Ham çamur	36.400	81.931	18.763	63.037	145.369
70 mg Fe ²⁺ / g H ₂ O ₂ – 60 mg H ₂ O ₂ / g TKM	37.676	79.829	19.409	66.165	149.466
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)					
Ham çamur	48.086	151.427	24.857	83.805	269.358
70 mg Fe ²⁺ / g H ₂ O ₂ – 60 mg H ₂ O ₂ / g TKM	44.982	108.945	23.420	78.706	191.414
Samsun Bafra AAT (Evsel)					
Ham çamur	40.941	86.411	21.075	72.627	156.196
70 mg Fe ²⁺ / g H ₂ O ₂ – 60 mg H ₂ O ₂ / g TKM	45.434	93.711	24.363	80.128	172.452
Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)					
Ham çamur	28.578	81.168	14.367	46.629	145.607
70 mg Fe ²⁺ / g H ₂ O ₂ – 60 mg H ₂ O ₂ / g TKM	18.445	65.263	10.031	31.817	140.761

Fenton ile dezentegrasyonu çalışmalarına ait istatistiksel sonuçlar incelendiğinde mg H₂O₂/g TKM ve mg Fe²⁺/g H₂O₂ düzeyleri arasında tesisler arasında dezentegrasyon derecelerindeki değişim yönünden anlamlı bir fark bulunamamıştır (sırasıyla p=0,221, p=0,261).

8.1.1.4.Ozon Ön Arıtımı Çalışmaları

AAT aktif çamur geri devir hattı çamur numuneleri üzerinde yürütülen ozonlama deneylerinde, saf oksijenden (saflık > %99.9) ozon üretimi Sander Aquarientechnik S1000 marka ozon jeneratörü (Uetze-Eltze, Almanya) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler, etkin derinliği 60 cm olan 1,5 litre hacmindeki reaktöre 0,6 litre çamur numunesi konarak 0,5 bar basıncında yürütülmüştür. Ozon difüzyonu, yukarı akış difüzyonu şeklinde uygulanmıştır; bu yöntem uyarınca ozon gazı, sinterlenmiş cam levha difüzörün yardımıyla reaktör tabanına iletilmiştir. Boy-yükseklik-derinlik ölçütleri sırasıyla 220x145x110 mm olan maksimum 24 W gücündeki ozon jeneratörünün ozon üretimi 1~1000 mg/saat aralığında yer almaktadır. %2 KI çözeltisi içeren iki adet gaz yıkama şişesi, uygulanan ozon miktarının belirlenebilmesi için ozon jeneratörüne bağlanmıştır. Ozonlama prosesinin ardından her bir çamur numunesi, 10 dakika süresince 9000 devir/dakika hızında santrifüjlenmiştir (HettichLab Technology Universal 320, Almanya). Santrifüj kullanımı sonunda elde edilen çamur sıvıları, Millipore marka 0,45 µm

gözenek çapındaki membran filtreler (Millex HV, PVDF) aracılığıyla süzölmüştür. Çözönmüş formdaki çamur numunelerinin KOİ konsantrasyonları, ISO 6060 kapalı refluks titrimetrik yöntemi uyarınca ölçölmüştür (ISO 6060, 1986). Ozonlama deneylerinde elde edilen sonuçlar, Tablo 8.16’da özetlenmiştir.

Tablo 8.16 : Seçilen tüm AAT arıtma çamurları için ozon ön arıtımı deney sonuçları

Numune	TKM (mg/L)	mg O ₃ /mg TKM	ÇKOİ (mg/L)	Δ ÇKOİ (mg/L)	Dezenteğrasyon Derecesi (%)
Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	9400	---	122	---	---
		0,05	ölçölmedi		
		0,10	431	309	3,20
		0,15	853	731	7,57
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	5900	---	1182	1060	10,99
		0,20	210	---	---
		0,05	354	144	1,53
		0,10	831	621	6,61
Samsun Bafra AAT (Evsel)	3200	---	1808	1598	17,01
		0,15	1960	1750	18,62
		0,20	194	---	---
		0,05	271	77	1,33
Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)	620	---	388	194	3,36
		0,10	448	254	4,40
		0,15	281	87	1,51
		0,20			

Ozon uygulaması sonrasında dezenteğre edilmiş çamur numunelerinde kapiler emme süresi (KES) analizi gerçekleştirilmiş olup, elde edilen değerler Tablo 8.17’de gösterilmiştir

Tablo 8.17 : Ozon ile dezenteğre edilen çamurlarda gerçekleştirilen kapiler emme süresi (KES) analizi değerleri

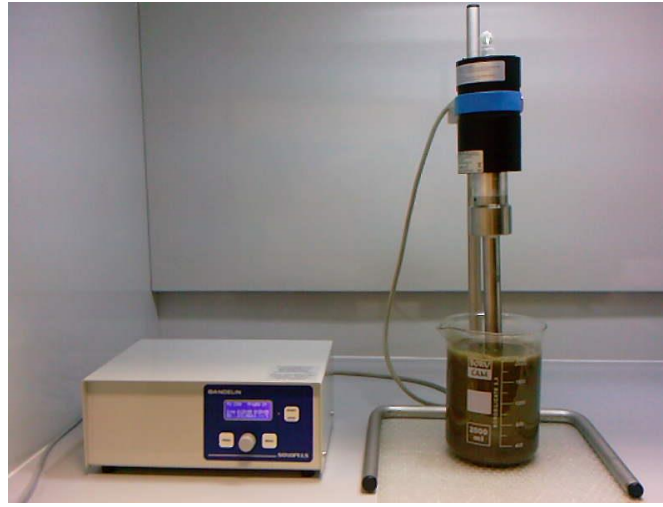
Numune	0,05 mg O ₃ /mg TKM	0,10 mg O ₃ /mg TKM	0,15 mg O ₃ /mg TKM	0,20 mg O ₃ /mg TKM
	KES (sn)			
Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	14,3	11,2	206,4	323,2
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	24,7	39,5	86,6	36,4
Samsun Bafra AAT (Evsel)	16,5	13,3	11,3	-
Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)	-	-	-	-

Viskozite ve partiköl boyutu analizleri, ozon uygulaması sonucu elde edilen numunelerin hacimlerinin analizler için yetersiz olmaları nedeniyle gerçekleştirilememiştir.

Ozon ile dezentegrasyonu çalışmalarına ait istatistik sonuçlar incelendiğinde ise mg O₃/mg TKM düzeyleri arasında KOİ konsantrasyonu yönünden anlamlı bir farklılık bulunmazken (p=0,197), tesisler arasında 0,10 anlamlılık seviyesinde anlamlı fark tespit edilmiştir (p=0,081).

8.1.1.5. Ultrasonik Dezentegrasyon Çalışmaları

Seçilen AAT aktif çamur geri devir hattı çamur numunelerinin ultrasonik dezentegrasyonu, Bandelin-Sonopuls HD 3400 Ultrasonikatör kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.3). Bu çalışmada kullanılan ultrasonikatör ekipmanları: bir jeneratör (GM 3400), bir ultrasonik dönüştürücü (UW 3400) ve bir prob (VS 200 T). Ekipmanların özellikleri ise Tablo 8.18’de verildiği gibidir.



Şekil 8.3: Çalışmada kullanılan ultrasonikatör (Bandelin-Sonopuls HD 3400)

Tablo 8.18 : Ultrasonik ekipmanların özellikleri

GM 3400 Jeneratör	
Güç sağlayıcı	230V~50/60Hz (alternatif olarak 115V~50/60Hz)
Ultrasonik frekans	20 kHz
Maksimum güç	400 W
Güç aralığı	60 – 300 W
Ağırlık	3.1 kg
Boyutlar (u × g × y)	324 × 230 × 131 mm
Süre aralığı	0:00:01-9:59:59 (s:dk:sn) veya sürekli işletim
Amplitud aralığı	10 – 100 % , 1 % aralıklarda

Tablo 8.18 : Ultrasonik ekipmanların özellikleri (devam)

UW 3400 Ultrasonik Dönüştürücü	
Frekans	20 kHz
Ağırlık	2.2 kg
Boyutlar	Ø 90 ×180 mm
Koruma derecesi	IP 20
VS 200 T Prob	
Çap	Ø 25 mm
Standart boruya bağlantı	SH 3425
Hacim aralığı	100 – 2500 mL
Maksimum müsaade edilebilir amplitut	100%
Daldırma derinliği (tavsiye edilen)	10 – 20 mm

Ultrasonik sistemler genellikle performansları hakkında bir gösterge veren prosedürlerle kalibre edilirler. Ultrasonik gücün tayini için temel olarak dört farklı prosedür bulunmaktadır: elektriksel güç ölçümü (Boucaud vd., 1999), akustik dozimetri (Mason ve Peters, 2002), kimyasal dozimetri (Koda vd., 2003) ve kalorimetrik dozimetri (Teo vd., 2001).

Bu çalışmada, sistem içerisine dağılan ultrasonik gücün tayini için kalorimetrik dozimetri metodu kullanılmıştır. Bu metot, yaklaşık tüm mekanik enerjinin ısıya dönüştüğünü ve böylece, kalorimetri yoluyla, sisteme giren akustik gücün yaklaşık değerinin saf bir sıvı içerisinde elde edilebileceğini varsayar (Mason ve Peters, 2002). Bu yüzden kalorimetrik dozimetri deneylerinde deiyonize su kullanılmıştır.

Kalorimetrik dozimetri deneyleri için, beherdeki deiyonize su içerisine termometre daldırılmış ve düzeneğe sabitlenmiştir. Ultrasonikasyon işlemi, cam beherlere konulan 400 mL hacmindeki deiyonize su örneklerine uygulanmıştır. Çalışılan sistem için 30 saniye aralıklarla, zamana (t) karşı sıcaklık (T) değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak zaman-sıcaklık grafiği çizilmiş ve bu grafikten dT/dt değeri elde edilmiştir. Daha sonra, dT/dt değerinin aşağıdaki denkleme (Mason ve Peters, 2002; Koda vd., 2003; Teo vd., 2001) yerleştirilmesiyle, sisteme asıl giren ultrasonik güç değeri elde edilmiştir:

$$Güç = \left(\frac{dT}{dt} \right) \cdot c_p \cdot M$$

Burada,

$\left(\frac{dT}{dt}\right)$: saniye başına sıcaklık artışı

c_p : suyun ısı kapasitesi

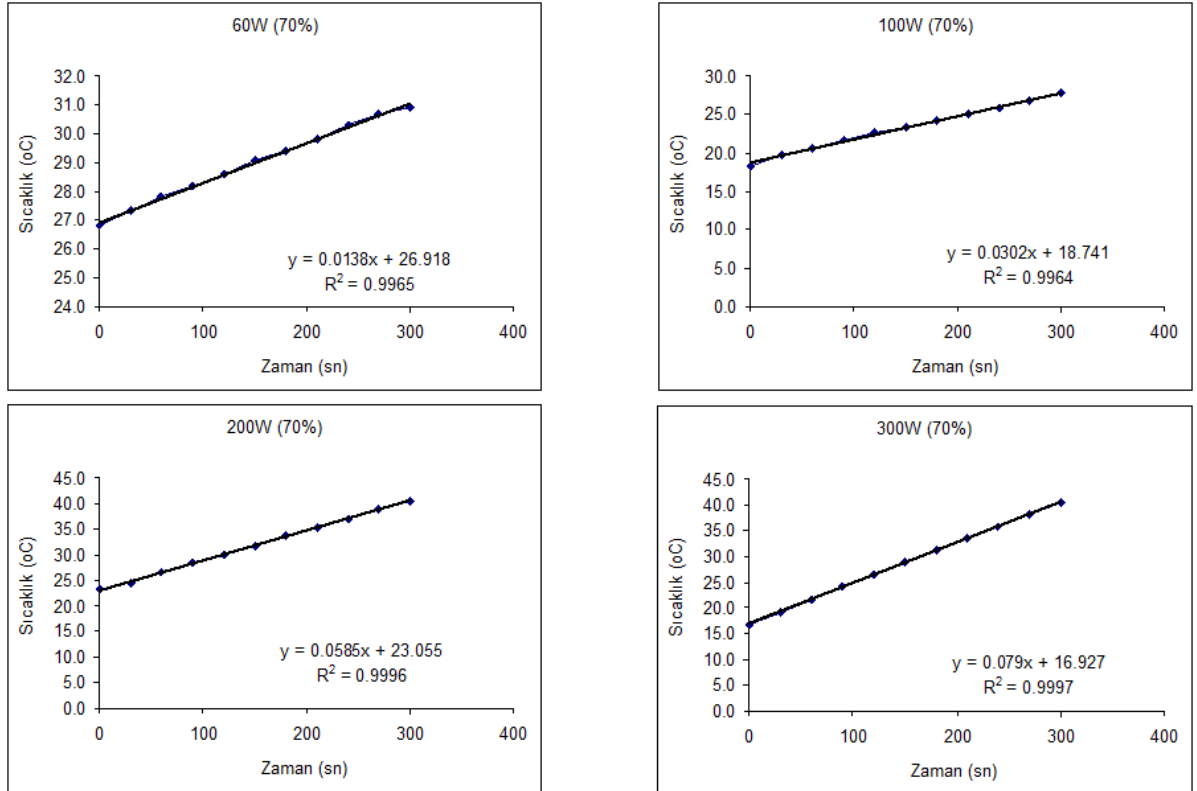
M : suyun kütlesi (g)

Çalışmada kullanılan sonikatörde, güç (Watt olarak) sistem içerisine 4.9 cm² alana sahip bir prob ucundan sistem içerisine dağılmaktadır. Buna göre, ultrases kaynağı tarafından üretilen gücün şiddeti (W/cm² olarak) ve gücün yoğunluğu (W/mL olarak) aşağıdaki denklemlerle (Mason ve Peters, 2002) hesaplanmıştır:

$$\text{Şiddet} = \frac{\text{Güç}}{\text{Alan}}$$

$$\text{Yoğunluk} = \frac{\text{Güç}}{\text{Hacim}}$$

Kalorimetrik dozimetri metoduyla elde edilen zaman–sıcaklık grafikleri (Şekil 8.4) ve hesaplanan güç değerleri (Tablo 8.19) aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 8.4 : Kalorimetrik dozimetri metoduyla elde edilen zaman–sıcaklık grafikleri

Tablo 8.19 : Hesaplanan güç değerleri

Sonikatörde ayarlanan güç değeri (Watt)	Ultrasonik Güç (Watt)	Güç Yoğunluğu (Watt/mL)	Güç Şiddeti (Watt/cm ²)
60	23	0.058	4.7
100	51	0.126	10.3
200	98	0.245	20
300	132	0.331	27

Bu işlemi takiben; Marmara ve Karadeniz Bölgeleri'nde seçilen iki adet evsel ve iki adet kentsel atıksu arıtma tesisinden alınan çamur numunelerinin ultrasonikatör ile sonikasyonu sırasında en uygun güç ve amplitüt değerinin belirlenmesi için öncelikle farklı güçlerde (60, 100, 200, 300 W) dezentegrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ultrasonikasyon işlemi, 400 mL hacmindeki cam beherlere konulan arıtma çamuru örneklerine uygulanmış ve çalışmaya başlamadan önce tüm çamur numuneleri ortam sıcaklığına (20±2 °C) getirilmiştir.

Arıtma çamuru numunelerinde gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları sonucunda ultrasonik dezentegrasyon için en etkili değer; 10000 kJ/kg TKM için 200 W %70 amplitüt olduğu tespit edilmiştir. Seçilen dört adet tesis için 10000 kJ/kg TKM optimum değerinde elde edilen dezentegrasyon dereceleri örnek olarak Tablo 8.20'de verilmektedir. Elde edilen bu değerler, ultrasonik ön arıtım çalışmalarında temel alınarak, 400 mL'lik sabit hacimde, belirlenen optimum dozlarda (200 W ve %70) seçilen dört adet tesis için seçilen spesifik enerjilere ve arıtma çamurunun toplam katı madde konsantrasyonu değerlerine göre hesaplanan ve uygulanan sonikasyon süreleri Tablo 8.20 ve Tablo 8.21'de gösterilmiştir.

Tablo 8.20 : Seçilen tesislerde 10000 kJ/kg TKM optimum değeri için elde edilen dezentegrasyon dereceleri

Spesifik Enerji (kJ/kgTKM)	Ultrasonikasyon Değerleri	Ultrasonik Güç (Watt)	Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	Samsun Bafra AAT (Evsel)	Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)
10000	Dezentegrasyon Dereceleri (%)	60	5,3	6,58	0,65	4,76
		100	14,3	18,8	3,86	6,27
		200	27,59	17,76	7,86	9,59
		300	25,84	29,29	7,28	8,02
	ÇKOİ (mg/L)	60	634	829	231	804
		100	1494	1977	417	881
		200	2782	1879	648	1051
		300	2614	2963	614	971

Tablo 8.21 : Belirlenen optimum dozlarda (200 W ve %70 amplitüt) seçilen dört adet tesis için belirlenen spesifik enerjilere karşı uygulanan sonikasyon süreleri

Tesis	TKM (mg/L)	Spesifik Enerji (kJ/kg TKM)	Sonikasyon süresi (sn)
Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	9400	5.000	192
		10.000	384
		15.000	576
		25.000	959
		50.000	1918
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	5900	5.000	120
		10.000	241
		15.000	361
		25.000	602
		50.000	1204
Samsun Bafra AAT (Evsel)	3200	5.000	65
		10.000	131
		15.000	196
		25.000	327
		50.000	653
Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)	620	5.000	13
		10.000	25
		15.000	38
		25.000	63
		50.000	127

Ultrasonikasyon çalışmalarında, tüm uygulamalar sıcaklık kontrollü olarak yürütülmüş olup, çalışmalarda elde edilen maksimum sıcaklıkların 30 °C'nin altında olduğu gözlenmiştir. Arıtma çamuru numunelerine farklı spesifik enerjilerde uygulanan ultrasonikasyon çalışması sonucunda elde edilen çözünmüş KOİ konsantrasyonları ve buna bağlı olarak hesaplanan dezentegrasyon dereceleri Tablo 8.22 ve Tablo 8.23'te verilmektedir. Belirlenen spesifik enerjilere göre çözünmüş KOİ değerlerinde tesis bazında elde edilen değişimler Şekil 8.5'te, elde edilen dezentegrasyon dereceleri ise Şekil 8.6'da gösterilmektedir.

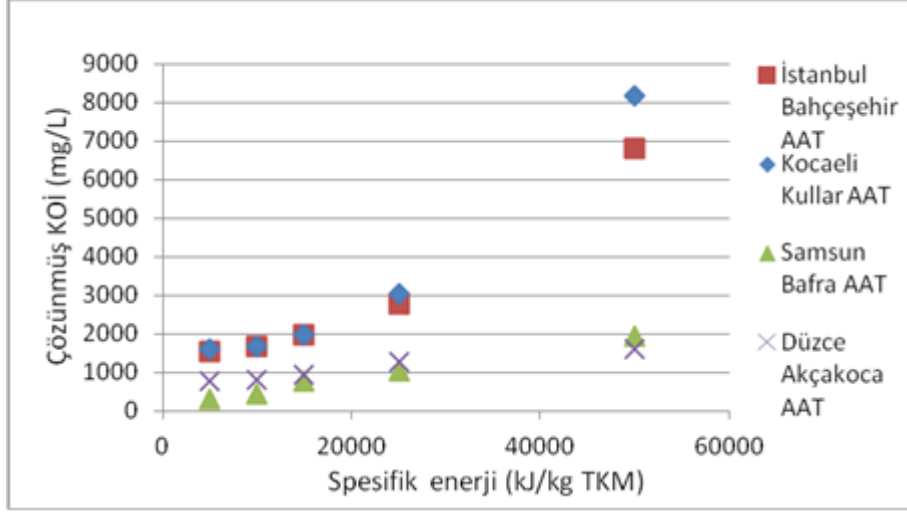
Tablo 8.22 : Seçilen dört adet tesis çamurlarına uygulanan ultrasonik dezentegrasyon işlemi

sonrası elde edilen ÇKOİ konsantrasyonları

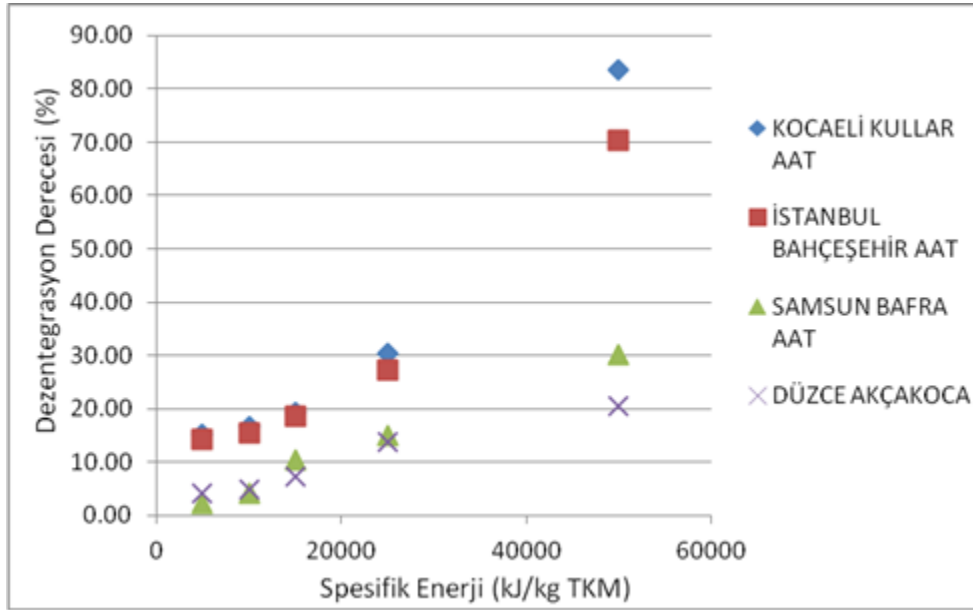
Spesifik Enerji (kJ/kgTKM)	Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	Samsun Bafra AAT (Evsel)	Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)
ÇKOİ (mg/L)				
---	122	210	194	561
5000	1601	1545	325	772
10000	1720	1671	435	810
15000	1987	1963	791	939
25000	3048	2764	1058	1267
50000	8187	6815	1929	1609

Tablo 8.23: Seçilen dört adet tesis çamurlarına uygulanan ultrasonik dezentegrasyon işlemi sonrası hesaplanan dezentegrasyon dereceleri

Spesifik Enerji (kJ/kgTKM)	Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	Samsun Bafra AAT (Evsel)	Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)
DD (%)				
5000	15,34	14,21	2,27	4,12
10000	16,57	15,54	4,17	4,87
15000	19,33	18,65	10,34	7,41
25000	30,34	27,18	9,02	13,83
50000	83,64	70,28	30,05	20,52



Şekil 8.5 : Belirlenen spesifik enerjilere göre ÇKOİ değerlerinde tesis bazında elde edilen değişimler



Şekil 8.6 : Belirlenen spesifik enerjilere göre elde edilen dezenteğrasyon dereceleri

Ultrasonikasyon işlemi sonrasında dezenteğre edilmiş çamur numunelerinde kapiler emme süresi (KES), viskozite ve partikül boyut dağılımı analizleri gerçekleştirilmiş olup, elde edilen değerler Tablo 8.24 ve Tablo 8.25'te gösterilmiştir.

Tablo 8.24 : Ultrasonikasyon ile dezentegre edilen çamurlarda gerçekleştirilen kapiler emme süresi (KES) ve viskozite analizleri sonuçları

Numune	KES (sn)			Viskozite (cP)			
	SE	SE	SE	SE	SE	SE	
	5000	15000	50000	5000	15000	50000	
Kocaeli Kullar (Kentsel)	AAT	1295,6	1449,5	1652,2	28,4	22,8	18
İstanbul Bahçeşehir (Evsel)	AAT	1189,4	1708,5	>2000	22,0	20,8	17,2
Samsun Bafra (Evsel)	AAT	276,1	528,9	787,5	16,0	15,2	14,8
Düzce Akçakoca (Kentsel)	AAT	176,7	216,8	334,1	12,8	12,8	12,4

Tablo 8.25 : Ultrasonikasyon ile dezentegre edilen çamurlarda gerçekleştirilen partikül boyutu analizi sonuçları

Numune	Yüzeysel ağırlık ortalaması D[3.2]	Hacimsel ağırlık ortalaması D[4.3]	d (0.1) µm	d (0.5) µm	d (0.9) µm
Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)					
Ham çamur	36.400	81.931	18.763	63.037	145.369
SE=5.000 kJ/kg TKM	22.100	42.821	18.360	39.676	73.045
SE=15.000 kJ/kg TKM	6.133	32.407	2.657	19.303	59.722
SE=50.000 kJ/kg TKM	3.419	38.744	1.176	11.677	109.639
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)					
Ham çamur	48.086	151.427	24.857	83.805	269.358
SE=5.000 kJ/kg TKM	12.959	40.106	7.918	29.309	68.244
SE=15.000 kJ/kg TKM	7.555	50.180	3.354	23.481	117.830
SE=50.000 kJ/kg TKM	7.995	78.565	3.473	38.788	189.127
Samsun Bafra AAT (Evsel)					
Ham çamur	40.941	86.411	21.075	72.627	156.196
SE=5.000 kJ/kg TKM	35.130	65.855	23.719	59.951	116.816
SE=15.000 kJ/kg TKM	28.004	67.047	22.744	57.107	115.866
SE=50.000 kJ/kg TKM	8.038	52.220	3.434	33.254	108.086
Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)					
Ham çamur	28.578	81.168	14.367	46.629	145.607
SE=5.000 kJ/kg TKM	21.198	61.082	12.603	37.907	107.836
SE=15.000 kJ/kg TKM	23.999	58.560	16.201	44.774	96.507
SE=50.000 kJ/kg TKM	24.640	63.900	18.514	51.606	109.909

İP 8 kapsamında yürütülen minimizasyon çalışmalarına ilişkin gerçekleştirilen tüm istatistiksel analiz sonuçları detaylı olarak EK F-III'de verilmektedir. Bu sonuçlara göre ultrasonikasyon ön arıtım işlemleri sonucunda aşağıdaki önemli bulgular elde edilmiştir:

- Yapılan çoklu karşılaştırma testleri sonucunda, ultrasonikasyonda enerji düzeyi 50000 kJ/kgTKM'ye çıktığında tüm tesislerde KOİ değeri önemli ölçüde artış göstermektedir.
- Tesisler arasında KOİ ölçümüne göre yapılan çoklu karşılaştırma sonucunda, iki homojen grup ortaya çıkmaktadır. Buna göre, Marmara Bölgesi'ndeki tesisler (Kocaeli-İstanbul) bir grubu ve Karadeniz Bölgesi'ndeki tesisler (Samsun-Düzce) ikinci grubu oluşturmaktadır. Tüm düzeylerde en düşük KOİ değerinin Samsun AAT'de, daha sonra Düzce AAT'de elde edildiği de göze çarpmaktadır.
- Yapılan çoklu karşılaştırma testleri sonucunda, ultrasonikasyonda enerji düzeyi 50000 kJ/kgTKM'ye çıktığında tüm tesislerde dezentegrasyon değeri önemli ölçüde artış göstermektedir. Tüm düzeylerde en düşük dezentegrasyon değerinin Samsun AAT'de, daha sonra Düzce AAT'de elde edildiği de göze çarpmaktadır.
- Tesisler arasında yapılan çoklu karşılaştırma sonucunda ise, dezentegrasyon ölçümüne göre aynı iki homojen grup ortaya çıkmaktadır: Buna göre, Marmara Bölgesi'ndeki tesisler (Kocaeli-İstanbul) bir grubu ve Karadeniz Bölgesi'ndeki tesisler (Samsun-Düzce) ikinci grubu oluşturmaktadır. Kocaeli-İstanbul grubu için ortalama dezentegrasyon değeri 31,38 iken, Samsun-Düzce grubu için 10,66'dır.
- Ultrasonikasyon ile dezentegre edilen çamurlarda gerçekleştirilen partikül boyutu ölçümleri sonucunda elde edilen beş parametre (yüzeysel ağırlık ortalaması, hacimsel ağırlık ortalaması, $d(0,1)$, $d(0,5)$ ve $d(0,9)$) öncelikle, aralarında yüksek derecede korelasyon olacağı düşüncesiyle Faktör Analizi ile incelenmiştir. Bu sayede veri indirgemesi amaçlanmıştır. Faktör Analizi sonucunda %80,5 açıklama oranı ile beş parametre tek faktöre indirgenebilmiştir. Kullanılan faktörleştirme tekniği, Temel Bileşenler Analizi'dir. Partikül boyutuna ilişkin beş parametrenin elde edilen faktördeki ağırlıkları aşağıda verilmiştir. Ağırlık değerlerinin yüksekliği, beş parametrenin elde edilen faktörle tanımlanabileceğini göstermektedir. Faktöre "partikül faktörü" adı verilmiştir.

8.1.1.6. Mikrodalga Dezentegrasyon Çalışmaları

Termal dezentegrasyon yöntemlerinden olan mikrodalga ön arıtımında iki farklı mikrodalga (Berghof MWS-3 Mikrodalga Yakma Ünitesi ve Mikrodalga fırını) kullanılarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Berghoff marka MWS-3+ cihazı ile (Şekil 8.7) gerçekleştirilen analizlerde Marmara Bölgesi'ni temsilen seçilen İzmit Kullar AAT ve Karadeniz Bölgesi için seçilen Samsun Bafra AAT farklı sıcaklık ve uygulama sürelerinde dezentegrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Seçilen her tesisin geri devir ünitesinden alınmış olan çamur numuneleri, maksimum numune hacmi 60 ml olan teflon tüplere 40'ar ml halinde ilave edilmiş ve kapalı kaplarda, basınçlı ortamda (30 bar), farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde çamur minimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 400 ml hacminde 100, 150, 175 ve 190 °C sıcaklıklarda 10, 20 ve 30 dakika boyunca çamurun ön arıtımı sağlanmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmalarında Berghof MWS-3+ cihazında optimum değer, **175 °C ve 10 dakika** olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.7 : Berghoff MWS-3+ Mikrodalga Parçalama Sistemi

Mikrodalga fırını kullanılarak yapılan dezentegrasyon çalışmasında Marmara Bölgesi için Kullar AAT çamur numunesi kullanılmış olup 90, 360 ve 600 W'larda farklı zamanlarda (10, 20 ve 30 dakika) 400 ml çamurun dezentegrasyonu sağlanmıştır. Mikrodalga fırını kullanılan çalışmada **optimum değer 600 W ve 20 dakika** olduğu tespit edilmiştir (Tablo 8.26).

Tablo 8.26 : Kocaeli Kullar AAT mikrodalga (güç kontrollü) çalışması dezentegrasyon dereceleri

Güç (W)	DD % 10 dak.	DD % 15 dak.	DD % 20 dak.
90	0,13	0,29	0,21
360	15,92	16,76	50,98
600	18,31	26,69	36,64

Mikrodalga çalışmalarında tüm tesisler için denenen sıcaklık ve süreler Tablo 8.27’de özetlenmektedir. Çalışmalar esnasında istenilen sıcaklıkta belirlenen sürelerde denemeler yapılırken aynı zamanda cihazın gücü (90%), buna bağlı olarak belirtilen sıcaklığa yükselme zamanı ve kaplar içerisindeki basınçlar cihazın ekranından izlenmiştir.

Tablo 8.27 : Mikrodalga dezentegrasyon çalışmalarında arıtma çamuru numunelerine uygulanan sıcaklık ve süre değerleri

Sıcaklık (°C)	Süre (dakika)
100	10
	20
150	10
	20
	10
175	20
	30
	10
190	10
	20

Mikrodalga ile dezentegrasyon çalışması sonuçları

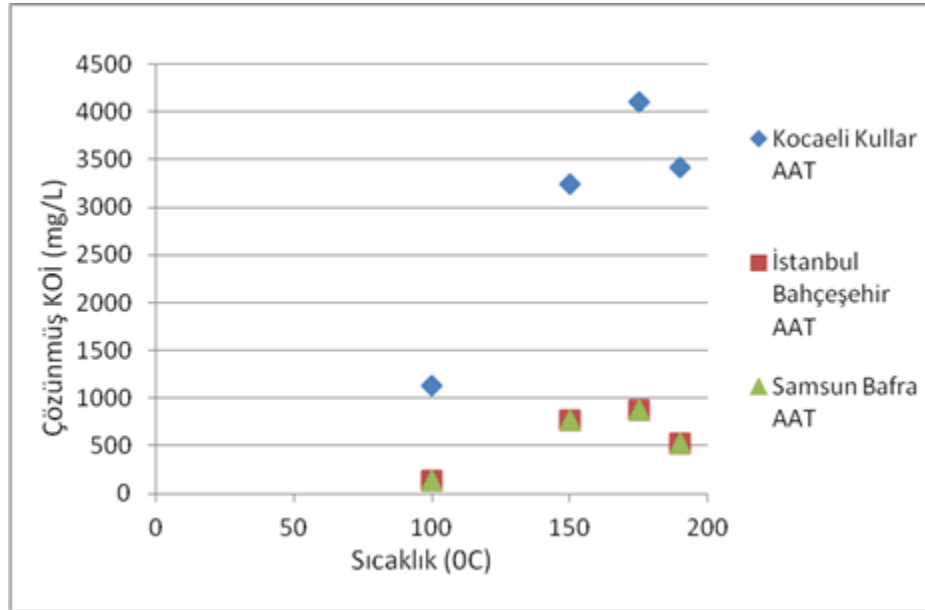
Tablo 8.28 ve Tablo 8.29’da verilmektedir. 10 ve 20 dakikalık mikrodalga uygulaması sonrasında elde edilen ÇKOİ değerlerinin sıcaklığa karşı değişimleri ise Şekil 8.8 ve Şekil 8.9’da gösterilmektedir.

Tablo 8.28 : Mikrodalga çalışması sonucunda ÇKOİ değerlerinde tesis bazında elde edilen değişimler

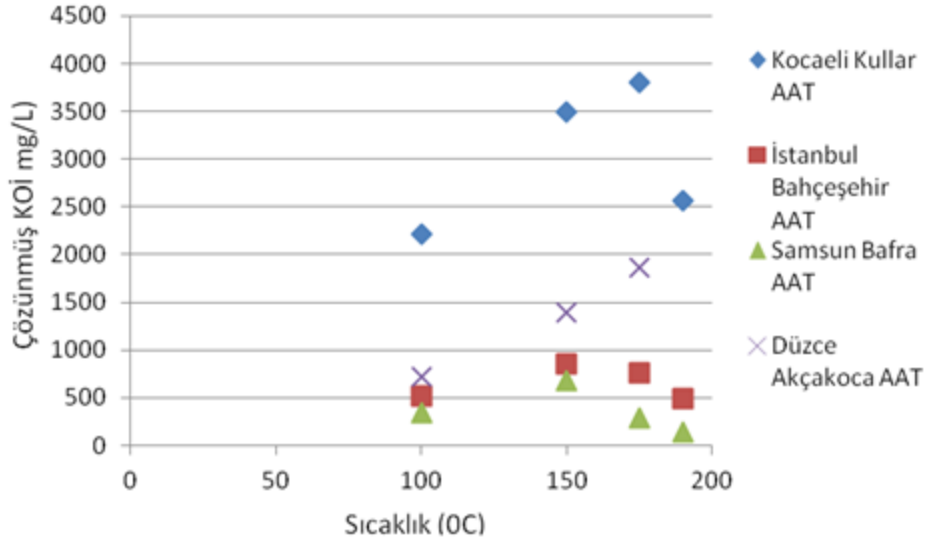
Uygulanan Koşullar	Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	Samsun Bafra AAT (Evsel)	Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)
ÇKOİ (mg/L)				
----	122	210	194	561
100°C 10'	1125	133	116	
100°C 20'	2219	518	345	717
150°C 10'	3248	768	758	
150°C 20'	3498	853	684	1391
175°C 10'	4100	880	339	340
175°C 20'	3810	760	284	
175°C 30'	3735	648	243	1863
190°C 10'	3415	524	196	
190°C 20'	2562	487	147	

Tablo 8.29 : Mikrodalga uygulaması sonucunda seçili tesisler için elde edilen dezentegrasyon dereceleri

Uygulanan Koşullar	Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	Samsun Bafra AAT (Evsel)	Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)
	DD (%)			
100°C 10'	10,40	<0	<0	
100°C 20'	21,75	3,28	2,61	3,05
150°C 10'	32,42	5,94	9,77	
150°C 20'	35,01	6,84	8,49	16,26
175°C 10'	41,25	7,13	2,51	<0
175°C 20'	38,25	5,85	1,56	
175°C 30'	37,47	4,66	0,85	25,50
190°C 10'	34,15	3,34	0,03	
190°C 20'	25,30	2,95	<0	



Şekil 8.8: 10 dakikalık mikrodalga uygulaması sonucunda elde edilen ÇKOİ değerleri



Şekil 8.9 : 20 dakikalık mikrodalga uygulaması sonucunda elde edilen ÇKOİ değerleri

Mikrodalga dezintegrasyon çalışmalarında dezintegrasyon derecelerine bağlı olarak elde edilen sonuçlar, her tesis çamurunda farklılık göstermiştir. Özellikle Düzce Akçakoca AAT'den alınan çamur numunelerinde artması beklenen çözünmüş KOİ değeri, mikrodalga uygulaması sonucunda azalma göstermiş, sıfırın altında dezintegrasyon dereceleri hesaplanmıştır. Diğer yandan, Kocaeli Kullar AAT için mikrodalga parçalama yönteminin en etkili çamur ön arıtma yöntemi olduğu görülmektedir. Tüm tesislerden elde edilen çözünmüş KOİ değerleri ve dezintegrasyon dereceleri karşılaştırıldığında, Kocaeli Kullar ve İstanbul Bahçeşehir AAT için mikrodalga optimum çalışma değerinin 175 °C'de 10 dakika olduğu, Samsun Bafra AAT için ise bu değer 150 °C'de 20 dakika olduğu görülmektedir.

Mikrodalga uygulaması sonrasında dezintegre edilmiş çamur numunelerinde kapiler emme süresi (KES), viskozite ve partikül boyut dağılımı analizleri gerçekleştirilmiş olup, elde edilen değerler Tablo 8.30, Tablo 8.31 ve

Tablo 8.32'de gösterilmiştir.

Tablo 8.30 : Mikrodalga ile dezintegre edilen çamurlarda gerçekleştirilen kapiler emme süresi (KES) analiz sonuçları

Numune	10 dk	20 dk	20 dk	20 dk	30 dk	10 dk	10 dk
	175 °C	100°C	150 °C	175 °C	175 °C	100 °C	150 °C
KES (sn)							
Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	436,6				479,1		
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	17			18,3		23,4	17,4
Samsun Bafra AAT (Evsel)	37,8			56,0		63,5	50,0

Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)	152,0	47,3	162,8	55,2
------------------------------	-------	------	-------	------

Tablo 8.31 : Mikrodalga ile dezentegre edilen çamurlarda gerçekleştirilen viskozite analizi sonuçları

Numune	10 dk	20 dk	20 dk	20 dk	30 dk	10 dk	10 dk
	175 °C	100 °C	150 °C	175 °C	175 °C	100 °C	150 °C
Viskozite (cP)							
Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)	31,2				29,2		
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	14,4			11,6		12,4	11,2
Samsun Bafra AAT (Evsel)	14,4			12,4		12,0	11,2
Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)	13,6	11,6	10,4		11,2		

Tablo 8.32 : Mikrodalga ile dezentegre edilen çamurlarda gerçekleştirilen partikül boyutu analizi sonuçları

Numune	Yüzeysel	Hacimsel	d (0.1)	d (0.5)	d (0.9)
	ağırlık	ağırlık	µm	µm	µm
	ortalaması	ortalaması			
	D[3.2]	D[4.3]			
Kocaeli Kullar AAT (Kentsel)					
Ham çamur	36.400	81.931	18.763	63.037	145.369
10 dk. Mikrodalga uygulaması sonrası	86.094	173.504	50.102	147.851	331.816
30 dk. Mikrodalga uygulaması sonrası	67.027	145.140	38.547	112.010	261.114
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)					
Ham çamur	48.086	151.427	24.857	83.805	269.358
10 dk. Mikrodalga uygulaması sonrası	116.235	258.007	65.359	214.090	517.681
20 dk.-175 °C Mikrodalga uygulaması sonrası	145.195	431.406	71.195	313.989	980.080
Samsun Bafra AAT (Evsel)					
Ham çamur	40.941	86.411	21.075	72.627	156.196
10 dk. Mikrodalga uygulaması sonrası	141.876	442.387	69.951	330.954	988.931
20 dk.-175 °C Mikrodalga uygulaması sonrası	176.335	572.458	80.867	468.250	1243.838
Düzce Akçakoca AAT (Kentsel)					
Ham çamur	28.578	81.168	14.367	46.629	145.607
10 dk. Mikrodalga uygulaması sonrası	33.376	130.970	21.851	74.286	284.268

Mikrodalga dezintegrasyonu çalışmalarına ait istatistik sonuçlar incelendiğinde elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmektedir:

- Üç tesisten mikrodalga çalışması sonucunda sekiz farklı koşulda alınan KOİ ölçümleri arasında istatistiksel olarak fark olup olmadığına dair inceleme Üç Yönlü ANOVA ile yapılmıştır. Hem tesisler ($p=0,000$), hem sıcaklık düzeyleri ($p=0,012$) arasında istatistiksel olarak anlamlı fark tespit edilmiştir. **Uygulanan süreye göre anlamlı farklılık bulunamamıştır ($p=0,815$).**
- Mikrodalga ile dezentegre edilen çamurlarda gerçekleştirilen partikül boyutu ölçümleri sonucunda elde edilen beş parametre (yüzeysel ağırlık ortalaması, hacimsel ağırlık ortalaması, $d(0,1)$, $d(0,5)$ ve $d(0,9)$) de aralarında yüksek derecede korelasyon olacağı düşüncesiyle Faktör Analizi ile incelenmiştir. Öngörüldüğü gibi, ölçülen beş parametre arasında kuvvetli ilişki bulunduğu aşağıda verilen korelasyon matrisinden anlaşılmaktadır. KMO değerinin %77,9 bulunması Faktör Analizi için örneklem yeterliliğine, Bartlett Küresellik testi sonucunun anlamlı bulunması da ($p=0,000$) faktörleştirmeye uygun bir veri seti ile çalışıldığına işaret etmektedir. Faktör Analizi sonucunda %97,179 açıklama oranı ile beş parametre tek faktöre indirgenebilmiştir. Kullanılan faktörleştirme tekniği, Temel Bileşenler Analizi'dir. Partikül boyutuna ilişkin beş parametrenin elde edilen faktördeki ağırlıkları aşağıda verilmiştir. Tanımlanan faktöre "partikül faktörü" adı verilmiştir.

8.1.2. Marmara ve Karadeniz Bölgeleri için Minimizasyon Çalışmaları Değerlendirmesi

İP8 kapsamında Marmara ve Karadeniz Bölgeleri'nden seçilen AAT'lerin aktif çamur geri devir hattından alınan arıtma çamuru örneklerine uygulanan tüm dezintegrasyon yöntemlerinin optimizasyon çalışma sonuçları değerlendirilerek; dezintegrasyon derecesine göre en etkili yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Tablo 8.33'de tüm uygulanan yöntemlere göre elde edilen dezintegrasyon derecesi sonuçları özetlenmiştir.

Dezintegrasyon derecesi sonuçları incelendiğinde, hem evsel hem de kentsel AAT'lerden alınan çamur örnekleri üzerinde **ultrasonikasyon** ve **mikrodalga** dezintegrasyon yöntemlerinin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Bunun yanı sıra, alkali uygulamasında elde edilen dezintegrasyon dereceleri ultrasonikasyon uygulamasından elde edilen dezintegrasyon derecelerine çok yakın olarak bulunmuş, hatta bazı tesislerde daha yüksek değerler hesaplanmıştır. Ancak, tam ölçekli uygulamalar ve bu uygulamalar için

kullanılacak kimyasal miktarları ve alkali dezentegrasyonun çamur susuzlaştırılabilirliğini azami ölçülerde kötüleştirmesi düşünüldüğünde, ultrasonik dezentegrasyonun daha pratik bir yöntem olacağı düşünülmektedir. DD parametresi dışında, minimizasyonun bir göstergesi olarak partikül boyut dağılımı sonuçları dikkate alındığında, dezentegrasyon uygulamalarının çamur partikül boyutunda azalmalara neden olduğu, ancak bunlar içinde en önemli indirgemelerin ultrasonikasyon uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 8.33 : Marmara ve Karadeniz Bölgeleri'nde Seçilen Tesislerde Çamurlara Uygulanan Ön İşlemlere Göre Elde Edilen Dezentegrasyon Derecesi Sonuçları

Numune	Dezentegrasyon derecesi, DD (%)					
	Ultrasonik uygulama	Fenton uygulaması	Ozon uygulaması	Mikrodalga uygulaması	Alkali Uygulaması	PEF Uygulaması
İzmit Kullar AAT (Kentsel)	83,64	3,48	10,99	41,25	39,35	10,90
İstanbul Bahçeşehir AAT (Evsel)	70,28	3,79	18,62	7,13	43,16	-
Samsun Bafra AAT (Kentsel)	30,05	1,77	4,40	9,77	59,55	-
Düzce Akçakoca AAT (Evsel)	20,52	4,47	-	25,50	33,18	-

Sonuçlar dikkate alındığında, ultrasonik ve mikrodalga ön işlemleri ve stabilizasyon işlemleri sırasında uygulanan enzimatik arıtmanın İP9 kapsamında gerçekleştirilen stabilizasyon çalışmalarında arıtma çamurlarına uygulanmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda da stabilizasyon çalışmalarına başlanmış olup, tamamlanmış çalışmalar İP9 kapsamında detaylı olarak rapor edilmiştir.

8.1.3. Arıtma Çamurunda Kalıntı Antibiyotik Tespiti ve İleri Oksidasyon Prosesinin Uygulanması ile Çamurda Antibiyotik Giderimi

Arıtma çamurunda seçilen mikrokirleticinin kimyasal oksidasyon ile gideriminin araştırması için öncelikle kantitatif analizi sağlayacak metod geliştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Arıtma çamurunda yüksek adsorplanma özelliği gösteren tetrasiklin grubu antibiyotiği temsili mikrokirletici olarak seçilmiştir. Marmara Bölgesindeki bir atıksu arıtma tesisinden (Paşaköy

AAT) alınan çamur örnekleri sentetik olarak tetrasiklin antibiyotikleri ile kirletilerek analiz için uygun şartların saptanması araştırılmıştır. Çözücü ekstraksiyonuna tabi tutulan örneklerden likit kromatografi analizinde girişimlere neden olacak bileşenlerin uzaklaştırılması ve antibiyotiğin derişiminin artırılması amacıyla iki farklı kartuş sistemi ile katı faz ekstraksiyonu uygulanmış ve hazırlanan örneklerdeki antibiyotik analizi yüksek basınçlı likit kromatografi cihazında UV dedektörü ile gerçekleştirilmiştir. Bu grup antibiyotikler için ultrasonik çözücü ekstraksiyon veriminin yüksek olduğu saptanmış ve çalışmalara bu yöntem ile devam edilmiştir. Gerek mevsimsel değişimler gerekse mevsim içinde farklı dönemlerde alınan örneklerde analiz yönteminin performansı gerikazanım değerleri ile saptanmıştır. Ayrıca kimyasal oksidasyon proseslerinin (ozon ve Fenton) sözkonusu antibiyotik ile kirletilmiş çamur örneklerinden giderim performanslarının belirlenmesi amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

8.1.3.1. Arıtma Çamuru Karakterizasyonu

Atıksu arıtma çamurunda kalıntı antibiyotik tespiti çalışmaları, Marmara Bölgesi'nde seçilen bir ileri atıksu arıtma tesisi geri devir pompasından alınan aktif çamur örnekleri ile gerçekleştirilmiştir. Atık aktif çamur örnekleri 4 °C'de saklanmış ve toplama anından itibaren maksimum 1 hafta içinde kullanılmıştır.

Arıtma çamuru karakterizasyonu amacıyla, katı madde analizi (toplam katı madde-TKM, askıda katı madde-AKM, uçucu katı madde-UKM, uçucu askıda katı madde-UAKM) ve kimyasal oksijen ihtiyacı analizleri (toplam kimyasal oksijen ihtiyacı-KOİ, çözünmüş kimyasal oksijen ihtiyacı-ÇKOİ) standart metodlara uygun şekilde yapılmıştır [1]. Çamurdaki nutrientler (toplam fosfor-TP, toplam Kjeldahl nitrojeni-TKN, amonyum-NH₄⁺, reaktif fosfat-PO₄³⁻, nitrat-NO₃⁻) Hach talimatlarına göre kolorimetrik olarak tayin edilmiştir [2]. Seçilen parametrelerin sıvı fazda çözünmüş miktarlarının analizleri çamurun önce santrifüjlenmesi (5000g, 10 dk; Eppendorf Centrifuge 5804) ve takiben 0.45 µm filtreden (membrane filter, Sartorius, Germany) süzülmesi ile elde edilen çözültide gerçekleştirilmiştir. Farklı zamanlarda (01.01.2011-01.03.2012) toplanan atık aktif çamur örnekleri için gerçekleştirilen karakterizasyon verileri Tablo 8.34 ve Tablo 8.35'de sunulmaktadır.

Partikül metal konsantrasyonlarının saptanması amacıyla kurutulan (105 °C, 48 saat) çamur, öğütülerek 70 µm elekten geçirilmiş, ardından mikrodalga cihazında (Speedwave MWS-3+, BERGHOF) standart yönteme uygun şekilde parçalanmış ve çözümlenmiş metallerin kantitatif miktarlarının saptanması Atomik Absorpsiyon Spektroskopisi (AAS) (Perkin Elmer AAnalyst 300 Spectrophotometer) ve ICP-Optik Emisyon Spektrometre (Perkin Elmer Optima

2100 DV) cihazlarıyla ile gerçekleştirilmiştir. Çamurdaki partikül metallerin gram kuru katıdaki (KK) miktarları Tablo 8.35’de verilmektedir.

Tablo 8.34 : Arıtma Çamuru Karakterizasyonu

Parametre	Ortalama	Standart Hata
KOİ (mg/L)	9706,21	448.48
ÇKOİ (mg/L)	125,71	15.67
TKM (g/L)	10,43	0.51
AKM (g/L)	9,04	0.53
UKM (g/L)	5,91	0.20
UAKM (g/L)	4,38	0.09
TKN (mg/L)	436,63	25.70
TP (mg/L)	542,67	51.29
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	61,00	4.92
NH ₄ ⁺ (mg/L)	1,27	0.28
NO ₃ ⁻ (mg/L)	18,00	0.66
pH	6,42	0.03

Örnek sayısı=15

Tablo 8.35 : Arıtma Çamuru Partikül Metal Analiz Sonuçları

Metaller (g/g KK)	Ortalama	Standart Hata
Ni	0,36	0.06
Cr	0,43	0.07
Cu	0,68	0.13
Zn	0,93	0.10
Fe	13,78	1.52
Mn	0,50	0.05
Cd	0,00	0.00
Pb	0,05	0.02
Mg	8,28	1.06
Ca	38,23	7.18
Na	0,76	0.07
K	6,21	1.50

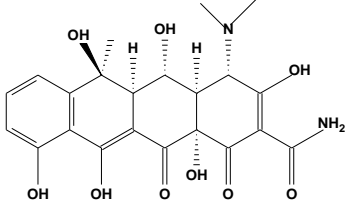
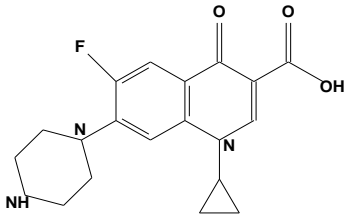
Örnek sayısı=8

8.1.3.2. Arıtma Çamurunda Antibiyotik Geri Kazanımı ve Kalıntı Tespiti

Arıtma çamurlarında yapılan araştırmalar sonucunda gerek rastlanma sıklığı gerekse miktar açısından tetrasiklin ve kinolon grubu antibiyotiklerinin önemli bir yere sahip olduğu anlaşılmıştır [3]. Çeşitli ülkelerde arıtma çamurları ile gerçekleştirilen çalışmalar içinde en yüksek tetrasiklinlerin konsantrasyonu 5 mg/kg TKM ve kinolon konsantrasyonu 41 mg/kg

TKM olarak bildirilmiştir [4]. Literatür verleri göz önüne alınarak Paşaköy atıksu arıtma tesisinden alınan çamur örneklerinde bu iki antibiyotik grubuna ait olan Oksitetrasiklin (OTC) ve ciprofloksasin (CIP) - varlığı araştırılmıştır. OTC ve CIP'in fizikokimyasal özellikleri (molekül ağırlıkları –MA, sudaki çözünürlükleri, adsorpsiyon katsayısı $-\log K_d$ ve pK_a değerleri) Tablo 8.36'te verilmektedir.

Tablo 8.36 : Antibiyotiklerin Fizikokimyasal Özellikleri

Antibiyotik	$\log K_d$	MA (g/mol)	Suda çözünürlük (mg/L)	pK_a
Oxytetracycline (OTC)	3.48 [5]	460.4	1000 [6]	3.2, 7.5, 8.9 [7]
				
Ciprofloxacin (CIP)	4.3 [8]	331.4	m.d.*	5.9, 8.9 [9]
				

* mevcut değil

Arıtma çamurunda antibiyotik analiz sonuçlarının değerlendirilebilmesi amacıyla seçilen iki antibiyotiğin çamurdan geri kazanımı saptanmıştır. Bu amaçla, Sigma-Aldrich'ten temin edilen OTC (95% HPLC) ve Bayer'den temin edilen CIP (95%, HPLC), 3.6 mg/g TKM konsantrasyonlarda çamura eklenmiştir. Antibiyotiklerin çamura adsorpsiyonunun sağlanması amacıyla sabit sıcaklıkta ($25 \pm 5^\circ\text{C}$) ve 200 rpm hızla 16 ± 1 saat çalkalama işlemi uygulanmıştır. Sıvı fazda yapılan antibiyotik analizi belirlenen sürede OTC ve CIP'in % 80-90'ının adsorplandığını göstermiştir. Sentetik olarak kirletilen çamurdan antibiyotiklerin ekstraksiyonu amacıyla 3×10 dakika süre ile USEPA metodunda önerildiği gibi [4] ultrasonik banyodan yararlanılmıştır (Sonorex super RK 510, 640 W). Ekstraksiyona tabi tutulan örneklerden sıvı faz 5, 000 g'de 10 dakika santrifüjleme ile ayrılmıştır (Eppendorf Centrifuge 5804). Ardından

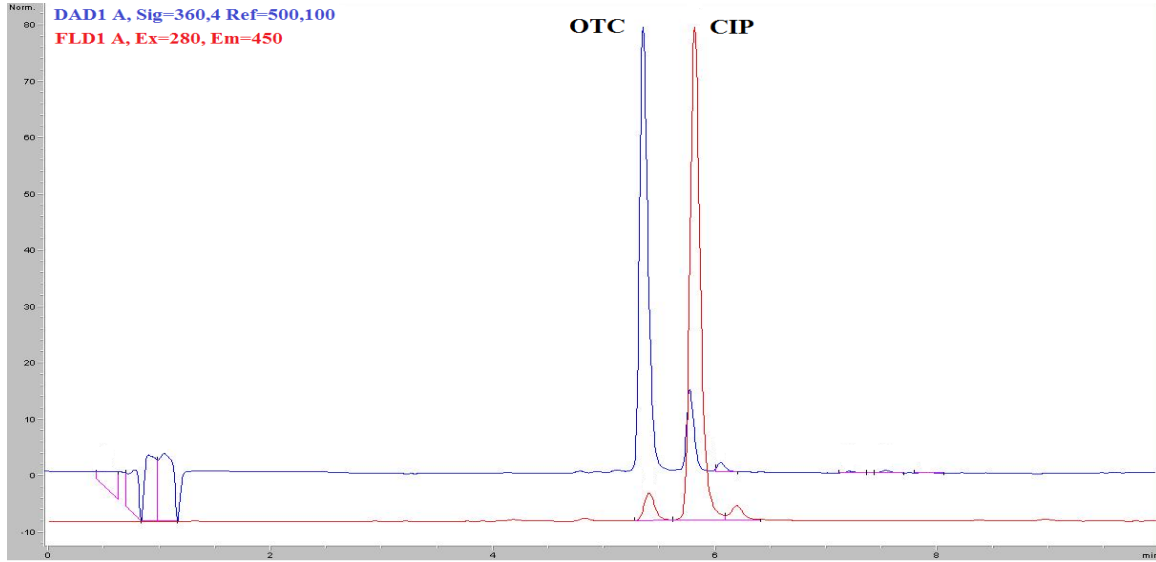
Solid Faz Ekstraksiyonu (SFE) ile örnekler temizlenmiş ve konsantre edilmiştir. SFE için SAX (6 ml/500 mg, Phenomenex, USA) ve HLB kartuşları ardışık olarak kullanılmıştır (6 ml/200 mg, Oasis Waters, Milford, MA, USA). Ekstraksiyon yöntemi ve SFE yöntemi için Blackwell ve diğ. [10] tarafından geliştirilen metod kullanılmıştır. Toplanan eluatlardaki antibiyotiklerin analizi, Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografi (HPLC, Agilent Technologies, 1100 series) ve ters faz C18 kolonu ile yapılmıştır. Kalibrasyonlar 0.1–10 mg/L konsantrasyon aralığında hazırlanmıştır. OTC, 360 nm’de UV dedektörü ile (DAD), CIP ise 450 nm’de floresans dedektörü (FLD) ile saptanmıştır. OTC ve CIP için ortalama geri kazanım değerleri sırasıyla % 78.8 ve % 59.6’dır. (Tablo 8.37)

Tablo 8.37 : Antibiyotiklerin Geri Kazanım Değerleri

Antibiyotikler	Ortalama	Standart	Örnek
		hata	sayısı
OTC (%)	78.8	1.83	32
CIP (%)	59.60	1.61	16

Şekil 8.10’da gerikazanım çalışması amacıyla çamura antibiyotik eklenmesi ve ekstraksiyonu neticesinde elde edilen HPLC kromatogramları sunulmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi çamur örneklerinin temizlenmesi başarılı bir şekilde sağlanmıştır. OTC ve CIP için arıtma çamurunda belirleme sınırları değerleri (LOD) sırasıyla 0.01 mg/g and 0.022 mg/g katı ağırlık olarak saptanmıştır.

01.01.2011-01.03.2012 tarihleri arasında alınan ve gerikazanım çalışmalarında da kullanılan tüm örneklerde OTC ve CIP ölçüm sınırları içinde tespit edilmemiştir.



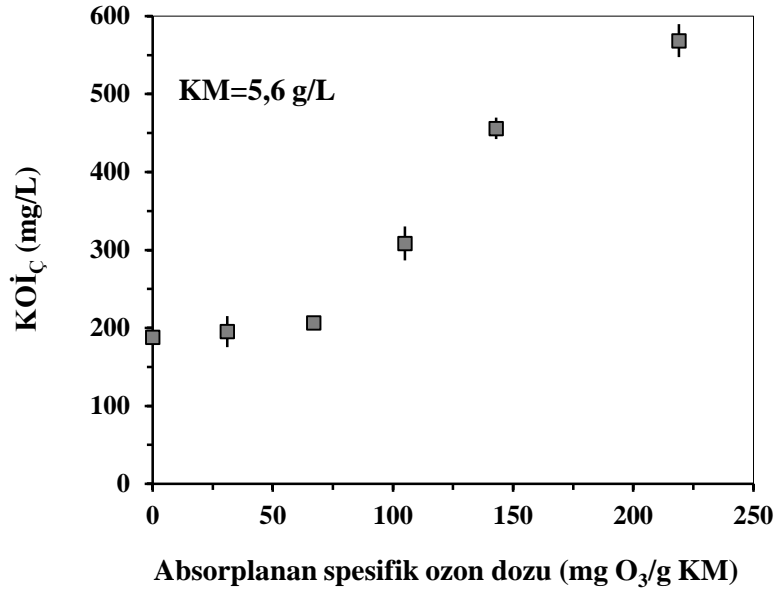
Şekil 8.10 : Gerikazanım Çalışmasında Elde Edilen HPLC Kromatogramları

8.1.3.3. Arıtma Çamurunun Kimyasal Oksidasyonu

Ozon Oksidasyonu

Çamur ozonlanması, organik madde çözünürleştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Arıtma çamurunun ozonlama işlemi silindirik cam kolon reaktörde ($\Phi = 6$ cm, $H = 78$ cm, 1.5 L hacim) gerçekleştirilmiştir. Ozon laboratuvar-tipi ozon jeneratörüyle (Fisher OZ 500), kuru ve saf oksijenden elde edilmiştir. O_3+O_2 gazı, reaktörün tabanına yakın bir bölmeden sinterlenmiş cam gaz difüzörü yardımıyla çamur içine kesintisiz olarak verilmiştir. Rektöre giren ve çıkan gazdaki ozon konsantrasyonları ozon analiz cihazı (Fisher Ozotron 23) ile saptanmıştır. Reaktörde karıştırma, çamurun pompa yardımıyla devrettirilmesi ve ayrıca reaktör tabanına yerleştirilen manyetik karıştırma işlemiyle sağlanmıştır. Çamur örneklerinin çöktürülmesi ile istenilen katı miktarına sahip örneklerle ozonlama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çamurun ozonlanması farklı deneysel koşullarda gerçekleştirilmiştir. Ozonlama sonucunda elde edilen solubilizasyon, farklı ozon dozlarında sıvı fazda ÇKOİ artışı olarak gözlemlenmiştir. ÇKOİ 'deki değişim çamurdaki katı madde miktarına ve uygulanan ozon miktarına göre önemli değişimler gösterdiği saptanmıştır ve bu sonuç literatür verilerinde gözlenen önemli farklılıkları açıklamaktadır. Bu husus göz önüne alınarak Şekil 8.11'de 5.6 g/L katı madde içeren arıtma çamurunun pH=9'da ozonlanması sonucu ÇKOİ değişimi ozonlama dozunun bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



Şekil 8.11 : Ozon Dozunun Arıtma Çamurunun ÇKOİ Çözünürleştirilmesine Etkisi

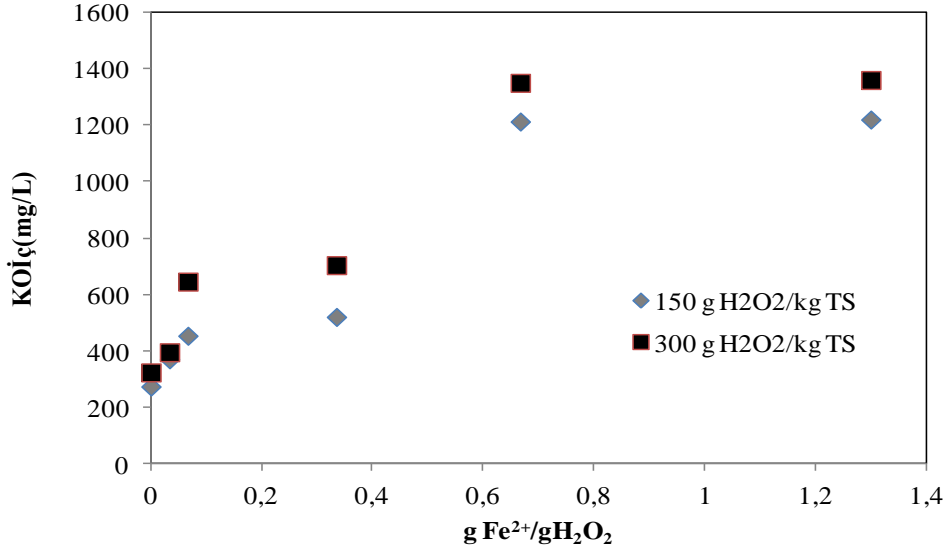
SPSS istatistiksel analiz programı (SPSS-11.5) ile yapılan veri analizinde, absorplanan spesifik ozon dozu ve ÇKOİ arasında istatistiksel olarak anlamlı, kuadratik bir ilişki bulunmuştur. Analiz sonuçlarına göre ÇKOİ'yi aşağıdaki modelle açıklamak mümkündür:

$$\text{ÇKOİ} = 197.690 - 2.0832 \times (\text{g O}_3/\text{g TKM}) + 0.0439 \times (\text{g O}_3/\text{g TKM})^2 - 0.0001 \times (\text{g O}_3/\text{g TKM})^3$$

Modelin açıkladığı varyasyonun tesadüfi olmadığı F değerinin istatistiksel olarak anlamlı olmasıyla açıklanmıştır (F=70.15; p=0.014). Model ÇKOİ verilerindeki varyasyonun % 99'unu açıklayabilmektedir (R²=0.99).

Fenton Oksidasyonu

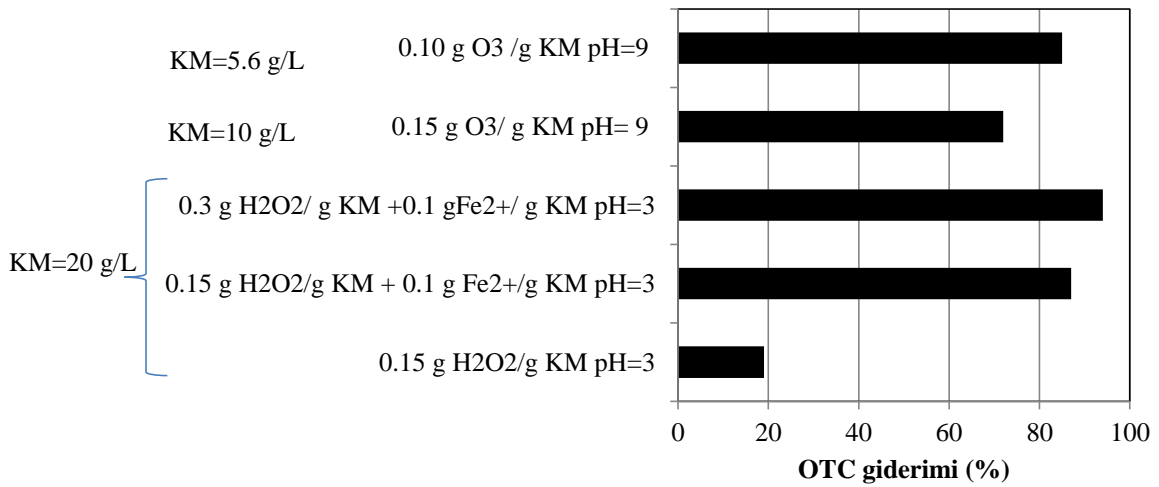
Fenton oksidasyon çalışmaları katı madde miktarı 20 g /L olan 300 ml'lik çamur örnekleri ile gerçekleştirilmiştir. Çamur pH değerinin 3'e ayarlanması (1 M H₂SO₄) ve demir tuzunun ilavesini takiben örneklerin homojenizasyonu sağlanmıştır. Oksidasyon hidrojen peroksitin ilavesi ile başlatılmıştır. Ön çalışmalarla belirlenen 2 saatlik sürede 200 rpm sürekli karıştırma neticesinde organik maddelerin çözünürleştirilmesi incelenmiştir. Şekil 8.12'de iki farklı hidrojen peroksit dozu için demir dozunun KOİ'nin çözünürleştirilmesine etkisi sunulmaktadır.



Şekil 8.12 : Fenton Oksidasyonunun Arıtma Çamurunun ÇKOİ Çözünürleştirilmesine Etkisi

Sentetik Olarak Kirletilen Çamurdan Antibiyotik Kirliliğinin Giderimi

20 mg/L konsantrasyonunda model antibiyotik OTC ile sentetik olarak kirletilen çamurun ozon ve Fenton oksidasyonu ile arıtımı neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 8.13'te sunulmuştur. Ozon oksidasyonunun antibiyotik giderim performansına çamurun katı madde konsantrasyonu olumsuz etki oluşturması nedeniyle ozonlama deneyleri 5.6 g/L ve 10 g/L katı madde konsantrasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Fenton oksidasyon deneyleri ise 20 g/L katı madde ile gerçekleştirilmiştir. Fenton oksidasyonunda gerek hidrojen peroksit konsantrasyonunun gerekse katalizör olarak ilave edilen demirin etkisi incelenmiştir.



Şekil 8.13: Fenton Ve Ozon Oksidasyonunun Model Antibiyotiğin Giderime Etkileri

Elde edilen sonuçlar çamura adsorbe olan antibiyotik gideriminde yüksek oksidasyon konsantrasyonunun gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır.

8.2. DEÜ Grubu Tarafından Yapılan Çalışmalar

DEÜ Proje Grubu tarafından, İP8 kapsamında, uygulanan dezentegrasyon çalışmaları için arıtma çamurlarının alınacağı tesisler; **Ege Bölgesi'nde** İzmir Çiğli İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi (kentsel) ve İzmir Foça İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi (evsel), **Akdeniz Bölgesi'nde** ise Antalya Lara İleri Atıksu Arıtma Tesisi (evsel) ve Adana Seyhan Atıksu Arıtma Tesisi (kentsel) olarak belirlenmiştir. Seçilmiş olan bu AAT'lerin son çökeltim havuzu geri devir hattından alınan çamur örnekleri kullanılarak dezentegrasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalardan elde edilen optimum koşullar Tablo 8.38'de özetlenmiş olup, bunlara ilave olarak gerçekleştirilen termal dezentegrasyon yöntemlerinden olan mikrodalga ön arıtımından elde edilen optimum koşullarda aynı tabloda sunulmaktadır. Optimizasyon çalışmaları sonuçlarına göre, ultrasonikasyon, ozon, fenton, mikrodalga dezentegrasyon yöntemleri en etkin dezentegrasyon yöntemleri olarak belirlenmiş ve bu ön arıtma yöntemleri kullanılarak, minimizasyon çalışmaları tamamlanmıştır. Çamur numunelerine uygulanan dezentegrasyon işlemlerinin verimleri, çözülmüş kimyasal oksijen ihtiyacı (ÇKOİ) ölçümlerine dayanan dezentegrasyon derecesi (DD) parametresi dikkate alınarak, Müller ve Pelletier'in (1998) yöntemine göre hesaplanmıştır. İP8 iş paketi kapsamında yapılan bu çalışmalara ait veri ve değerlendirmeler aşağıda detaylı olarak sunulmaktadır.

Tablo 8.38 : DEÜ Proje Grubu Tarafından Dezentegrasyon Çalışmalarında Esas Alınan Optimum Koşullar

Yöntem	Optimum Koşul	Dezentegrasyon Derecesi
Kimyasal dezentegrasyon		
Fenton Prosesi	60 g H ₂ O ₂ / kg TS, 0.067 g Fe(II)/ g H ₂ O ₂	% 25,2
Ozon Oksidasyonu	0,1 gO ₃ /g TKM	% 51,1
Mekanik dezentegrasyon		
Ultrasonik arıtma	9690 kJ/kgTKM	% 57,9
Biyolojik Parçalama		
Enzimatik arıtma	Alpha-amylase, Beta-glucanase (endo-(1,2(4)-), Lipase, Protease, Cellulase sınıfına ait 4 farklı hidrolitik ve 1 adet sellülotik enzimlerden oluşan karışım	Stabilizasyon aşamasında uygulanmaktadır (Bkz. İP9).
Termal dezentegrasyon		
Mikrodalga ön arıtımı	175 °C ve 10 dakika	

Ayrıca, İP9 kapsamında yürütülen stabilizasyon çalışmalarında anaerobik/aerobik çürütme sırasında etkin bir çamur parçalama yöntemi olarak enzimatik parçalama uygulanmıştır. Enzimatik parçalama yöntemi, bir ön arıtma işlemi olarak değil, stabilizasyon işleminin verimini artırmak amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Ege ve Akdeniz Bölgeleri'nde seçilen evsel/kentsel nitelikli AAT çamurlarına uygulanan enzimatik arıtım uygulamasına ait sonuçlar İP9 kapsamında rapor edilmiştir.

Ege ve Akdeniz Bölgeleri'nde seçilen dört tesisin geri devir hattından alınan aktif çamurlar örnekleri üzerinde yapılan karakterizasyon çalışmaları ile ilgili sonuçlar Tablo 8.39'de verilmiştir.

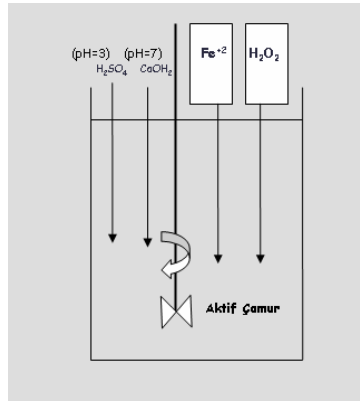
Tablo 8.39 : DEÜ Proje Grubu Tarafından Dezentegrasyon Çalışmalarında Kullanılan Arıtma Çamurunun Özellikleri

Parametreler	İzmir Çiğli AAT	İzmir Foça AAT	Antalya Lara AAT	Adana Seyhan AAT
pH	7,04	7,30	7,04	6,93
TKM (%)	1,12	0,76	1,02	0,68
UKM (%)	65,51	54,36	67,52	71,5
KOİ (mg/L)	10120	6480	12880	6400
ÇKOİ (mg/L)	136	112	160	400
KES (sn)	31,80	29,56	14,73	47,73
Partikül Boyut Dağılımı (µm)-				
Yüzeysel ağırlık ortalaması D[3,2]	67,201	18,756	52,233	18,856
Hacimsel ağırlık ortalaması D[4,3]	126,109	67,090	107,986	50,659
d (0.5)	112,457	43,965	90,748	37,882
d (0.9)	232,728	135,764	209,733	96,318
d (0.1)	40,712	11,479	28,310	11,931

8.2.1. Fenton Prosesi Dezentegrasyon Çalışmaları

Fenton prosesi asidik koşullarda (pH=3) ve ortam sıcaklık ve basıncında 1,5 litre hacmindeki çamur örneklerine uygulanmıştır. Çamur örneklerinin pH değerini sağlamak amacıyla örneklere ilk olarak derişik H₂SO₄ ilave edilmiştir. Yapılan çalışmada Fenton prosesi için

işletme parametreleri olan H_2O_2 ve $Fe(II)$ konsantrasyonlarındaki değişimin çamur dezentegrasyonu üzerindeki etkisinin belirlenmesi ve çamurun en yüksek derecede dezentegrasyonuna izin veren doz kombinasyonunun bulunması amacıyla Box-Wilson İstatistiksel Deney Metodu uygulanmıştır. En uygun $Fe(II)$ ve H_2O_2 dozunu belirlemek amacıyla bu metoda göre belirlenen konsantrasyonlarda, çamur örneklerine sırasıyla $Fe(II)$ ve H_2O_2 ilave edilmiştir. Daha sonra örnekler jar testi düzeneğinde 60 dakika süreyle 100 dev/dk hız ile karıştırılmıştır. Reaksiyon sonrasında çamur örnekleri $Ca(OH)_2$ kullanılarak nötrale edilmiştir. Fenton prosesi uygulamasında kullanılan deney sistemi Şekil 8.14'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 8.14 : Fenton Prosesi Deney Prosedürü Şematik Gösterimi

Çalışılan aktif çamur örneklerinde, Fenton prosesi dezentegrasyon işlemi sonrası elde edilen dezentegrasyon derecelerine ait sonuçlar Tablo 8.40'te, dezentegre edilmiş çamur numunelerinde elde edilen kapiler emme süresi (KES) ve partikül boyut dağılımı analizleri sonuçları ise sırasıyla Tablo 8.41 ve Tablo 8.42'da verilmektedir.

Tablo 8.40 : Ege ve Batı Akdeniz Bölgeleri'nde seçilen dört tesisin çamurlarına uygulanan Fenton ile dezentegrasyon sonrası hesaplanan dezentegrasyon dereceleri

Numune	TKM (mg/L)	Optimum doza karşı gelen g H_2O_2	Optimum doza karşı gelen g Fe	ÇKOİ (mg/L)	Dezentegrasyon Derecesi (%)
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	11232	0,67	0,045	680	21,38
İzmir Foça AAT (Evsel)	7450	0,46	0,03	896	46
Antalya Lara AAT (Evsel)	10328	0,62	0,041	400	18,18
Adana Seyhan AAT (Kentsel)	6746	0,4	0,027	1200	40

Tablo 8.41 : Optimum Dozda (60 g H₂O₂/gTKMve 4 gFe/gTKM) Fenton ile Dezentegre Edilen Çamurlarda Gerçekleştirilen Kapiler Emme Süresi (KES)

Numune	TKM (mg/L)	KES (s) Ham çamur	KES (sn)
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	11232	31,8	25
İzmir Foça AAT (Evsel)	7450	29,56	25
Antalya Lara AAT (Evsel)	10328	14,73	21,1
Adana Seyhan AAT (Kentsel)	6740	47,73	82,37

Tablo 8.42 : Fenton ile Dezentegre Edilen Çamurların Partikül Boyutu Analizi Sonuçları

	Yüzeysel ağırlık ortalaması D[3.2]	Hacimsel ağırlık ortalaması D[4.3]	d (0.1) µm	d (0.5) µm	d (0.9) µm
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)					
Ham çamur	67,201	126,109	40,712	112,457	232,728
4 g Fe (II)/kg TKM – 60 g H ₂ O ₂ /kgTKM	62,989	118,807	37,127	104,543	221,269
İzmir Foça AAT (Evsel)					
Ham çamur	18,756	67,090	11,479	43,965	135,764
4 g Fe (II)/kg TKM – 60 g H ₂ O ₂ /kgTKM	18,155	71,613	11,347	45,853	148,978
Antalya Lara AAT (Evsel)					
Ham çamur	52,233	107,986	28,310	90,748	209,733
4 g Fe (II)/kg TKM – 60 g H ₂ O ₂ /kgTKM	51,683	106,966	28,148	90,073	207,794
Adana Seyhan AAT (Kentsel)					
Ham çamur	18,856	50,659	11,931	37,882	96,318
4 g Fe (II)/kg TKM – 60 g H ₂ O ₂ /kgTKM	19,151	57,053	12,097	39,630	108,534

8.2.2. Ozon Oksidasyonu

Ozon arıtım çalışmalarında Şekil 8.15'te gösterilen OZO 1VTT model ozon jeneratörü ve 2 L hacminde bir pyrex-glass reaktör ve oksijen tüpünden oluşan bir sistem kullanılmıştır. Ozon %99,5 saflıkta okijen içeren tüpten elde edilmiştir.



Şekil 8.15 : Ozon ile Ön Arıtma için Kullanılan Deney Düzenegi

Ozonun reaktör içerisine homojen olarak dağılımını sağlamak amacıyla ponza taşı kullanılmıştır. Jeneratörün kapasitesi 5 g O₃/h olup, giriş ozon dozu Standard potasyum iyodür yöntemi kullanılarak 4,7 g O₃/h olarak ölçülmüştür. Çalışmada 1 litre hacmindeki örneklere 0 ile 60 dakika arasında değişen sürelerde ozon uygulanmış ve sonrasında örnekler dezenteğrasyon açısından değerlendirilmiştir.

Seçilen tesislerin çamurlarına uygulanan ozon işleminde elde edilen dezenteğrasyon dereceleri Tablo 8.43’de verilmiştir.

Tablo 8.43 : Seçilen Tüm AAT Arıtma Çamurları için Ozon Ön Arıtımı Deney Sonuçları

Numune	TKM (mg/L)	g O ₃ /g TKM	ÇKOİ (mg/L)	Dezenteğrasyon Derecesi (%)
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	11232	0,1	1400	49,68
İzmir Foça AAT (Evsel)	7450	0,1	936	48,36
Antalya Lara AAT (Evsel)	10328	0,1	640	36,36
Adana Seyhan AAT (Kentsel)	6746	0,1	1200	40

Ozon uygulaması sonrasında dezenteğre edilmiş çamur numunelerinde yapılan kapiler emme süresi (KES) analizi sonuçları Tablo 8.44’de, partikül boyut analizi sonuçları ise Tablo 8.45’de verilmektedir.

Tablo 8.44 : Ozon ile Dezentegre Edilen Çamurlarda Gerçekleştirilen Kapiler Emme Süresi (KES) Analizi Sonuçları

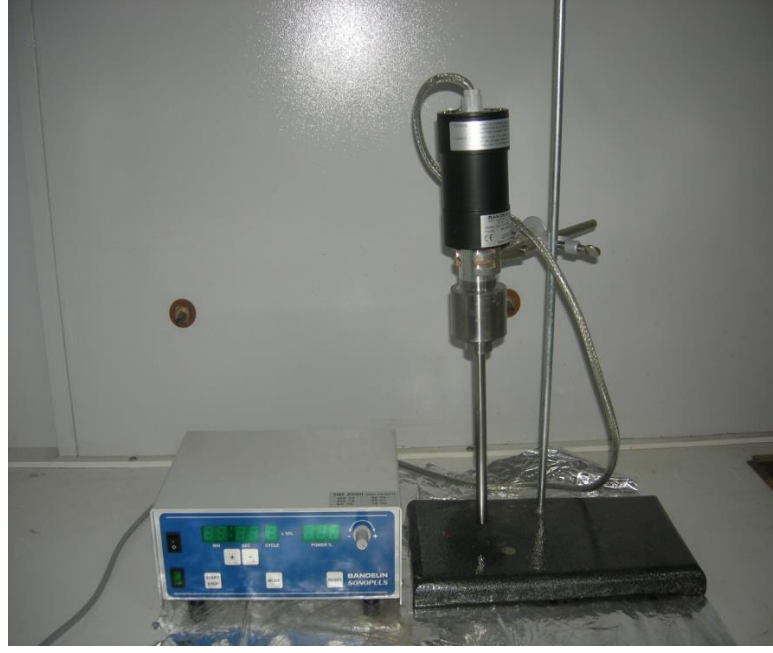
Numune	Ham çamur KES (sn)	0,1 gO ₃ /gTKM uygulamasında KES (sn)
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	31,8	22,5
İzmir Foça AAT (Evsel)	29,56	31,83
Antalya Lara AAT (Evsel)	14,73	15,26
Adana Seyhan AAT (Kentsel)	47,73	40

Tablo 8.45 : Ozon ile Dezentegre Edilen Çamurların Partikül Boyutu Dağılımı Analiz Sonuçları

	Yüzeysel ağırlık ortalaması D[3.2]	Hacimsel ağırlık ortalaması D[4.3]	d (0.1) µm	d (0.5) µm	d (0.9) µm
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)					
Ham çamur	67,201	126,109	40,712	112,457	232,728
0,1 gO₃/gTKM	76,032	145,936	46,028	131,613	267,379
İzmir Foça AAT (Evsel)					
Ham çamur	18,756	67,090	11,479	43,965	135,764
0,1 gO₃/gTKM	18,627	118,220	11,559	56,309	336,496
Antalya Lara AAT (Evsel)					
Ham çamur	52,233	107,986	28,310	90,748	209,733
0,1 gO₃/gTKM	68,694	140,023	40,854	124,201	261,094
Adana Seyhan AAT (Kentsel)					
Ham çamur	18,856	50,659	11,931	37,882	96,318
0,1 gO₃/gTKM	16,480	54,272	11,063	36,608	105,803

8.2.3. Ultrasonik Dezentegrasyon Çalışmaları

Ultrasonik arıtma uygulaması için Şekil 8.16'da görülen Bandelin- Sonopuls HD 2200 marka bir ultrasonik homojenleştirici kullanılmıştır. Bu sistem 0 kHz gibi düşük frekansa ve 200 W güce sahiptir. Çalışmada 500 mL hacmindeki çamur örnekleri cam beherlere konmuş ve farklı sürelerde ultrasonik arıtma uygulanmıştır. Değişen sürelerle (0-60 dk arasında) bağlı olarak ise 180 ile 10000 kJ/kgTS arasında değişen farklı özgül enerji değerleri ile çalışılmıştır.



Şekil 8.16 : Ultrasonik Ön Artırım için Kullanılan Deney Düzeneği

Ultrasonik homojenleştiricide ayarlanan güçlere karşılık gelen ultrasonik güç ve şiddetleri Tablo 8.46’te verilmiştir.

Tablo 8.46 : Hesaplanan Güç Değerleri

Ultrasonik homojenleştiricide ayarlanan güç değeri (Watt)	Ultrasonik Güç (Watt)	Güç Şiddeti (Watt/cm ²)	Güç Yoğunluğu (Watt/mL)
1	20	112	0,040
5	26	729	0,052
10	32	1794	0,064
15	36,2	3045	0,072
20	39,4	4419	0,079
25	40	5607	0,080
30	40,4	6796	0,081
35	41,2	8086	0,082
40	43,2	9690	0,086
45	44,4	11204	0,089
50	46	12897	0,092
55	46,4	14310	0,093
60	47,2	15880	0,094

Bu işlemi takiben; Ege ve Batı Akdeniz Bölgeleri'nde seçilen iki adet evsel ve iki adet kentsel atıksu arıtma tesisinden alınan çamur numunelerine uygulanan ultrasonikasyon işlemi, 500 mL hacmindeki cam beherlere konulan arıtma çamuru örneklerine uygulanmış ve çalışmaya başlamadan önce tüm çamur numuneleri ortam sıcaklığına (20±2 °C) getirilmiştir. Optimum dozlarda seçilen dört adet tesis için seçilen spesifik enerjilere ve arıtma çamurunun toplam katı madde konsantrasyonu değerlerine göre hesaplanan ve uygulanan sonikasyon süreleri Tablo 8.47'te gösterilmiştir.

Tablo 8.47 : Belirlenen Optimum Doz için Ege ve Batı Akdeniz Bölgeleri'nde Seçilen Dört Adet Tesis için Belirlenen Spesifik Enerjilere Karşı Uygulanan Sonikasyon Süreleri

Tesis	TKM (mg/L)	Spesifik Enerji (kJ/kg TKM)	Sonikasyon süresi (sn)
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	11232	9690	1260
İzmir Foça AAT (Evsel)	7450	9690	840
Antalya Lara AAT (Evsel)	10328	9690	1200
Adana Seyhan AAT (Kentsel)	6746	9690	780

Arıtma çamuru numunelerine farklı spesifik enerjilerde uygulanan ultrasonikasyon çalışması sonucunda elde edilen çözünmüş KOİ konsantrasyonları ve buna bağlı olarak hesaplanan dezentegrasyon dereceleri Tablo 8.48'da verilmektedir.

Tablo 8.48 : Ege ve Batı Akdeniz Bölgeleri'nde Seçilen Dört Tesisin Çamurlarına Uygulanan Optimum Spesifik Enerjide (9690 kJ/kg TKM) Ultrasonik Dezentegrasyon İşlemi Sonrası Elde Edilen ÇKOİ Konsantrasyonları ve Dezentegrasyon Dereceleri

	İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	İzmir Foça AAT (Evsel)	Antalya Lara AAT (Evsel)	Adana Seyhan AAT (Kentsel)
Dezentegrasyon Dereceleri (%)	55,97	49,30	51,51	80
Çözünmüş KOİ (mg/L)	1560	952	840	2000

Ultrasonikasyon işlemi sonrasında dezentegre edilmiş çamur numunelerinde kapiler emme süresi (KES) ve partikül boyut dağılımı analizleri gerçekleştirilmiş olup, elde edilen değerler Tablo 8.49 ve Tablo 8.50'de gösterilmiştir.

Tablo 8.49 : Ultrasonikasyon ile Dezentegre Edilen Çamurlarda Elde Edilen Kapiler Emme Süresi (KES) Sonuçları

Numune	KES (sn)	KES (sn)
	Ham çamur	SE 9690 kJ/kgTKM
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	31,8	438
İzmir Foça AAT (Evsel)	29,56	776,66
Antalya Lara AAT (Evsel)	14,73	274,63
Adana Seyhan AAT (Kentsel)	47,73	133,3

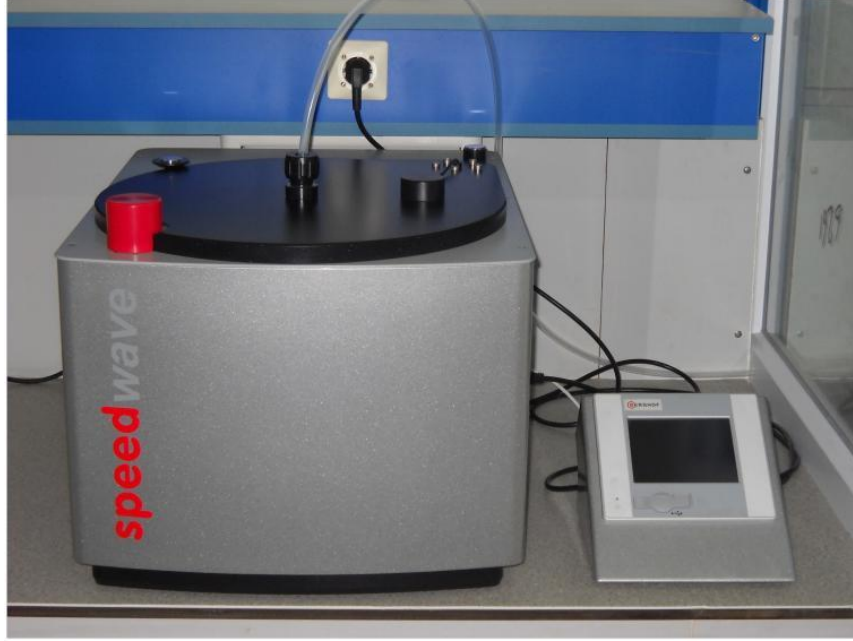
Tablo 8.50 : Ultrasonikasyon ile Dezentegre Edilen Çamurlarda Elde Edilen Partikül Boyutu Analizi Sonuçları

Numune	Yüzeysel	Hacimsel	d (0.1)	d (0.5)	d (0.9)
	ağırlık ortalaması D[3.2]	ağırlık ortalaması D[4.3]	µm	µm	µm
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)					
Ham çamur	67,201	126,109	40,712	112,457	232,728
SE=9690 kJ/kg TKM	4,480	25,535	1,791	9,690	60,905
İzmir Foça AAT (Evsel)					
Ham çamur	18,756	67,090	11,479	43,965	135,764
SE=9690 kJ/kg TKM	5,523	28,839	2,424	12,083	86,392
Antalya Lara AAT (Evsel)					
Ham çamur	52,233	107,986	28,310	90,748	209,733
SE=9690 kJ/kg TKM	7,032	22,334	3,596	12,478	56,963
Adana Seyhan AAT (Kentsel)					
Ham çamur	18,856	50,659	11,931	37,882	96,318
SE=9690 kJ/kg TKM	7,744	54,775	4,057	22,893	155,188

8.2.4. Mikrodalga Dezentegrasyon Çalışmaları

Mikrodalga dezentegrasyon çalışmalarında, Şekil 8.17’de gösterilen Berghoff marka MWS+3 model mikrodalga parçalama sistemi kullanılmıştır. En yüksek numune hacmi 60 mL olan kaplara 30 mL çamur numunesi konularak, belirlenen optimum çalışma aralığında 175 °C ve 10 dakikada basınçlı ortamda minimizasyon gerçekleştirilmiştir. Seçilen tesislerin çamurlarına

uygulanan mikrodalga dezentegrasyon işleminden elde edilen dezentegrasyon dereceleri Tablo 8.51’de verilmiştir.



Şekil 8.17 : Berghoff MWS+3 Speedwave Mikrodalga Parçalama Sistemi

Tablo 8.51 : Seçilen Tüm AATarıtma Çamurları için Mikrodalga Parçalama Ön İşlemi Deney Sonuçları

Numune	ÇKOİ (mg/L)	Dezentegrasyon Derecesi (%)
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	1600	57,55
İzmir Foça AAT (Evsel)	2560	143,66
Antalya Lara AAT (Evsel)	2960	212,12
Adana Seyhan AAT (Kentsel)	1280	44,00

Mikrodalga parçalama sonrasında dezentegre edilmiş çamur numunelerinde yapılan kapiler emme süresi (KES) analizi sonuçları Tablo 8.52’de, partikül boyut analizi sonuçları ise Tablo 8.53’de verilmektedir.

Tablo 8.52 : Mikrodalga Parçalama Yöntemi ile Dezentegre Edilen Çamurlarda Gerçekleştirilen Kapiler Emme Süresi (KES) Analizi Sonuçları (s)

Numune	Ham çamur KES (sn)	175 °C, 10 dk. mikrodalga uygulamasında KES (sn)
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	31,8	9,1
İzmir Foça AAT (Evsel)	29,56	18,6
Antalya Lara AAT (Evsel)	14,73	10,1
Adana Seyhan AAT (Kentsel)	47,73	9,6

Tablo 8.53 : Mikrodalga Parçalama Yöntemi ile Dezentegre Edilen Çamurların Partikül Boyutu Dağılımı Analiz Sonuçları

	Yüzeysel ağırlık ortalaması D[3.2]	Hacimsel ağırlık ortalaması D[4.3]	d (0.1) µm	d (0.5) µm	d (0.9) µm
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)					
Ham çamur	67,201	126,109	40,712	112,457	232,728
10 dk.-175 °C uygulaması	25,09	88,015	19,255	67,253	179,135
İzmir Foça AAT (Evsel)					
Ham çamur	18,756	67,090	11,479	43,965	135,764
10 dk.-175 °C uygulaması	22,789	54,133	16,545	41,844	89,333
Antalya Lara AAT (Evsel)					
Ham çamur	52,233	107,986	28,310	90,748	209,733
10 dk.-175 °C uygulaması	42,979	86,972	23,701	70,463	164,820
Adana Seyhan AAT (Kentsel)					
Ham çamur	18,856	50,659	11,931	37,882	96,318
10 dk.-175 °C uygulaması	15,482	68,741	11,584	42,891	142,198

8.2.5. Enzimatik parçalama

TÜBİTAK destekli yürütülen araştırmada, Alpha-amylase, Beta-glucanase (endo-(1,2(4)-), Lipase, Protease, ve Cellulase enzim sınıflarına ait 5 farklı hidrolitik ve selülotik enzim kullanılmıştır. Bu enzimler kullanılarak belirlenen optimum koşullar, İP 8 kapsamında yürütülen araştırmalarda Ege ve Akdeniz Bölgeleri'nde seçilen evsel/kentsel nitelikli AAT çamurlarına da uygulanarak, çamurların dezentegrasyon dereceleri belirlenmiştir. Enzimatik parçalama bir ön arıtım olarak değil, anaerobik çürütme sırasında etkileri belirlenen bir çamur parçalama yöntemidir. İlave edilen enzim dozuna bağlı olarak, aerobik ve anaerobik çürüme sırasında enzim ilave edilen reaktörler ile kontrol reaktöründe izlenecek analiz parametrelerine göre dezentegrasyon işleminin başarısı araştırılmıştır. Çalışmada kullanılmış olan enzimler, daha önceki araştırma projesinde (TÜBİTAK 104Y375) Novoenzymes Inc.'den temin edilen

enzimlerdir: Termamyl®120L, Type L, Ultraflo® XL, Lipex® 100L, Alcalase® 2.4 L FG, Celluclast® 1.5 L.

8.2.6. Ege ve Akdeniz Bölgeleri için Minimizasyon Çalışmaları Değerlendirmesi

İP8 kapsamında Ege ve Akdeniz Bölgeleri'nden seçilen AAT'lerin aktif çamur geri devir hattından alınan arıtma çamuru örneklerine uygulanan tüm dezenteğrasyon yöntemlerinin optimizasyon çalışma sonuçları değerlendirilerek dezenteğrasyon derecesine göre en etkili yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Tablo 8.54'de tüm uygulanan yöntemlere göre dezenteğrasyon derecesi sonuçları özetlenmiştir.

Tablo 8.54 : Seçilen Tesislerde Çamurlara Uygulanan Ön İşlemlere Göre Elde Edilen Dezenteğrasyon Derecesi Sonuçları

Numune	Dezenteğrasyon derecesi, DD (%)			
	Ultrasonik uygulama	Fenton uygulaması	Ozon uygulaması	Mikrodalga uygulaması
İzmir Çiğli AAT (Kentsel)	55,97	21,38	49,68	57,55
İzmir Foça AAT (Evsel)	49,30	46	48,36	143,66
Antalya Lara AAT (Evsel)	51,51	18,18	36,36	212,12
Adana Seyhan AAT (Kentsel)	80,00	40,00	40,00	44,00

Dezenteğrasyon derecesi sonuçları incelendiğinde, hem evsel hem de kentsel tesislerden alınan çamur örnekleri üzerinde ultrasonikasyon ve mikrodalga dezenteğrasyon yöntemlerinin daha başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. En yüksek DD değerleri mikrodalga ön işlemleri uygulamasında, Foça AAT ve Lara AAT evsel tesislerinden alınan çamur örnekleri için sırasıyla %143,66 ve %212,12 değerleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, ozon uygulamasında da ultrasonik uygulamada elde edilen sonuçlara çok yakın değerler hesaplanmıştır. Ancak, tam ölçekli uygulamalar düşünüldüğünde uygulama açısından ultrasonik uygulamanın daha pratik olacağı düşünülmüştür. DD parametresi dışında, minimizasyonun bir göstergesi olarak partikül boyut dağılımı sonuçları dikkate alındığında, dezenteğrasyon uygulamalarının çamur partikül boyutunda azalmalara neden olduğu, ancak bunlar içinde en önemli indirgemelerin ultrasonikasyon uygulamasında olduğu tespit edilmiştir.

Sonuçlar dikkate alındığında, ultrasonik ve mikrodalga ön işlemleri ve stabilizasyon işlemleri sırasında uygulanan enzimatik arıtmanın İP9 kapsamında gerçekleştirilen stabilizasyon

çalışmalarında arıtma çamurlarına uygulanmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda da yürütülmüş olan stabilizasyon çalışmaları İP9 kapsamında detaylı olarak rapor edilmiştir.

8.3. İTÜ Grubu Tarafından Yapılan Çalışmalar

İP8 kapsamında İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinden seçilen atıksu arıtma tesislerinin aktif çamur geri devir hatlarından alınmış arıtma çamurlarına uygulanması planlanan dezenteğrasyon yöntemlerinin optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilerek, optimum dezenteğrasyon uygulama koşulları belirlenmiştir. İTÜ Proje Grubu tarafından, dezenteğrasyon uygulanmış arıtma çamurları için seçilen tesisler; **İç Anadolu Bölgesinde** Ankara Büyükşehir Belediyesi (Tatlar) ASKİ Atıksu Arıtma Tesisi (kentsel) ve Nevşehir Atıksu Arıtma Tesisi (evsel), **Doğu Anadolu Bölgesinde** Elazığ Belediyesi Atıksu Arıtma Tesisi (kentsel), Van Erciş Belediyesi Atıksu Arıtma Tesisi (evsel) ve Malatya Belediyesi Atıksu Arıtma Tesisi (evsel); **Güneydoğu Anadolu Bölgesinde** GASKİ Atıksu Arıtma Tesisi (kentsel)'dir. Alınan çamur numunelerinin karakterizasyonu Tablo 8.55'te verilmektedir.

Belirlenen tesislerin aktif çamur geri devir hatlarından alınan arıtma çamuru örneklerine mekanik dezenteğrasyon yöntemlerinden ultrasonikasyon, termal dezenteğrasyon yöntemlerinden mikrodalga ön arıtımı ve kimyasal dezenteğrasyon yöntemlerinden olan Fenton, kireç ve ozon ile dezenteğrasyon yöntemleri uygulanmıştır.

Tablo 8.55 : Dezenteğrasyon çalışmalarda kullanılan arıtma çamuru karakterizasyonu

Parametreler	GASKİ AAT	Nevşehir AAT	Malatya AAT	Elazığ AAT	ASKİ AAT	Van Erciş AAT
TKM (mg/L)	9120	10550	7505	5660	5660	9120
AKM (mg/L)	9160	9560	6905	5090	5400	8460
UAKM (mg/L)	7455	7330	4635	4130	3980	5805
ÇKOİ (mg/L)	156	91	24	140	198	21
pH	6,69	6,43	6,93	6,94	6,98	6,85

8.3.1. Alkali Dezenteğrasyon Çalışmaları

Alkali dezenteğrasyon optimizasyonu; İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'nde seçilen atıksu arıtma tesislerindeki aktif çamur geri devir hatlarından alınan çamur numuneleri üzerinde uygulanmıştır. Bu kapsamda, 2 N NaOH çözeltisi ilavesiyle pH değerleri 10, 11 ve 12'ye ayarlanmış ve söz konusu pH değerlerinde çamur numuneleri 2, 6, 12 ve 24 saat boyunca karıştırılmıştır. Alkali ön-arıtım, 400 mL hacminde çamur numuneleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Belirlenen pH değerlerine ulaşmak için arıtma çamurlarına 2 N NaOH çözeltisinden eklenen hacimler Tablo 8.56’de, seçilen atıksu arıtma tesislerinden alınan çamurlara alkali dezentegrasyon uygulaması sonucunda elde edilen çözünmüş KOİ değerleri ise 8.57’de verilmektedir.

Tablo 8.56 : Alkali dezentegrasyonda arıtma çamurlarına 2 N NaOH çözeltisinden eklenen hacimler

Atıksu Arıtma Tesisleri	pH – Ham Çamur	pH – Ayarlanan	2 N NaOH (mL) – Eklenen
Ankara – Tatlar	7,82	10	1,65
		11	2,90
		12	4,50
Nevşehir	6,84	10	6,20
		11	9,25
		12	11,45
Elazığ	6,76	10	7,85
		11	12,40
		12	15,00
GASKİ	6,86	10	7,50
		11	11,50
		12	13,80

Tablo 8.57 : Alkali dezentegrasyon uygulaması sonucunda elde edilen ÇKOİ değerleri

Atıksu Arıtma Tesisleri	pH – Ayarlanan	Alkali Dezentegrasyon Süresi (saat)	ÇKOİ (mg/L)
Ankara – Tatlar	7,82	0	100
	10		700
	11	2	545
	12		895
	10		750
	11	6	600
	12		1025
	10		545
	11	12	300
	12		1205
	10		460
	11	24	315
12		1240	
Nevşehir	6,84	0	122
	10		820
	11	2	1450
	12		2110
	10		1045
	11	6	1800
	12		2350
	10		1135
	11	12	2305
	12		2815
	10		1130
	11	24	2280
12		2955	

Tablo 8.58 : Alkali dezentegrasyon uygulaması sonucunda elde edilen ÇKOİ değerleri

(devam)

Atıksu Arıtma Tesis	pH – Ayarlanan	Alkali Dezentegrasyon Süresi (saat)	ÇKOİ (mg/L)	
Elazığ	6,76	0	217	
	10		1760	
	11	2	2500	
	12		3250	
	10		1780	
	11	6	2810	
	12		3630	
	10		1915	
	11	12	2995	
	12		3810	
	10		1885	
	11	24	3150	
	12		3875	
	GASKİ	6,86	0	428
		10		1670
11		2	1975	
12			2645	
10			1865	
11		6	2195	
12			2825	
10			1685	
11		12	2655	
12			3710	
10			1710	
11		24	2800	
12			3775	

8.3.2. Fenton Oksidasyonu DeneYleri

Ankara (Tatlar), Malatya ve Van (Erciş) Evsel Atıksu Arıtma Tesisi Son Çöktürme Havuzu Çıkışı ile Elazığ, Gaziantep ve Nevşehir Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi Son Çöktürme Havuzu Çıkışı'ndan alınan geri devir hattı çamur numuneleri üzerinde yürütölen Fenton oksidasyonu deneYleri, 200 mL hacmindeki örneYler üzerinde pH = 3,0±0,2'de (Fenton oksidasyonu için optimum pH aralığında) ve T=20°C sıcaklıkta farklı H₂O₂ (50, 60 ve 70 mg H₂O₂/g TKM) ve Fe²⁺ (50, 70 ve 90 mg Fe²⁺/g H₂O₂) konsantrasyonları eşliğinde gerçekleştirilmiştir. Fenton oksidasyonu deneYlerinin başlangıç adımında, her bir çamur örneğinin pH değerini 3.0±0.2 aralığına getirmek amacıyla 6 N H₂SO₄ çözeltisinden faydalanılmıştır. Fe²⁺ kaynağı olarak FeSO₄.7H₂O tuzu (Merck, Almanya) kullanılmış ve %2'lik Fe²⁺ çözeltisi günlük olarak hazırlanmıştır. Oksidasyon reaksiyonunda gereken H₂O₂ konsantrasyonları ise, yoğunluğu 1.13 g/mL ve saflığı %35 olan stok H₂O₂ çözeltisi aracılığıyla elde edilmiştir. pH ayarlaması ve ihtiyaç duyulan Fe²⁺ ile H₂O₂ konsantrasyonlarının eklenmesi sonrasında, çoklu manyetik karıştırıcılar kullanılarak 60 dakika boyunca 100 devir/dakika değerinde hızlı karıştırma işlemi uygulanmıştır. Oksidasyon tepkimesi, her bir çamur numunesine %5'lik Ca(OH)₂ çözeltisi ilave edilerek pH değerinin 7-8 aralığına getirilmesi sayesinde durdurulmuştur. İkinci pH ayarlaması adımı sonucunda meydana gelen Fe(OH)₃ floklarının dağılmaması için çoklu manyetik karıştırıcıların hızı yavaş karıştırmaya (30 devir/dakika değerine) göre yeniden düzenlenmiştir. 30 dakika boyunca uygulanan yavaş karıştırma işleminin ardından her bir çamur numunesi, 10 dakika süresince 9000 devir/dakika hızında santrifüjlenmiştir (HettichLab Technology Universal 320, Almanya). Santrifüj kullanımı sonunda elde edilen çamur sıvıları, Millipore marka 0,45 µm gözenek çapındaki membran filtreler (Millex HV, PVDF) aracılığıyla süzölmüştür. Fenton oksidasyonu esnasında reaksiyona girmeden artakalan H₂O₂ bulunup bulunmadığından emin olmak için çözünmüş formdaki çamur numunelerine peroksit test stripleri (Merckoquant® 1.10081, Almanya) daldırılmıştır. Peroksit test striplerinin kullanılması sonucunda, çözünmüş formdaki çamur numunelerinin H₂O₂ içermediği gözlemlenmiştir. Çözünmüş formdaki çamur numunelerinin KOİ konsantrasyonları, ISO 6060 kapalı reflüks titrimetrik yöntemi uyarınca ölçölmüştür (ISO 6060, 1986). Fenton oksidasyonu deneYlerinde elde edilen sonuçlar, Tablo 8.59'da özetlenmiştir.

Tablo 8.59 : Fenton oksidasyonu deneylerinin sonuçları

Numune	TKM (mg/L)	mg H ₂ O ₂ / g TKM	mg Fe ²⁺ / g H ₂ O ₂	ÇKOİ (mg/L)	ΔÇKOİ (mg/L)		
ASKİ AAT	5665	---	---	198	---		
			50	50	384	186	
				70	390	192	
		90		380	182		
		60	50	317	119		
			70	303	105		
			90	332	134		
		70	50	317	119		
			70	334	136		
			90	410	212		
		Elazığ AAT	5660	---	---	140	---
					50	50	383
70	383					243	
90	375			235			
60	50			350	210		
	70			350	210		
	90			383	243		
70	50			367	227		
	70			375	235		
	90			383	243		
GASKİ AAT	9200			---	---	156	---
					50	50	567
		70	593			437	
		90	600	444			
		60	50	500	344		
			70	550	394		
			90	600	444		
		70	50	423	267		
			70	516	360		
			90	431	275		

Tablo 8.60 : Fenton oksidasyonu deneylerinin sonuçları (devam)

Numune	TKM (mg/L)	mg H ₂ O ₂ / g TKM	mg Fe ²⁺ / g H ₂ O ₂	ÇKOİ (mg/L)	ΔÇKOİ (mg/L)
Malatya AAT	7505	---	---	24	---
		50	50	163	139
			70	139	115
			90	146	122
		60	50	173	149
			70	159	135
			90	166	142
			50	173	149
		70	70	146	122
			90	190	166
---	---		91	---	
Nevşehir AAT	10550	---	---	550	459
		50	50	575	484
			70	482	391
			90	550	459
		60	50	465	374
			70	558	467
			90	347	256
			50	542	451
		70	70	550	459
			---	---	22
50	50		199	177	
	70	200	178		
	90	202	180		
Van Erciş AAT	9120	60	50	196	174
			70	207	185
			90	219	197
		70	50	228	206
			70	220	198
			90	233	211

8.3.3. Ozonlama Deneyleri

Ankara (Tatlar), Malatya ve Van (Erciş) Evsel Atıksu Arıtma Tesisi Son Çöktürme Havuzu Çıkışı ile Elazığ, Gaziantep ve Nevşehir Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi Son Çöktürme Havuzu Çıkışı'ndan alınan geri devir hattı çamur numuneleri üzerinde yürütülen ozonlama deneylerinde, saf oksijenden (saflık > %99.9) ozon üretimi Sander Aquarientechnik S1000 marka ozon jeneratörü (Uetze-Eltze, Almanya) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler, etkin derinliği 60 cm olan 1,5 litre hacmindeki reaktöre 0,6 litre çamur numunesi konarak 0,5 bar basıncında yürütülmüştür. Ozon difüzyonu, yukarı akış difüzyonu şeklinde uygulanmıştır; bu yöntem uyarınca ozon gazı, sinterlenmiş cam levha difüzörün yardımıyla reaktör tabanına

iletmiştir. Boy-yükseklik-derinlik ölçütleri sırasıyla 220x145x110 mm olan maksimum 24 W gücündeki ozon jeneratörünün ozon üretimi 1~1000 mg/saat aralığında yer almaktadır. %2 KI çözeltisi içeren iki adet gaz yıkama şişesi, uygulanan ozon miktarının belirlenebilmesi için ozon jeneratörüne bağlanmıştır. Ozonlama prosesinin ardından her bir çamur numunesi, 10 dakika süresince 9000 devir/dakika hızında santrifüjlenmiştir (HettichLab Technology Universal 320, Almanya). Santrifüj kullanımı sonunda elde edilen çamur sıvıları, Millipore marka 0,45 µm gözenek çapındaki membran filtreler (Millex HV, PVDF) aracılığıyla süzülmüştür. Çözünmüş formdaki çamur numunelerinin KOİ konsantrasyonları, ISO 6060 kapalı refluks titrimetrik yöntemi uyarınca ölçülmüştür (ISO 6060, 1986). Ozonlama deneylerinde elde edilen sonuçlar, Tablo 8.61’de özetlenmiştir.

Tablo 8.61 : Ozonlama deneylerinin sonuçları

Numune	TKM (mg/L)	mg O ₃ /mg TKM	ÇKOİ (mg/L)	Δ ÇKOİ (mg/L)
ASKİ AAT	5665	---	198	---
		0,05	238	40
		0,10	271	73
		0,15	320	122
		0,20	362	164
Elazığ AAT	5660	---	140	---
		0,05	156	16
		0,10	304	164
		0,15	435	295
		0,20	485	345
Gaziantep AAT	9200	---	156	---
		0,05	320	164
		0,10	444	288
		0,15	805	649
		0,20	1010	854
Malatya AAT	7505	---	24	---
		0,05	66	42
		0,10	115	91
		0,15	156	132
		0,20	238	214
Nevşehir AAT	10550	---	91	---
		0,05	164	73
		0,10	312	221
		0,15	508	417
		0,20	836	745
Van Erciş AAT	9120	---	22	---
		0,05	139	117
		0,10	254	232
		0,15	476	454
		0,20	746	724

Not 1: Uygulanan (ozonlama cihazından verilen) ozon miktarı, 630 mg/saat olarak belirlenmiştir.

Not 2: Ozon dozu 0,20 mg O₃/mg TKM değerinin üzerine çıkarıldığında, Elazığ ve Gaziantep Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi Son Çöktürme Havuzu Çıkışı'ndan alınan geri devir hattı çamur numunelerinde aşırı köpük oluşumu gözlemlenmiştir. Bu çerçevede, reaktöre beslenmesi gereken çamur örneği hacmi 0,6 litre değeriyle sınırlandırılmış ve mevcut reaktörde 0,25 mg O₃/mg TKM dozundaki deneyler gerçekleştirilememiştir.

8.3.4. Ultrasonik Çamur Dezentegrasyonu

Ultrasonikasyon deneyleri, ultrasonik homojenizatör (Bandelin Sonopuls HD 3200) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.18). Ultrasonik homojenizatör, VS 70T model prob kullanılarak 20 kHz frekansta ve 200 W güç kaynağında işletilmiştir. Seçilen amplitüd değeri %100'dür. Ultrasonik dezentegrasyon deneyleri 250 mL'lik beherlerde gerçekleştirilmiştir ve çalışmaya başlamadan önce tüm çamur numuneleri oda sıcaklığına (20±2 °C) getirilmiştir.

Ultrasonik yoğunluk Denklem (1) kullanılarak hesaplanmış ve tüm setlerde uygulanan güç 200 W, numune hacmi 200 mL ve amplitüd değeri %100 olarak belirlendiği için ultrasonik yoğunluk 1 W/mL olarak bulunmuştur.

$$\text{Ultrasonik Yoğunluk (W / mL)} = \frac{\text{Uygulanan Güç (W)}}{\text{Reaktör hacmi (mL)}} \quad (1)$$

Arıtma çamurlarına uygulanan spesifik enerji Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_s \text{ (kJ / kg TKM)} = \frac{\text{Uygulanan güç (W)} \times \text{sonikasyon süresi (sn)}}{\text{Reaktör hacmi (L)} \times \text{Toplam katı madde konsantrasyonu (kg / L)}} \quad (2)$$

Ultrasonik dezentegrasyonda optimum işletme koşullarını belirleyebilmek amacıyla arıtma çamurlarına farklı spesifik enerjiler uygulanmıştır. Arıtma çamuru numunelerine uygulanan spesifik enerjiler literatürde benzer konularda yapılan çalışmalar incelenerek belirlenmiş ve 5000, 10000, 15000, 25000 ve 50000 kJ/kg TKM değerleri seçilmiştir. 200 mL'lik sabit hacimde, seçilen spesifik enerji ve arıtma çamurunun toplam katı madde konsantrasyonu değerlerine göre hesaplanan ve uygulanan sonikasyon süreleri Tablo 8.62'de gösterilmiştir.



Şekil 8.18 : Çalışmada kullanılan ultrasonikatör (Bandelin-Sonopuls HD 3200)

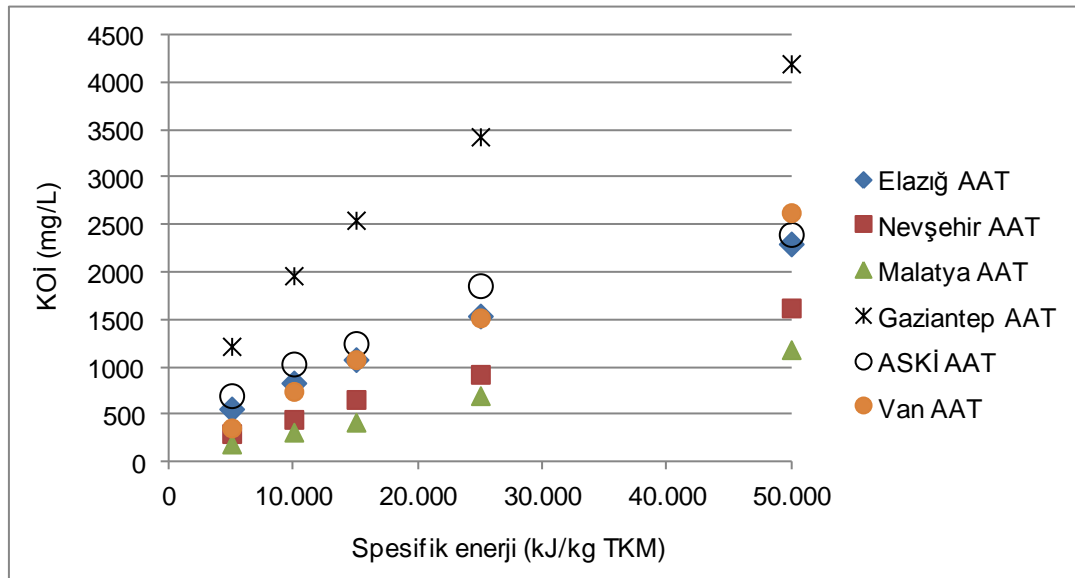
Tablo 8.62 : Seçilen spesifik enerjiler için uygulanan sonikasyon süreleri

Arıtma çamuru numuneleri	TKM (mg/L)	Sonikasyon süresi (sn)
GASKİ AAT (Kentsel)	9200	46
		92
		138
		230
		460
Nevşehir AAT (Evsel)	10550	53
		106
		159
		265
		530
Malatya Belediyesi AAT (Evsel)	7500	38
		76
		114
		190
		380
Elazığ Belediyesi AAT (Kentsel)	5660	29
		58
		87
		145
		290
ASKİ Büyükşehir Belediyesi (Tatlar) AAT (Kentsel)	5660	29
		58
		87
		145
		290
Van Erciş Belediyesi AAT (Evsel)	9120	46
		92
		137
		228
		456

Ultrasonikasyonun verimini belirlemek için çözülmüş KOİ analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, ultrasonik dezentegre edilen arıtma çamurları 10 dakika süreyle 9000 rpm değerinde santrifüjlenerek (Hettich Universal 320) üst faz 0,45 µm filtreden süzülmüştür. Arıtma çamuru numunelerine uygulanan farklı spesifik enerjilerde elde edilen çözülmüş KOİ konsantrasyonları Tablo 8.63 ve Şekil 8.19’da verilmiştir.

Tablo 8.63 : Uygulanan ultrasonik dezentegrasyon işlemi sonrası elde edilen çözülmüş KOİ konsantrasyonları

Spesifik Enerji (kJ/kgTKM)	GASKİ AAT	Nevşehir AAT	Malatya AAT	Elazığ AAT	ASKİ AAT	Van Erciş AAT
	ÇKOİ (mg/L)					
----	156	91	24	140	198	21
5000	1220	300	190	560	700	360
10000	1965	450	315	834	1034	745
15000	2550	660	420	1080	1250	1080
25000	3430	925	700	1540	1860	1520
50000	4200	1625	1185	2300	2400	2630



Şekil 8.19 : Ultrasonik dezentegrasyon sonucunda ÇKOİ değerlerinde tesis bazında elde edilen değişimler

Çamur numunelerine uygulanan dezentegrasyon işlemlerinin verimleri çözülmüş kimyasal oksijen ihtiyacı ölçümlerine dayanan dezentegrasyon derecesi parametresine göre hesaplanmıştır. Arıtma çamuru numunelerine farklı spesifik enerjilerde uygulanan ultrasonikasyon çalışması sonucunda elde edilen dezentegrasyon dereceleri Tablo 8.64’de gösterilmektedir.

Tablo 8.64 : Ultrasonik dezentegrasyon işlemi sonrası hesaplanan dezentegrasyon dereceleri

Spesifik Enerji (kJ/kgTKM)	GASKİ AAT	Nevşehir AAT	Malatya AAT	Elazığ AAT	ASKİ AAT	Van Erciş AAT
5000	12,6	2,4	4,2	9,3	14,9	5,4
10000	21,5	4,1	7,3	15,3	24,9	11,5
15000	28,4	6,4	10,1	20,8	31,3	16,8
25000	38,8	9,4	17,0	30,9	49,4	23,8
50000	48,0	17,4	29,2	47,7	65,5	41,4

6.3.4. Mikrodalga Dezentegrasyon Çalışmaları

Seçilen tesisler üzerinde yapılan mikrodalga çalışmalarında, Milestone ETHOS One marka SK-10 model mikrodalga fırını (Şekil 8.20) kullanılmıştır. Özel olarak kapalı kaplarda parçalama amacıyla üretilmiş olan bu cihazın kullanım alanları arasında açık kaplarda asit parçalaması, solüsyon evaporasyonu, füzyon ve solvent ekstraksiyonu veya protein hidrolizi yer almaktadır.



Şekil 8.20 : Milestone ETHOS One SK-10

Her bir tesisin geri devir akımından alınmış numuneler, maksimum numune hacmi 100 mL olan kaplara (Şekil 8.21) 20'şer mL halinde ilave edilmiş ve kapalı kaplarda, basınçlı ortamda minimizasyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.21 : Mikrodalga fırınında kullanılan kaplar

Çalışmalarda denenen sıcaklık ve süreler Tablo 8.65’de özetlenmektedir. Çalışmalar esnasında istenilen sıcaklıkta belirlenen sürelerde denemeler yapılırken aynı zamanda cihazın gücü, buna bağlı olarak belirtilen sıcaklığa yükselme zamanı ve kaplar içerisindeki basınçlar cihazın ekranından izlenmiştir.

Tablo 8.65 : Mikrodalga denemelerinde uygulanan sıcaklık ve süre değerleri

Sıcaklık (°C)	Süre (dakika)
100	10
	20
150	10
	20
175	10
	20
190	10
	20

Minimizasyonun ardından numuneler santrifüj yardımıyla fazlara ayrılmış, üst faz 0,45 µm’lik filtrelerden süzülerek KOİ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilmiş çözünmüş KOİ değerleri Tablo 8.66’de verilmiştir.

Tablo 8.66 : Tesislerin mikrodalga çalışması sonucunda elde edilen çözünmüş KOİ değerleri

Uygulanan koşullar	Elazığ AAT	Nevşehir AAT	Malatya AAT	Gaziantep AAT	ASKİ AAT	Van Erciş AAT
ÇKOİ (mg/L)						
----	140	91	24	156	198	21
100°C 10'	986	1615	658	1052	958	827
100°C 20'	1150	1920	690	1972	960	885
150°C 10'	1860	4300	1142	3500	1610	1750
150°C 20'	1914	4467	1150	3400	1712	2150
175°C 10'	3225	4828	1506	5010	2783	2773
175°C 20'	3210	5074	1890	5260	2783	3290
190°C 10'	2640	4900	2183	5180	2889	2897
190°C 20'	3580	6574	2564	5340	3130	3990

Arıtma çamuru numunelerine farklı spesifik enerjilerde uygulanan mikrodalga çalışması sonucunda elde edilen dezenteğrasyon dereceleri Tablo 8.67'te gösterilmektedir.

Tablo 8.67 : Mikrodalga çalışması sonucunda elde edilen dezenteğrasyon dereceleri

Uygulanan koşullar	Elazığ AAT	Nevşehir AAT	Malatya AAT	Gaziantep AAT	ASKİ AAT	Van Erciş AAT
DD _{koi} (%)						
100°C 10'	18,7	17,2	16,0	10,6	22,6	12,8
100°C 20'	22,3	20,7	16,8	21,5	22,6	13,7
150°C 10'	38,0	47,6	28,1	39,7	42,0	27,4
150°C 20'	39,2	49,5	28,3	38,5	45,0	33,8
175°C 10'	68,1	53,6	37,3	57,6	76,9	43,7
175°C 20'	67,8	56,4	46,9	60,6	76,9	51,9
190°C 10'	55,2	54,4	54,3	59,6	80,0	45,6
190°C 20'	75,9	73,3	63,9	61,5	87,2	63,0

6.3.5. İç Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgeleri için Minimizasyon Çalışmaları Değerlendirmesi

Bu iş paketi kapsamında, aerobik ve anaerobik stabilizasyon çalışmaları öncesinde yedi bölgeden seçilen tüm AAT arıtma çamurları için öneri formunda yapılacağı ifade edilen tüm minimizasyon (dezenteğrasyon) yöntemleri proje grupları tarafından incelenmiş ve tesislerden alınan arıtma çamurlarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde ultrasonikasyon ve mikrodalga dezenteğrasyon yöntemleri en etkili ve uygun dezenteğrasyon metodları olarak belirlenmiştir.

8.4. Genel Değerlendirme

Bu iş paketi kapsamında, aerobik ve anaerobik stabilizasyon çalışmaları öncesinde yedi bölgeden seçilen arıtma çamurlarına mekanik (ultrasonik, vurgulu elektrik alanı uygulaması), termal (mikrodalga), kimyasal (Fenton, ozon ve alkali) ve biyolojik (enzimatik arıtım) olmak üzere çeşitli dezentegrasyon teknikleri uygulanmış, elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak da değerlendirilerek ultrasonikasyon ve mikrodalga dezentegrasyon yöntemleri en etkili yöntemler olarak belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen istatistiksel analizler kapsamında, ultrasonikasyon ön arıtımı yönteminde enerji seviyeleri için yapılan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre, 5000 ile 10000 kJ/kg TKM ve 10000 ile 15000 kJ/kg TKM karşılaştırmaları dışında tüm düzeylerde anlamlı dezentegrasyon farkı tespit edilmiştir. **Bu nedenle tüm bölgelerde elde edilen verilerin karşılaştırılabilir olması açısından, bölgelerde farklılığın gözlemlenmediği 10000 ve 15000 kJ/kg TKM spesifik enerji düzeyi seçilmiş ve İP 9 Çamur Stabilizasyonu çalışmalarında uygulanan ultrasonikasyon çalışmalarında 10000 ve 15000 kJ/kg TKM spesifik enerji ile çalışılmıştır.**

Mikrodalga ön arıtımı yönteminde sıcaklık düzeyleri arasında yapılan çoklu karşılaştırma testleri sonucunda ise 175°C ile 190 °C karşılaştırması dışında tüm sıcaklık düzeyleri arasında dezentegrasyon değerleri anlamlı farklılık göstermektedir. **Bu nedenle tüm bölgelerde elde edilen verilerin karşılaştırılabilir olması açısından, bölgelerde farklılığın gözlemlenmediği 175 °C ile 190 °C arasından düşük enerji gereksinimi de göz önüne alınarak 175 °C seçilmiş ve İP 9 çamur stabilizasyonu çalışmalarında uygulanan tüm mikrodalga çalışmalarında 175 °C sıcaklık değerinde çalışılmıştır.**

Mikrodalga dezentegrasyon çalışmalarında uygulanan süreye göre elde edilen KOİ ve dezentegrasyon dereceleri arasında istatistiki olarak anlamlı farklılık bulunamamıştır ($p=0,815$). **Bu nedenle çalışmalarda enerji tüketimi açısından uygunluğu da düşünülerek mikrodalga ön arıtma süresi 10 dakika olarak belirlenmiştir.**

Biyolojik dezentegrasyon yöntemi olan enzim ön-arıtımı uygulama yöntemi gereği olarak İP 9 kapsamında gerçekleştirilen aerobik ve anaerobik stabilizasyon işlemleri sırasında arıtma çamurlarına tatbik edilmiştir. Enzim ön arıtımında, arıtma çamurlarına stabilizasyon sırasında Alpha-amylase, Beta-glucanase (endo-(1,2(4)-), Lipase, Protease, Cellulase sınıfına ait 4 farklı hidrolitik ve 1 adet sellülotik enzimden oluşan karışım hacimce %0,5'lik enzim karışımı olarak

uygulanmıştır. Enzim dezentegrasyonunda kullanılan enzim karışımları ve en uygun doz TÜBİTAK 104Y375 nolu projeden temin edilmiştir.

İP 8 kapsamında arıtma çamurlarına uygulanmış olan ön arıtım yöntemlerinden her birinin ayrı ayrı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Yöntemlerin bazıları, harcanacak kimyasalların veya enerjinin çok fazla olması nedenleriyle ekonomik olmayıp, gerçek ölçekli sistemlere uygulanmaları yaygın değildir. Örnek olarak mikrodalga ve enzim ön arıtım yöntemleri, laboratuvar ölçekli çalışmalarda çok iyi sonuçlar vermiş olmasına karşın, yüksek maliyeti ve operasyon zorluğu sebebiyle gerçek ölçekli sistemlerde henüz yaygın olarak uygulanmamaktadır.

İP 8 kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ve literatür araştırması sonucunda çamur minimizasyonu kapsamında ultrasonikasyon, termal hidroliz (Cambi™ vb.), ve ozon ön arıtım yöntemlerinin gerçek ölçekli atıksu arıtma tesislerinde uygulanabilir oldukları görülmüştür. Bu yöntemler farklı ülkelerdeki atıksu arıtma tesislerinde de kullanılmaktadırlar. Arıtma Çamurlarına stabilizasyon işlemi öncesinde ön arıtım işlemi uygulanması, arıtma çamuru miktarını azaltacağı , stabilizasyon ve biyogaz üretim verimlerini arttıracığı için ülkemizde de hem mevcut AAT'lere eklenmesi, hem de yeni planlanan tesislerde planlara dahil edilmesi önerilmektedir.

Belirtilen dezentegrasyon yöntemlerinin tamamının, optimum işletme koşulları tespit edildiğinde ve uygulandığında çamurun çözünebilirliğini artırmada başarılı olduğu bilinmektedir. Bu sebeplerle önerilen **çamur minimizasyon işlemleri arasında seçim yaparken daha çok maliyetler, tasarlanan patojen azaltımı ve işletim/kurulum kolaylığı gözönünde bulundurulmalıdır.**

Bertaraf edilecek çamurun miktarı iki şekilde azaltılabilir; birincisi, çamurun kaynağında azaltım yapmak, ikincisi ise arıtma çamuru oluştuktan sonra çeşitli ön arıtım (dezentegrasyon) teknikleri kullanarak çamurun miktarını azaltmaktır.

Uygulanan klasik ön-arıtma yöntemlerine ek olarak, çamur oluşumunu daha da azaltabilecek yeni yöntem arayışları devam etmektedir. Tablo 8.68'te, daha önceden bahsedilmiş ön-arıtma yöntemlerine alternatif olabilecek, halen geliştirilmekte olan yöntemler avantajlar ve dezavantajları ile birlikte verilmiştir.

Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği ilkeleri esasında planlanan AAT'ler için arıtma çamuru oluşumunu kaynağında en aza indirgeyecek Uzun Havalandırılmalı Aktif Çamur, Cannibal®, Membran Filtre gibi proseslerin seçilmesi ve oluşan çamurların yukarıda belirtilen

ultrasonikasyon, termal, ozonlama ve enzim proseslerinden biri uygulanarak en aza indirilmesi, arıtma tesislerinde enerji verimliliği sağlanması için önerilmektedir. Böylece çamurların işlenmesi için daha az yer ve zaman gerekecek, stabilizasyon ve biogaz üretim verimleri arttırılmış olacaktır.

Tablo 8.68 : Gelişmekte olan Atıksu Arıtım Sırasındaki Çamur Azaltım Teknikleri

Yöntem	Uygulanma Şekli	Avantajları	Dezavantajları
Magneto-Ferrit Metodu	Ferrit parçacıkları ve çamur bir arada tutularak manyetik bir akışa maruz bırakılır ve bu sayede sterilizasyon ve hücre parçalanması gerçekleşir. İşlem görmüş çamur, havalandırma tankına geri gönderilir ve aktif çamur ile parçalanır.	-42% çamur oluşumu azaltımı -Ferrit parçalarının çamurdan ayrılması kolay -Büyük ölçekli tesislere kolay uygulanması -Ucuz ve kolay kurulum	-Geliştirilmekte olan bir proses
Cannibal	Cannibal prosesi, ikincil arıtma sisteminden gelen aktif çamur oluşumunu azaltmak için döngüsel ortamları kullanır. Oksik ve fakültatif bu ortamlarda değişken mikrobiyal komüniteler gelişir. Ortama uyum sağlayamayan bakteriler ise uyum sağlayanlar için karbon kaynağı olurlar. Bu sayede çamur oluşumu azalır.	-Yüksek çKOİ salınımı -Küçük ve orta ölçekli tesisler için avantajlı -50% çamur oluşumu azaltılması	-Ekstra havalandırma gerektirmesi maliyeti artırır -Biyolojik fosfor giderimi gerçekleştirilemez -Reaktörde koku oluşumu
Mantar ile Çamur Oluşumu Azaltılması	Çamur, yüksek miktarda özel mantar ve bakteri içeren reaktörlere gönderilir.	-30% çamur azaltımı -Kolay ve basit kurulum -100% biyolojik proses	-Koku oluşma potansiyeli

Tablo 8.69 : Gelişmekte olan Atıksu Arıtım Sırasındaki Çamur Azaltım Teknikleri (devam)

Yöntem	Uygulanma Şekli	Avantajları	Dezavantajları
IDI Biyoliz	Hücreli materyali biyoparçalanabilir hale getirmek, bakteriyel büyümeyi azaltmak ve bakteri metabolizması için gerekli enerjiyi arttırmak için kimyasal ve enzimatik stres yöntemi kullanılır. Biyoliz Ozon: Aktif çamur sisteminden gelen çamur özel dizayn edilmiş kontakt kulesine gönderilir, ozonlanarak strese maruz bırakılır ve sonrasında aktif çamur sistemine geri gönderilir.	-İkinci çöktürme tanklarında performans ve kapasite artışı -Cannibal'e kıyasla, düşük karbon ihtiyacı -80% çamur oluşumu azaltımı	-Kurulum için gerekli yüksek maliyet -Ozonlama için gerekli yüksek oksijen miktarı
Elektrokogülasyon (EK)	Kimyasal kullanımına alternatif olan bu metotla, elektrolitik oksidasyon ile kogülasyon gerçekleştirilir. Bir anot ve bir katottan oluşan elektrolitik hücreli bir reaktör oluşturulur. Güç kaynağına bağlandığı zaman, anot elektrokimyasal olarak aşınacak ve katot da pasifleşecek. EK uygulanan atıksu, çöktürme tanklarına gönderilir.	-Basit bir ekipmanla, idaresi ve kurulumu kolay -EK ile oluşmuş çamurunu çökebilirliği ve susuzlaştırılabilirliği artar -Daha az çamur üretimi -Kimyasal kullanımı yok	-Elektrotların atıksuda çözünmesi sebebi ile düzenli olarak değiştirilmeleri gerekiyor -Elektrik kullanımı maliyeti arttırır -Atıksuyun yüksek iletkenlikli olması gerekmektedir

Tablo 8.70 : Gelişmekte olan Atıksu Arıtım Sırasındaki Çamur Azaltım Teknikleri (devam)

Yöntem	Uygulanma Şekli	Avantajları	Dezavantajları
Membran Biyoreaktör	Selüloz ya da başka bir polimerik materyalden oluşan membran filtreler atık sudaki 1 mikrondan daha büyük yapıdaki parçacıkları artırır ve çapraz akım sayesinde bu parçacıkların filtre üzerinde birikmesi önlenir. Çözünmüş olan 1 mikrondan küçük parçacıklar için ilave arıtım gerekebilmektedir.	-Yüksek kirlilik giderimi -Klasik aktif çamur sistemine kıyasla çok daha küçük hacimli tesisler	-Yüksek kurulum ve operasyon maliyetleri (temizleme ve yenileme gerektiriyor) - Havalandırma için yüksek enerji ihtiyacı -Oluşan arıtma çamurunun çökebilirliğinin az olması (kimyasal ihtiyacı)

