YEŞİL AJANDA
Çevre, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik

AKADEMİ SERİSİ



Atıksu Arıtımının Esasları

3 / 3

İleri Arıtma, Dezenfeksiyon ve Çamur Yönetimi

İleri arıtma nasıl çalışır? Fosfor giderimi, membranlar, klor, UV ve ozonla dezenfeksiyon, anaerobik çürütme ve Türkiye'de yılda 353 bin ton arıtma çamuru.

1 Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma

2 Biyolojik (İkincil) Arıtma

3 İleri Arıtma, Dezenfeksiyon ve Çamur Yönetimi

3

İleri Arıtma, Dezenfeksiyon ve Çamur Yönetimi

BU BÖLÜMDE

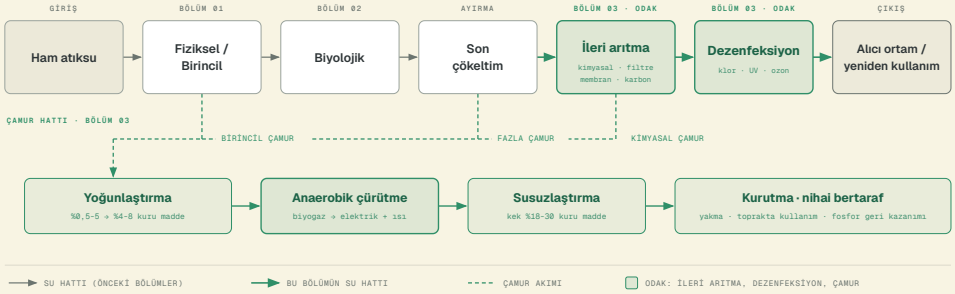
3.1	İkincil Arıtma Neden Yetmez? İleri Arıtmanın Hedefleri	4
3.2	Kimyasal Arıtma: Koagülasyon, Flokülasyon ve Kimyasal Fosfor Giderimi	8
3.3	Filtrasyon: Derin Yatak ve Kumaş Filtreler	13
3.4	Adsorpsiyon ve Aktif Karbon: Mikrokirleticilere Karşı İlk Savunma	14
3.5	Membran Prosesleri: MF, UF, NF ve Ters Ozmoz	17
3.6	İleri Oksidasyon Prosesleri (AOP)	21
3.7	Dezenfeksiyon: Klor, UV ve Ozon	23
3.8	Çamur Yönetimi: Arıtmanın Görünmeyen Yarısı	30
3.9	Su Geri Kazanımı ve Yeniden Kullanım	39
3.10	Türkiye'de Uygulama: Çamur, Dezenfeksiyon ve Yeniden Kullanım	41
3.11	Sonuç: Atıksu Arıtımının Son Kademeleri ve Serinin Büyük Resmi	48

İleri arıtma, biyolojik reaktörden çıkan suyun berraklığına güvenmeyen mühendisliğin adıdır. Serinin birinci bölümünde[1] fiziksel arıtmanın çökebilen katıları, ikinci bölümünde[2] ise biyolojik arıtmanın çözünmüş organik kirliliği nasıl giderdiği ele alındı. Bu iki kademeden geçen kentsel atıksu, Türkiye'de Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'nin[3] ikincil arıtma sınırlarını (**25 mg/L $BOİ_5$, 125 mg/L KOİ, 35 mg/L AKM**) karşılayabilir. Ama aynı su hâlâ milyonlarca bakteri ve virüs, ötrofikasyonu besleyen fosfor, biyolojik arıtmanın dokunmadığı ilaç kalıntıları taşır; üstelik arıtılan her metreküp, geride bir miktar çamur bırakır. TÜİK'e göre Türkiye'de belediye arıtma tesislerinde yalnızca 2024'te **353 bin ton (kuru madde)** arıtma çamuru oluştu.

ŞEKİL 3.1

İleri Arıtma ve Çamur Hattının Tesisteki Yeri

Biyolojik arıtmadan (Bölüm 2) çıkan su ileri arıtma ve dezenfeksiyonla alıcı ortama ya da yeniden kullanıma hazırlanır; suyun içinden alınan kirlilik çamur hattında toplanır.



İkincil arıtma organik kirliliğin büyük bölümünü giderir; ileri arıtma kalan askıda katı, fosfor, mikrokirletici ve tuzları, dezenfeksiyon ise patojenleri hedefler. Birincil çökeltimden, son çökeltimden ve kimyasal çöktürmeden gelen çamur ayrı bir hatta yoğunlaştırılır, stabilize edilir ve susuzlaştırılır.

Peki ikincil arıtmadan çıkan su neden "yeterince temiz" sayılmaz ve geride kalan çamura ne olur? Yeşil Ajanda olarak serinin bu son bölümünde atıksu arıtımının son kademelerini çevre mühendisliği ders derinliğinde ele alıyoruz: koagülasyon ve kimyasal fosfor gideriminden filtrasyona, aktif karbondan **mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters ozmoza**, ileri oksidasyondan klor, UV ve ozonla **dezenfeksiyona**, oradan da arıtmanın görünmeyen yarısı olan **çamur yönetimine**: yoğunlaştırma, anaerobik çürütme ve biyogaz, susuzlaştırma, kurutma, yakma ve

1. Serinin önceki cildi: Bölüm 1, Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma.
2. Serinin önceki cildi: Bölüm 2, Biyolojik (İkincil) Arıtma.
3. Kaynak: mevzuat.gov.tr

fosfor geri kazanımı. Son olarak arıtılmış suyun yeniden kullanımını, Türkiye'nin çamur ve yeniden kullanım mevzuatını ve AB'nin 2024'te yenilediği direktifin getirdiği "dördüncül arıtma" dönemini değerlendiriyoruz. Amaç, bir tesisin suyu alıcı ortama verilebilir hâlden yeniden kullanılabilir hâle nasıl getirdiğini ve bunun hangi sayılarla tasarlandığını göstermek.

3.1 İkincil Arıtma Neden Yetmez? İleri Arıtmanın Hedefleri

İkincil arıtma, adı üstünde, bir ara duraktır. Biyolojik reaktör ve son çökeltim havuzu, organik kirliliğin büyük bölümünü giderir; ancak geride bıraktıkları, alıcı ortamın ve suyun sonraki kullanıcısının ne beklediğine göre ya önemsizdir ya da kabul edilemez. Bu yüzden ileri arıtmanın tek bir tanımı yoktur: ileri arıtma, ikincil arıtma çıkışında kalan ve hedeflenen kullanım için sorun olan kirletici sınıfını gideren kademelerin genel adıdır.

Geriye ne kalır?

İkincil arıtmadan çıkan suyun bileşimini kirletici sınıflarına ayırmak, hangi ileri arıtma prosesinin neden seçildiğini anlamanın en kısa yoludur.

- **Askıda katı ve bulanıklık:** Son çökeltimden kaçan biyolojik floklar ve ince parçacıklar. ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) besin giderimi tasarım el kitabına göre ikincil çıkışta askıda katı madde tipik olarak **6 ile 30 mg/L**, bulanıklık **3 ile 15 NTU** arasındadır. Bu katılar yalnızca görünüm meselesi değildir: içlerinde fosfor, organik madde ve mikroorganizma taşırlar ve sonraki dezenfeksiyonun önünde bir kalkan oluştururlar.
- **Fosfor ve azot:** İkinci bölümde görüldüğü gibi konvansiyonel aktif çamur, fosforun yalnızca **%10 ile 25'ini** giderir; biyolojik aşırı fosfor giderimi (EBPR) ve nitrifikasyon-denitrifikasyon bu açığı kapatır ama çok düşük çıkış değerleri için yetmez. AB'nin yeni direktifi, 150.000 nüfus eşdeğerinin (NE) üzerindeki tesisler için toplam fosforu **0,5 mg/L**, toplam azotu **8 mg/L** yıllık ortalamaya indirdi.
- **Patojenler:** Biyolojik arıtma, bağırsak kökenli bakteri ve virüslerin önemli bir kısmını giderir ama hiçbir zaman tamamını değil. Arıtılmış atıksu, yüzme alanlarına veya sulamaya gidecekse ayrı bir dezenfeksiyon kademesi şarttır.
- **Mikrokirleticiler:** İlaç etken maddeleri, korozyon önleyiciler, pestisitler ve kozmetik bileşenleri gibi mikrogram ya da nanogram düzeyindeki maddeler. İsviçre'nin mikrokirletici programında gösterge madde seçmenin ilk kriteri, maddenin biyolojik arıtmada **%50'den az** giderilmesidir; yani bu maddeler biyolojik reaktörden büyük ölçüde değişmeden geçer. Kalıcı organik flor bileşikleri (PFAS) ise daha da sorunludur: 2024'te ABD'de yayımlanan bir saha çalışması,

aktif çamurda öncül maddelerin dönüşümü nedeniyle bazı kısa zincirli PFAS'ların tesis içinde **arttığını** gösterdi.

- **Çözünmüş tuzlar:** Sodyum, klorür, sülfat ve sertlik iyonları biyolojik arıtmadan aynen geçer. Bunları gidermenin tek pratik yolu ters ozmozdur; bu da yalnızca suyun sanayide ya da içme suyu kaynağı olarak yeniden kullanılacağı durumlarda gündeme gelir.

İkincil Arıtmadan Sonra Ne Kalır, Hangi Proses Giderir?

İleri arıtma zinciri, kalan kirletici sınıfına ve suyun gideceği yere göre kurulur.

KALAN KİRLETİCİ	ANA PROSESLER	TİPİK HEDEF
Askıda katı ve bulanıklık ikincil çıkışta 6-30 mg/L, 3-15 NTU	Granüler filtrasyon Kumaş filtrasyon Membran (MF/UF)	Filtre çıkışı **≤2 NTU**; membran **≤0,2 NTU**
Fosfor	Kimyasal çöktürme (Fe/Al) Filtrasyon	Hassas alan deşarjı; AB: **0,5-0,7 mg/L**, özel sistemlerle **<0,05 mg/L**
Patojenler	Dezenfeksiyon: klor, UV, ozon Ultrafiltrasyon	Yüzme alanı deşarjı, sulama
Mikrokirleticiler ilaçlar, PFAS	Ozonlama + biyolojik filtre Aktif karbon (PAC/GAC) İleri oksidasyon	Dördüncül arıtma: gösterge maddelerde **≥%80** giderim
Çözünmüş tuzlar	Nanofiltrasyon Ters ozmoz	Sanayi suyu, içme suyu kaynağı

ZİNCİR UZAR — DAHA YÜKSEK KULLANIM

Hedef kullanım yükseldikçe zincir uzar: çoklu bariyer ilkesi.
Kaynak: EPA Nutrient Control Design Manual (2010); Teknik Usuller Tebliği; Direktif (EU) 2024/3019.

Hedef suyu belirler, su prosesi

İleri arıtma tasarımının ilk sorusu “hangi teknoloji?” değil, “su nereye gidecek?” sorusudur. Hassas bir göle deşarj edilecek suyun derdi fosfordur ve çözüm kimyasal

çöktürme artı filtrasyondur. Golf sahası veya park sulamasına gidecek suyun derdi patojenlerdir; çözüm filtrasyon artı dezenfeksiyondur. Bir yarı iletken fabrikasının proses suyuna ya da bir içme suyu rezervuarına gidecek suyun derdi ise tuzlar, mikrokirleticiler ve virüslerdir; çözüm membranlar, ters ozmoz ve ileri oksidasyondan oluşan çok kademeli bir zincirdir.

Bu mantık Türk mevzuatına da yansımıştır. Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği[4], arıtma sistemlerine göre ulaşılabilecek çıkış kalitesini listeler: membran biyoreaktör (MBR) çıkışında askıda katı **2 mg/L'nin**, biyokimyasal oksijen ihtiyacı **1 ile 5 mg/L'nin** altına inerken, aktif çamur arkasına mikrofiltrasyon ve ters ozmoz eklenmiş bir zincirde askıda katı ve BOİ **1 mg/L'nin**, toplam azot da **1 mg/L'nin** altına iner. Aradaki fark, aynı ikincil çıkışın arkasına hangi ileri arıtma kademelerinin dizildiğinden gelir.

Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) içme suyu amaçlı yeniden kullanım kılavuzu ise uç noktayı tanımlar: atıksudan içme suyu üretecek bir zincir, bağırsak bakterilerinde **8,5**, virüslerde **9,5**, protozoalarda **8,5 log** giderim sağlamalıdır. Yani bir milyar virüsten en fazla bir tanesinin geçmesine izin verilir. Hiçbir tek proses bunu tek başına yapamaz; ileri arıtmanın temel tasarım fikri olan **çoklu bariyer** ilkesi buradan doğar: birbirini yedekleyen, farklı mekanizmalarla çalışan ardışık kademeler.

Yeni bir kavram: dördüncül arıtma

Avrupa'da 2024'te bu tabloya bir kademe daha eklendi. AB Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi (EU) 2024/3019[5], mikrokirletici giderimini "dördüncül arıtma" adıyla bağlayıcı hâle getirdi: 150.000 NE ve üzerindeki tesisler ile mikrokirletici riski taşıyan alanlara deşarj eden 10.000 NE ve üzeri tesisler, gösterge maddelerin giriş yüküne göre **en az %80'ini** gidermek zorunda. Bu kademenin teknolojisi bu bölümde ayrıntısıyla anlatılacak olan ozonlama ve aktif karbondur; takvimi ve tartışmalı finansmanı ise Türkiye bölümünde ele alınıyor.

KİLİT MESAJ

İleri arıtma tek bir teknoloji değil, ikincil arıtma çıkışında kalan kirletici sınıfına ve suyun gideceği yere göre seçilen kademelerin toplamıdır. Deşarj için fosfor ve askıda katı, sulama için patojen, içme suyu kaynağı için tuzlar, mikrokirleticiler ve virüsler hedeflenir; ihtiyaç arttıkça zincir uzar ve çoklu bariyer ilkesi devreye girer.

4. Kaynak: mevzuat.gov.tr
5. Kaynak: eur-lex.europa.eu

3.2 Kimyasal Arıtma: Koagülasyon, Flokülasyon ve Kimyasal Fosfor Giderimi

Birinci bölümdeki katı madde hiyerarşisinde kolloidal parçacıklar, yerçekimiyle pratik sürelerde çökmeyen fraksiyon olarak tanımlanmıştı. Kimyasal arıtma tam olarak bu fraksiyonun problemidir. TU Delft'in su arıtma ders notlarındaki hesap çarpıcıdır: yoğunluğu kum kadar olan bir parçacığın 30 cm'lik bir su sütununda çökmesi, ince kumda **38 saniye**, siltte **33 dakika**, bakteri boyutunda **35 saat**, kilde **230 gün**, kolloid boyutunda ise **63 yıl** sürer. Bu parçacıkları gidermenin tek yolu, onları büyütmektir.

Kolloidler neden çökmez: kararlılık ve zeta potansiyeli

Sudaki kolloidal parçacıklar genellikle **negatif yüklüdür**. Yüklü bir yüzey suyla temas ettiğinde etrafında bir **elektriksel çift tabaka** oluşur: yüzeye sıkıca tutunan karşı iyon tabakası (Stern tabakası) ve dışa doğru seyrelen difüz tabaka. Aynı işaretli çift tabakalar birbirine yaklaştığında elektrostatik itme, parçacıkları birbirinden uzak tutar; van der Waals çekimi ancak çok kısa mesafede baskın gelebildiği için parçacıklar hiç çarpışıp birleşmez. Mühendislik dilinde bu duruma **kolloid kararlılığı** denir.

Kararlılığın pratik ölçüsü **zeta potansiyelidir**, yani parçacığın kayma düzlemindeki elektriksel potansiyel. Koagülasyonun amacı bu potansiyeli sıfıra yaklaştırmaktır. Tam ölçekli bir içme suyu tesisinde yapılan ölçümlerde iyi performansın tutarlı biçimde **−10 mV ile +3 mV** arasındaki zeta potansiyeliyle ilişkili olduğu bulunmuş; alt sınıra yakın işletme, kimyasal dozunda **%20** tasarruf sağlamıştır. +3 mV'u aşmak ise aşırı doz demektir ve tehlikelidir, çünkü parçacıklar bu kez pozitif yüklenip yine birbirini iter.

Dört destabilizasyon mekanizması

Literatür, kolloid kararlılığını bozmanın dört yolunu tanımlar:

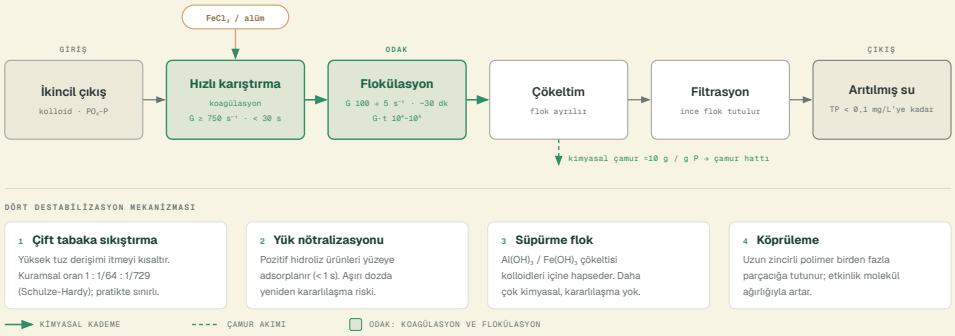
1. **Çift tabaka sıkıştırma:** Suya yüksek derişimde basit tuz eklendiğinde karşı iyonlar difüz tabakayı sıkıştırır ve itme menzili kısalır. Etkisi iyonun değerliğine son derece bağlıdır: kuramsal türetimle (Schulze-Hardy kuralı) tek, iki ve üç değerlikli karşı iyonların kritik koagülasyon derişimleri **1 : 1/64 : 1/729** oranındadır; deneysel olarak Al^{3+}, Mg^{2+} ve Na^{+}'nın göreceli etkinliği **1000 : 30 : 1** bulunmuştur. Ancak bu mekanizma için gereken derişimler pratik su arıtımında bulunmaz; mekanizmanın önemi kavramsaldır.
2. **Yük nötralizasyonu:** Alüminyum ve demir tuzlarının pozitif yüklü hidroliz ürünleri, negatif parçacıkların yüzeyine adsorplanıp yükü nötralize eder. Süreç çok hızlıdır, ürünler **bir saniye** içinde oluşup adsorplanır. Aşırı dozda ise **yeniden kararlılaşma** görülür.

3. **Süpürme (çökelme) koagülasyonu:** Daha yüksek dozda metal hidroksit ($Al(OH)_3$, $Fe(OH)_3$) çökeltisi oluşur ve kolloidler bu büyüyen flokların içine hapsolur. Düşük askıda katılı sularda baskındır, daha fazla kimyasal ister ama yeniden kararlılaşma riski taşımaz.
4. **Köprüleme:** Uzun zincirli polimerler (polielektrolitler) birden fazla parçacığa aynı anda tutunarak aralarında köprü kurar. Etkinlik polimerin molekül ağırlığıyla artar.

ŞEKİL 3.2

Koagülasyon, Flokülasyon ve Kimyasal Fosfor Giderimi

Metal tuzu saniyeler içinde kolloidlerin kararlılığını bozar ve ortofosfatı çöktürür; yavaş karıştırma floğu büyütür, çökeltim ve filtrasyon onu sudan ayırır.



Hızlı karıştırma değerleri ABD eyalet tasarım standartlarından (Hollanda pratiğinde en az 1.500 s^{-1}); fosfor çöktürmede EPA 200–300 s^{-1} ve 10–30 saniye önerir. Kimyasal çöktürme yalnız ortofosfatı giderir; en iyi giderim pH 5,5–7,0 aralığındadır. Kaynak: TU Delft OpenCourseWare; EPA Nutrient Control Design Manual (2010).

Koagülantlar ve alkalinite bedeli

Atıksu arıtımında kullanılan başlıca koagülantlar alüminyum sülfat (alüm), sodyum alüminat, polialüminyum klorür (PAC), ferrik klorür, demir(II) tuzları ve kireçtir. Metal tuzları suda hidroliz olurken asit üretir ve suyun **alkalinitesini tüketir**. Stokiyometri bu bedeli hesaplanabilir kılar: bir miligram alüm ($Al_2(SO_4)_3{\cdot}14H_2O$) yaklaşık **0,50 mg**, bir miligram susuz ferrik klorür ise yaklaşık **0,92 mg** kalsiyum karbonat eşdeğeri alkalinite tüketir. Bu, nitrifikasyonun da alkalinite tükettiği bir tesiste önemli bir ayrıntıdır: ikinci bölümde görülen gram azot başına **7,14 g** alkalinite tüketimine kimyasal dozlamanın bedeli eklenir ve pH'ın düşmemesi için kostik veya kireç gerekebilir. Ferrik klorür **pH 4 ile 11** arasında etkili bir koagülanttır, büyük ve hızlı çöken floklar oluşturur ama alümden daha fazla alkalinite tüketir.

Hızlı karıştırma ve flokülasyon: hız gradyanı G

Koagülasyon kimyası saniyeler içinde gerçekleştiği için, koagülantın suya anında ve eşit dağıtılması gerekir. Bunu sağlayan **hızlı karıştırma**dır; ardından gelen **flokülasyon** ise destabilize parçacıkların yavaş karıştırmayla çarpışıp büyük floklar hâline gelmesini sağlar. İki aşamanın ortak tasarım parametresi, 1943'te Camp ve Stein'ın tanımladığı **hız gradyanıdır (G)**.

DENKLEM 3.1 · HIZ GRADYANI (CAMP-STEİN) · KARIŞTIRMA VE FLOKÜLASYON TASARIMI

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} \tag{3.1}$$

BURADA

- G hız gradyanı (s^{-1})
- μ dinamik viskozite ($N \cdot s/m^2$; 20 °C'de $1{,}002 \times 10^{-3}$)
- P harcanan güç (W)
- V tank hacmi (m^3)

Örnek: 10 m^3'lük bir tankta $G = 800\ s^{-1}$ için gereken güç $P = G^2 \cdot \mu \cdot V \approx 6{,}4$ kW. Flokülasyonun tasarım ölçütü $G \cdot t$ çarpımıdır (Camp sayısı): 10^4 ile 10^5 arası; hızlı karıştırmada G en az 750-1.500 s^{-1}, flokülasyonda 100 s^{-1}'den 5 s^{-1}'e azalan kademeler.

G ile bekleme süresinin çarpımı, flokülasyonun boyutsuz tasarım ölçütünü (Camp sayısı) verir. Uygulamadaki değerler şöyle özetlenebilir:

- **Hızlı karıştırma:** Hollanda pratiğinde en az **1.500 s^{-1}**; ABD eyalet tasarım standartlarında en az **750 s^{-1}** ve **30 saniyeden kısa** süre. EPA, fosfor çöktürmede koagülant dozlama noktası için **200 ile 300 s^{-1}** ve **10 ile 30 saniye** önerir; mevcut atıksu tesislerinde gerçekleşen değerin çoğu zaman yalnızca 20 ile 100 s^{-1} olduğunu da not eder.
- **Flokülasyon: G·t değeri 10^4 ile 10^5** arasında, bekleme süresi **500 ile 3.600 saniye** (ortalama yaklaşık **30 dakika**). Bölmeler azalan G ile tasarlanır: ilk bölmede yaklaşık **100 s^{-1}**, son bölmede yaklaşık **5 s^{-1}**. Karıştırıcı bıçaklarının uç hızı **1 m/s'yi** aşarsa oluşan floklar yeniden kırılır.

Doğru koagülant ve dozun belirlenmesinde laboratuvar ölçeğindeki **jar testi** hâlâ vazgeçilmezdir: aynı suyla doldurulmuş bir dizi kapta yalnızca tek bir parametre (doz, pH veya koagülant türü) değiştirilerek en iyi çökelme ve en düşük kalıntı bulanıklık aranır. Reaksiyonlar suyun bileşimine bu kadar duyarlı olduğu için EPA da tasarım dozunun jar testiyle belirlenmesini önerir.

Kimyasal fosfor giderimi

İkinci bölümde fosforun azottan farklı olarak gaz fazına sahip olmadığı, yalnızca katı faza (çamura) aktarılarak giderilebildiği belirtilmiş ve biyolojik yolu (EBPR) anlatılm

ıştı. Kimyasal yol, aynı işi metal tuzlarıyla yapar ve bugün ileri arıtmada en yaygın fosfor giderim yöntemlerinden biridir. Önemli bir sınırı vardır: kimyasal çöktürme yalnızca **ortofosfatı** giderir. EPA'ya göre ortofosfat, giriş toplam fosforunun tipik olarak **%50 ile 80'idir**; polifosfatlar metal tuzlarıyla doğrudan reaksiyona girmez, ancak biyolojik arıtma sırasında ortofosfata dönüşür.

Stokiyometrik ilişki basittir: bir mol alüminyum ya da demir, bir mol fosforu çöktürür. Kütle olarak bu, giderilen her gram fosfor için **0,87 g alüminyum** veya **1,80 g demir** demektir; ticari ürün cinsinden yaklaşık **9,6 g alüm** veya **5,2 g ferrik klorür**. Ne var ki saha bu kadar cömert değildir. Metal iyonları fosfatla yarışan hidroksit çökeltileri de oluşturduğu için, hedef çıkış değeri düştükçe gereken metal/fosfor mol oranı stokiyometrinin çok üstüne çıkar:

TABLO 3.1

Hedef	Me:P mol oranı	Not
Çıkış TP > 1,0 mg/L	≈1,0	Stokiyometrik ilişki gözlenir
%75 giderim (alüm)	1,25–1,5 (tipik 1,4)	
%85 giderim (alüm)	1,6–1,9 (tipik 1,7)	
%95 giderim (alüm)	2,1–2,6 (tipik 2,3)	
Çıkış TP 0,5–1,0 mg/L	≈2,0	İkincil arıtmaya dozlama
Çıkış TP < 0,1 mg/L	≈6–7	Üçüncül çöktürme ve filtrasyon

Kaynak: EPA Nutrient Control Design Manual (2010); alüm satırları Metcalf & Eddy (1991) tablosundan, DEÜ/Çevre Bakanlığı teknik doküman serisi aktarımıyla.

En iyi giderim **pH 5,5 ile 7,0** arasında elde edilir; pH 7 ile 10 arasında metal hidroksit yüzeyleri daha negatif yüklendiği için verim düşer. İyi karıştırma koşullarında fosfatın büyük bölümü demirle ilk **10 ile 20 saniyede** reaksiyona girer; bu da dozlama noktasında hızlı karıştırmanın neden bu kadar önemli olduğunu açıklar. Üçüncü bir seçenek kireçtir: pH 10'un üstünde fosfat hidroksiapatit olarak çöker, ama kireç önce suyun bikarbonat alkalinitesiyle reaksiyona girdiği için gereken doz fosfordan bağımsızdır ve tipik olarak toplam alkalinitenin **1,4 ile 1,6 katıdır**; bu yüzden aktif çamura doğrudan eklenemez.

Kimyasal dozlama, akış şemasında üç noktadan yapılabilir: birincil çökeltimden önce (ön çöktürme), havalandırma havuzuna veya son çökeltim öncesine (eş zamanlı çöktürme) ya da ikincil çıkışa, ayrı bir çökeltim ve filtrasyon kademesiyle birlikte (üçüncül çöktürme). En düşük çıkış değerleri üçüncül çöktürmeyle elde edilir.

ÖRNEK 3.1 kimyasal fosfor giderimi

Ferrik klorür dozunu ve ek çamuru hesaplamak

VERİLENLER Q = 20.000 m^3/gün (100.000 NE) ikincil çıkış PO_4-P = 2,0 mg/L hedef 0,5 mg/L
koagülant $FeCl_3$ (susuz, 162,2 g/mol)
Fe:P mol oranı = 2,0 (0,5-1,0 mg/L hedefinde EPA önerisi)

1. Giderilecek fosfor: 2,0 − 0,5 = 1,5 mg/L → 1,5 / 30,97 = **0,0484 mmol/L**

2. Demir dozu: 2,0 × 0,0484 = 0,0969 mmol/L → × 55,85 = **5,41 mg Fe/L**

3. Ferrik klorür: 5,41 × 162,2 / 55,85 = 15,7 mg/L → günlük 15,7 × 20.000 / 1.000 ≈ **314 kg/gün**

4. Alkalinite tüketimi: 15,7 × 0,925 ≈ **14,5 mg $CaCO_3$/L**

5. Kimyasal çamur (EPA stokiyometrisi): $Fe_{1,6}(H_2PO_4)(OH)_{3,8}$ = 0,0484 × 250,9 = 12,1 mg/L; fazla demir 0,0969 − 1,6 × 0,0484 = 0,0194 mmol/L → $Fe(OH)_3$ = 0,0194 × 106,85 = 2,1 mg/L; toplam 14,2 mg/L → ≈ **285 kg KM/gün** (kontrol: giderilen gram P başına ~10 g kuralı → 300 kg/gün ✓)

SONUÇ **$FeCl_3$ ≈ 314 kg/gün · alkalinite 14,5 mg/L · ek kimyasal çamur ≈ 285 kg KM/gün**

YORUM *Hedef 0,1 mg/L'ye inseydi mol oranı 6-7'ye çıkacak, metal dozu ve çamur birkaç kat artacaktı. Çıkış fosforunun her ondalık basamağı, kimyasal ve çamur olarak üstel bir bedeldir.*

UZMAN NOTU

Kimyasal çöktürmenin ulaşabileceği alt sınır, sanılandan çok daha düşüktür. EPA'nın 23 ABD tesisini inceleyen 2007 tarihli raporunda, Colorado'daki Snake River tesisi ortalama **70 mg/L** alüm, polimer, üçüncül çöktürme ve 1,5 m derinliğinde karışık ortamlı filtreyle çıkış toplam fosforunu ortalama **0,015 mg/L**'ye indirmiştir. Bu değerin bedeli kimyasal tüketimi ve çamurdur: EPA'ya göre fosfor gideriminin büyük bölümü üçüncül kademede yapıldığında tesisin toplam çamur üretimi **%10 ile 40** artar. Pratik kural, kimyasal yolla giderilen her gram fosfor için yaklaşık **10 gram** ek kimyasal çamur oluştuğudur.

Alüm ile ferrik arasındaki seçim yalnızca birim fiyata bağlı değildir. Alüm genellikle ferrikten daha az çamur üretir, ama oluşan alüminyum hidroksit çamurunun yoğunlaştırılması ve susuzlaştırılması daha zordur. Her iki metal tuzu da çıkış suyunda ve çamurda tuzluluğu artırır; bu, suyun sulamada yeniden kullanılacağı durumlarda dikkate alınması gereken bir yan etkidir.

KİLİT MESAJ

Kimyasal arıtma, kendiliğinden çökmeyen kolloidleri yük nötralizasyonu, süpürme flok ve polimer köprüleriyle büyütüp çöktürülebilir hâle getirir; aynı kimya, ortofosfatı metal fosfat olarak çamura aktarır. Çıkış fosforu düştükçe gereken metal dozu stokiyometrinin altı yedi katına çıkar ve her gram fosfor yaklaşık on gram ek çamur demektir.

3.3 Filtrasyon: Derin Yatak ve Kumaş Filtreler

İkincil çıkıştan kaçan biyolojik floklar ve kimyasal çöktürmeden kalan ince çökelti, ileri arıtmanın en eski ve en yaygın kademesi olan filtrasyonla tutulur. Filtrasyon, fosforun çok düşük değerlere inmesinin, dezenfeksiyonun etkili olmasının ve membranların korunmasının ön koşuludur: askıda katı, hem içindeki fosfor ve organik madde yüzünden hem de mikroorganizmaları UV ışığından ve klordan saklayan bir kalkan olduğu için uzaklaştırılmalıdır.

Bir kum yatağı nasıl tutar?

Bir granüler filtre, çoğu zaman sanıldığı gibi bir elek değildir. Eleme, yani gözenekten büyük parçacıkların yüzeyde tutulması, filtrenin hızla tıkanmasına yol açan istenmeyen bir mekanizmadır. Asıl giderim yatağın derinliğinde gerçekleşir ve iki adımlıdır: önce parçacık bir kum tanesinin yüzeyine **taşınır**, sonra nanometre ölçeğindeki yüzey kuvvetleriyle oraya **tutunur**. Taşınma mekanizmaları yakalanma (akım çizgisinin taneye bir parçacık yarıçapı kadar yaklaşması), sedimantasyon, atalet ve küçük parçacıklarda Brown hareketiyle difüzyondur.

Bu mekanizmaların bir araya gelmesi, ilginç bir sonuç doğurur: filtre veriminde yaklaşık **1 µm** boyutunda bir **minimum** vardır. Bu boyuttaki parçacıklar difüzyonun etkili olması için çok büyük, yakalanma ve sedimantasyonun etkili olması için çok küçüktür. Bakterilerin büyüklüğü tam da bu aralığa düştüğü için, koagülant eklenmeden yapılan filtrasyon patojenlere karşı güvenilir bir bariyer sayılmaz. Ayrıca hem filtre ortamı hem de parçacıklar genellikle negatif yüklü olduğundan, kimyasal kullanılmayan filtrasyon “elverişsiz” koşulda çalışır; filtre öncesi küçük dozlarda koagülant veya polimer eklenmesi verimi belirgin biçimde artırır.

Bir filtre çalışma döngüsü boyunca dört evreden geçer: temiz yatak, yakalanan parçacıkların yeni tutunma yüzeyleri oluşturduğu **olgunlaşma** evresi, giderimin sabit kaldığı çalışma evresi ve yatağın doyup parçacıkları geçirmeye başladığı **kırılma** (breakthrough). Kırılmaya ya da izin verilen yük kaybına ulaşıldığında filtre ters yıkanır.

Tasarım değerleri

Temiz bir kum yatağındaki yük kaybı, laminer akış koşullarında Carman-Kozeny denklemiyle hesaplanır: yük kaybı filtrasyon hızıyla doğru, tane çapının karesiyle ters orantılıdır ve porozitenin çok güçlü bir fonksiyonudur. TU Delft ders notlarındaki değerlerle yapılan örnek bir hesap (5 m/sa hız, %40 porozite, 0,55 mm tane, 0,7 m yatak) yaklaşık **0,33 m** temiz yatak yük kaybı verir. Uygulamadaki tipik değerler şöyledir:

- **Filtrasyon hızı:** EPA’ya göre tasarım hızı tipik olarak **4,9 ile 19,6 m/sa**; ABD’nin “Ten States” atıksu tasarım standardı pik saatlik debide üst sınırı **12,2 m/sa** olarak

koyar ve en az iki ünite ister.

- **Ortam:** Kum için efektif tane çapı **0,35 ile 0,55 mm**, antrasit için **0,8 ile 1,2 mm**; üniformluk katsayısı 1,7'nin altında. Çift ve çok ortamlı filtreler (antrasit, kum ve garnet katmanları) ileri arıtmanın ana filtre tipidir, çünkü iri taneli hafif katman yukarıda, ince taneli ağır katman aşağıda kalarak yatağın tüm derinliğinin kullanılmasını sağlar.
- **Yük kaybı ve ters yıkama:** Temiz yatakta **0,15 ile 0,46 m** olan yük kaybı **1,8 ile 2,4 m**'ye ulaştığında ters yıkama başlar. Ters yıkama her ortam katmanını en az **%20** genleştirecek hızda ve en az **10 dakika** sürer; ters yıkama suyunun tesis girişine geri dönüşü ortalama günlük debinin **%15'ini** aşmamalıdır.

Disk ve kumaş filtreler

Son yirmi yılda ileri arıtmanın filtrasyon kademesinde **kumaş ortamlı disk filtreler** hızla yaygınlaştı. Gözenek boyutu **10 ile 30 µm** olan bu filtreler, disklerin %60 ile 70'i suya batık şekilde döner ve batık olmayan kısım püskürtmeyle temizlenir; ortam akışkanlaştırılmadığı için ters yıkama suyu çok azdır. EPA'nın derlediği pilot verilere göre **7,3 ile 16,4 m/sa** hidrolik yükte, ferrik sülfat ve polimerle birlikte toplam fosforu **0,3 mg/L**'nin altına indirebilirler. Kaliforniya'nın yeniden kullanım mevzuatı (Title 22), onaylı filtreler için çıkış bulanıklığını günlük ortalama **2 NTU** ile sınırlar; aynı mevzuat membran filtrasyon için bu sınırı **0,2 NTU** olarak koyar. Aradaki on katlık fark, granüler ve kumaş filtreler ile membranların aynı işi farklı güvenilirlik düzeylerinde yaptığını gösterir.

3.4 Adsorpsiyon ve Aktif Karbon: Mikrokirleticilere Karşı İlk Savunma

Filtrasyon parçacıkları tutar; çözünmüş hâldeki organik mikrokirleticiler ise filtrenin içinden hiçbir şey olmamış gibi geçer. İleri arıtmada bu maddeleri sudan almanın iki ana yolu vardır: onları bir katı yüzeye bağlamak (adsorpsiyon) ya da kimyasal olarak parçalamak (oksidasyon). Aktif karbon, birincisinin sanayileşmiş biçimidir.

Aktif karbon ve izotermler

Aktif karbon, kömür, odun veya hindistan cevizi kabuğu gibi karbonlu malzemelerin yüksek sıcaklıkta aktive edilmesiyle elde edilen, son derece gözenekli bir malzemedir. Adsorpsiyon esas olarak **2 nm'den küçük** mikro gözeneklerde gerçekleşir; daha büyük gözenekler moleküllerin bu bölgeye ulaşmasını sağlayan yollar işlevi görür. Bir gram aktif karbonun iç yüzey alanı yüzlerce metrekareye ulaşır.

Belirli bir kirletici için karbonun ne kadar yük taşıyabileceğini, sabit sıcaklıkta denge yükünü denge derişimine bağlayan **adsorpsiyon izotermi** belirler. Atıksu uygulamal-

arında en sık kullanılan iki model, ampirik **Freundlich** ve tek tabakalı yüzey varsayımına dayanan **Langmuir** izotermleridir.

DENKLEM 3.2 · FREUNDLİCH İZOTERMİ · AKTİF KARBONUN YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n} \tag{3.2}$$

BURADA

- q_e denge yükü (mg kirletici / g karbon)
- C_e denge derişimi (mg/L)
- K_F Freundlich kapasite sabiti
- $1/n$ adsorpsiyon yoğunluğu üssü (boyutsuz)

Tek tabakalı yüzey varsayan Langmuir modeli: $q_e = q_{max} \cdot b \cdot C_e / (1 + b \cdot C_e)$. Toz karbonda gereken doz kütle dengesinden: $W = (C_0 - C_e) / q_e$; granüler karbonda tasarım ölçütü boş yatak temas süresidir, EBCT = V / Q. Atıksuda karbon dozları çözünmüş organik karbona göre verilir: İsviçre'de ayrı temas reaktöründe yaklaşık 1,5 g PAC / g ÇOK.

İzoterm sabitleri karbon türüne, pH'a, sıcaklığa ve özellikle sudaki doğal organik maddeye bağlıdır. Bu sonuncusu kritik bir ayrıntıdır: atıksudaki çözünmüş organik karbon, mikrokirleticilerle aynı adsorpsiyon bölgeleri için yarışır ve karbonun kapasitesinin büyük kısmını tüketir. Bu yüzden atıksuda aktif karbon dozları her zaman mikrokirletici derişimine göre değil, **çözünmüş organik karbon (ÇOK)** derişimine göre ifade edilir.

Toz ve granüler aktif karbon

Aktif karbon iki biçimde kullanılır. **Toz aktif karbon (PAC)** suya doğrudan dozlanır, bir temas süresinin ardından çökeltme ve filtrasyonla sudan ayrılır; rejenere edilemez, çamurla birlikte yakılır. **Granüler aktif karbon (GAC)** ise bir filtre gibi yatak hâlinde kullanılır; tasarımın anahtar parametresi, yatak hacminin debiye oranı olan **boş yatak temas süresidir (EBCT)**. GAC yatağında boşluk oranı yaklaşık %45 olduğu için gerçek temas süresi EBCT'nin yaklaşık yarısıdır. GAC, kırılmaya kadar çok düşük çıkış derişimi sağlar, ani derişim artışlarına dayanıklıdır ve tükendiğinde termal olarak rejenere edilebilir.

TU Delft'in Hollanda pratiğinden derlediği değerler, karbonun ömrünün hedefe göre ne kadar değiştiğini gösterir: koku ve tat giderimi için bir GAC yatağı yaklaşık **50.000 yatak hacmi**, atrazin gibi pestisitler için **25.000**, trihalometan öncülleri için **15.000** yatak hacmi su işleyebilirken, EDTA gibi zor giderilen maddelerde bu sayı **2.500**'e düşer.

İsviçre deneyimi: dördüncül arıtmanın laboratuvarı

Mikrokirletici giderimini ulusal ölçekte ilk zorunlu kılan ülke İsviçre'dir ve AB'nin 2024 direktifi büyük ölçüde onun deneyimine dayanır. İsviçre'de **1 Ocak 2016**'da yürürlüğe giren düzenleme, yüzü aşkın arıtma tesisinin yükseltilmesini ve 12 gösterge maddede (aralarında karbamazepin, diklofenak, metoprolol ve benzotriazol bulunan, çoğu ilaç

etken maddesi olan bir liste) giriş-çıkış ortalamasıyla **%80 giderim** sağlanmasını öngördü. Finansman kirleten öder ilkesiyle kuruldu: bağlı nüfustan kişi başı yılda **9 İsviçre frangı** atıksu vergisi alınıyor, yükseltilen tesisin yatırımının **%75'i** bu fondan karşılanıyor.



İsviçre'nin seçtiği iki ana teknoloji ozonlama ve aktif karbondur. Ozonlamada doz **0,4 ile 0,6 g O_3/g ÇOK**, reaktörde en az **13 dakika** bekleme süresi uygulanır ve oluşan dönüşüm ürünlerini tutmak için arkasından mutlaka biyolojik olarak aktif bir son arıtma (örneğin kum filtresi) gelir. Ayrı bir temas reaktöründe toz aktif karbon dozu yaklaşık **1,5 g PAC/g ÇOK**, karbonun doğrudan biyolojik havuza verildiği yöntemde **2 ile 3 g/g ÇOK**'tur. Aralık 2025 itibarıyla İsviçre'de mikrokirletici kademesi işletmede olan **39 tesis** (bunlardan biri arıtma değil, atıksuyu başka bir tesise yönlendirme çözümü) ve planlama ya da inşaat aşamasında **46 tesis** bulunuyor.

UZMAN NOTU

Dördüncül arıtmanın enerji ve maliyet bedeli artık tahmin değil, ölçülmüş veridir. İsviçre Su Birliği (VSA) adına 2024'te işletmedeki 13 tesis (6 ozon, 5 toz karbon, 2 granüler karbon) incelendi: yıllık ortalama giderim **%75 ile 90** arasında, mikrokirletici kademesinin elektrik tüketimi son arıtma dahil **0,02 ile 0,10 kWh/m³**, sermaye dahil yıllık maliyet **0,07 ile 0,27 İsviçre frangı/m³**. İkinci bölümde bir aktif çamur tesisinin toplam elektriğinin yarısından fazlasının havalandırmaya gittiği görülmüştü; bu ölçekle karşılaştırıldığında dördüncül kademe, enerji faturasına belirgin ama yönetilebilir bir yük ekler.

3.5 Membran Prosesleri: MF, UF, NF ve Ters Ozmoz

İkinci bölümde membran biyoreaktörün (MBR) biyolojik işleyişi anlatılmış, membranların gözenek boyutuna göre sınıflandırılması ve ayrım teorisinin fiziği bu bölüme bırakılmıştı. Membranlar, ileri arıtmanın en güvenilir bariyeridir: granüler bir filtre parçacıkları olasılıksal olarak tutarken, sağlam bir membran belirli bir boyutun üstündeki her şeyi fiziksel olarak durdurur.

Dört sınıf, iki mekanizma

İleri arıtmada kullanılan, basınçla çalışan membranlar, tuttukları en küçük madde ve gereken basınç bakımından dört sınıfa ayrılır. İlk ikisi gözenekli membranlardır ve **eleme** ile çalışır; son ikisinde ise tanımlı bir gözenek yoktur, ayrım **çözünme-difüzyon** mekanizmasıyla gerçekleşir.

TABLO 3.2

Proses	Gözenek / ayırma sınırı	Mekanizma	İşletme basıncı	Tutar
Mikrofiltrasyon (MF)	0,1–0,2 µm	Eleme	0,2–2,8 bar	Askıda katı, bakteri, protozoa
Ultrafiltrasyon (UF)	0,01–0,05 µm (10.000–500.000 Da)	Eleme	0,2–2,8 bar	Ek olarak virüs, kolloid, makromolekül
Nanofiltrasyon (NF)	200–1.000 Da	Çözünme-difüzyon ve yük	yaklaşık 7 bar'a kadar	Çok değerlikli iyonlar (sertlik), çoğu organik
Ters ozmoz (RO)	< 100 Da	Çözünme-difüzyon	Deniz suyunda 69 bar'ın üstü	Tek değerlikli iyonlar dahil hemen her şey

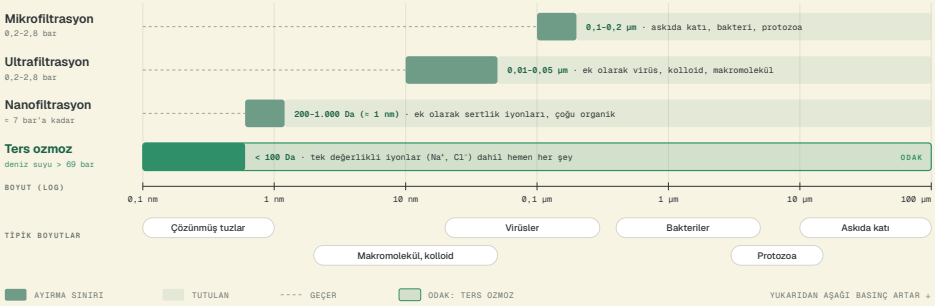
Kaynak: EPA Membrane Filtration Guidance Manual (2005).

Nanofiltrasyon, ters ozmozdan yalnızca tek değerlikli iyonları (özellikle sodyum ve klorür) daha az tutmasıyla ayrılır; bu yüzden "membran yumuşatma" olarak da anılır. MF ve UF genellikle içi boş lif (hollow fiber), NF ve RO ise spiral sargılı modüllerde üretilir. Gözenek boyutu tek başına giderimi belirlemez: elektrostatik itme, adsorpsiyon ve membran yüzeyinde biriken kek tabakası da tutmaya katkı verir. Bu yüzden ABD'nin içme suyu mevzuatı, bir membrana Cryptosporidium giderimi için kredi vermeden önce gerçek mikroorganizma vekilleriyle yapılan **meydan okuma testi** ister.

ŞEKİL 3.3

Membran Spektrumu: Kim Neyi Tutar?

Her membran ayırma sınırından büyük olan her şeyi tutar. Sınır küçüldükçe tutulan yelpaze genişler, gereken basınç da yükselir.



Ayırma sınırları ve basınçlar: EPA Membrane Filtration Guidance Manual (2005). Dalton bir molekül ağırlığı birimidir; boyuta çevrimi yaklaşıktır. Parçacık boyutları tipik aralıklardır. Gözenek boyutu tek başına giderimi belirlemez: elektrostatik itme, adsorpsiyon ve kek tabakası da tutmaya katkı verir.

Akı, basınç ve direnç

Bir membranın performansı **akı** ile ölçülür: birim membran alanından birim zamanda geçen süzüntü (permeat) miktarı, tipik olarak L/m²·sa. MF ve UF'de akıyı yönlendiren kuvvet, besleme ile süzüntü arasındaki **transmembran basınçtır (TMP)**; akıya karşı koyan ise membranın kendi direnci ile üzerinde biriken kirlenme tabakasının direncidir.

DENKLEM 3.3 · MEMBRAN AKISI · DİRENÇ-SERİ MODELİ

$$J = \frac{TMP}{\mu \cdot (R_m + R_f)} \tag{3.3}$$

BURADA

- J akı (L/m²·sa)
- TMP transmembran basınç (Pa)
- μ dinamik viskozite (Pa·s)
- R_m membranın kendi direnci (m⁻¹)
- R_f kirlenme tabakasının direnci (m⁻¹)

NF ve RO'da itici kuvvet net sürücü basınçtır: NDP = ΔP − Δπ. Osmotik basınç van 't Hoff denklemiyle π = i·C·R·T; deniz suyunda yaklaşık 25-28 bar, 3 g/L tuzlu acı suda yalnızca 2-2,5 bar. Kirlenme direnci R_f arttıkça aynı akı için daha yüksek basınç gerekir.

Bu basit ilişki, işletmenin temel ikilemini açıklar: kirlenme direnci arttıkça aynı akıyı korumak için basıncı artırmak gerekir. Basınç belirli bir sınıra ulaştığında membran geri yıkanır; geri yıkamanın gideremediği **dönüşsüz kirlenme** biriktiğinde ise

kimyasal temizlik yapılır. Biyolojik kirlenmeye karşı sodyum hipoklorit, inorganik kabuklanmaya karşı sitrik asit gibi asitler kullanılır.

Saf su ile atıksu arasındaki fark büyüktür. Laboratuvarda temiz suyla ölçülen MF akısı binlerce L/m²·sa olabilirken, atıksu uygulamasında işletme akıları çok daha düşüktür: dünyanın en büyük su geri kazanım tesisi olan Kaliforniya'daki **Orange County** tesisinde (GWRS) mikrofiltrasyon yaklaşık **34 L/m²·sa** akı ve **%90'ın üzerinde** geri kazanımla, ters ozmoz ise en fazla **20 L/m²·sa** akı ve **%85** geri kazanımla çalışır. İkinci bölümde anlatılan MBR'lerde de net akılar tipik olarak **23 ile 27 L/m²·sa** civarındadır.

Ters ozmozun fiziği: osmotik basıncı yenmek

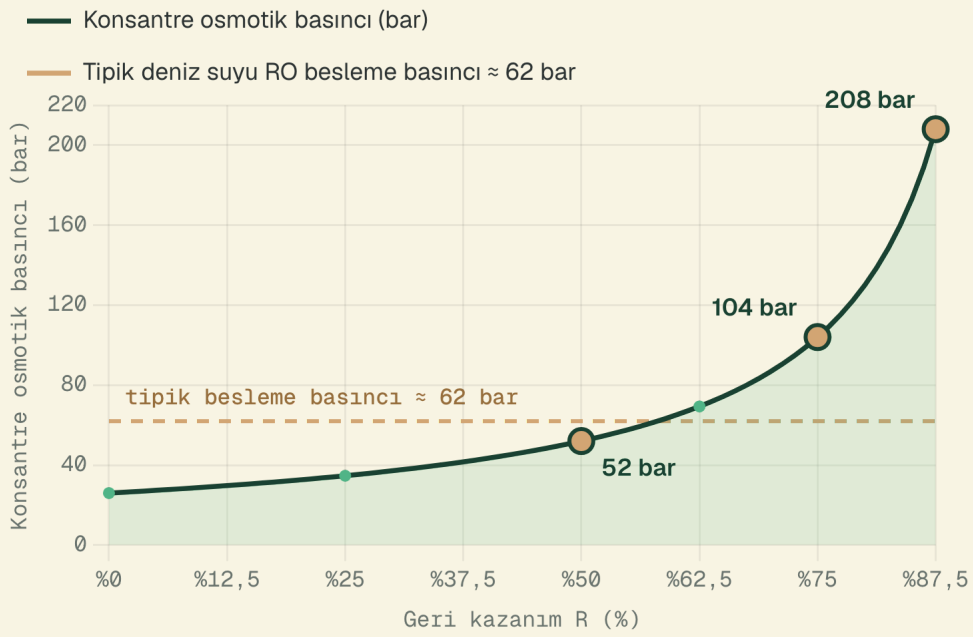
Ters ozmozda su, membranın içinden çözünüp difüzyonla geçer; su akısı uygulanan basınçla osmotik basınç arasındaki farkla orantılıdır, tuz akısı ise basınçtan bağımsızdır. Bu yüzden basınç arttıkça hem daha çok su geçer hem de tuz tutma oranı yükselir. Ters ozmozun bedeli, yenilmesi gereken **osmotik basınçtır**. Van 't Hoff denklemiyle ($\pi = i \cdot C \cdot R \cdot T$) yapılan ideal hesap, litresinde 35 gram tuz eşdeğeri bulunan deniz suyu için 25 °C'de yaklaşık **29,7 bar** verir; EPA'nın "her 100 mg/L çözünmüş katı için yaklaşık 1 psi" pratik kuralı ise yaklaşık **24 bar** verir. Gerçek deniz suyunun osmotik basıncı ideal olmayan davranış nedeniyle bu ikisinin arasında, yaklaşık **25 ile 28 bar**'dır. Litresinde 3 gram tuz bulunan acı su için aynı değer yalnızca **2 ile 2,5 bar** civarındadır.

Daha da önemlisi, osmotik basınç sabit değildir. Membranın besleme tarafında kalan su (konsantre) tuzlandıkça osmotik basıncı da artar. The Open University'nin hesabına göre deniz suyu RO'sunda **%50** geri kazanımda konsantrenin osmotik basıncı ikiye katlanarak **50 bar**'ın üstüne çıkar; **%75** geri kazanımda **100 bar**'ı, **%87,5**'te **200 bar**'ı aşar. Bu yüzden pratikte deniz suyu RO'sunda yaklaşık **%50** geri kazanım, beklenebilecek en yüksek değerdir; daha düşük tuzluluktaki arıtılmış atıksuda ise %75 ile 85 geri kazanım mümkündür.

ŞEKİL 3.4

Ters Ozmozda Geri Kazanımın Osmotik Bedeli

Deniz suyu RO'sunda konsantre tuzlandıkça yenilmesi gereken basınç hızla artar.



Hesap: tam tuz tutma varsayımıyla $\pi_{konsantre} \approx \pi_{besleme} / (1 - R)$; deniz suyu için $\pi_{besleme} \approx 26$ bar.
Pratikte deniz suyu RO'sunda beklenebilecek en yüksek geri kazanım yaklaşık %50'dir.
Kaynak: The Open University (RO süreci); Martin ve Eisberg (Energy Recovery Inc.) örnek tasarımı.

Enerji ve konsantre

Membranların enerji tüketimi, gereken basınçla birlikte artar. Deniz suyu ters ozmozunda %50 geri kazanımda teorik minimum enerji **1,06 kWh/m³** iken, yeni yüksek geçirgenlikli membranlarla pilot ölçekte RO kademesi için yaklaşık **1,8 kWh/m³** ölçülmüştür. Atıksudan geri kazanım bundan çok daha ucuzdur: Orange County Su İdaresi'ne göre GWRS, **deniz suyu arıtmanın üçte biri** kadar enerji kullanır. Membran biyoreaktörlerde ise tam ölçekli tesislerin derlemesi **0,4 ile 1,6 kWh/m³** aralığını verir; konvansiyonel aktif çamurda bu değer **0,3 ile 0,6 kWh/m³**'tür. Farkın büyük kısmı, membran yüzeyini temiz tutmak için yapılan hava sıyırmasından gelir.

Ters ozmozun ikinci bedeli **konsantredir**: giren tuzların neredeyse tamamı, giren suyun yüzde 15 ile 25'i kadar bir hacimde yoğunlaşır ve bertaraf edilmesi gerekir. Türkiye'de Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nin[6] 2022'de yenilenen 28. maddesi,

6. Kaynak: mevzuat.gov.tr

yeniden kullanım için yapılan arıtmadan doğan konsantre suyun deşarjını Bakanlıkça belirlenecek kriterlere bağlamıştır.

Kirlenme: membranın kronik hastalığı

Membran tıkanmasının dört türü vardır: kil ve flok gibi parçacıkların neden olduğu **kolloidal** kirlenme; bakterilerin membran yüzeyinde biyofilm oluşturduğu **biyolojik** kirlenme; hümik maddeler ve mikroorganizmaların salgıladığı polimerlerin oluşturduğu jel benzeri **organik** kirlenme; ve RO'da kalsiyum karbonat, kalsiyum sülfat ve silika gibi az çözünen tuzların doygunluğu aşıp çökmesiyle oluşan **kabuklanma**. Bunlara, tutulan maddelerin membran yüzeyinde birikerek derişiminin artması olgusu olan **konsantrasyon polarizasyonu** eşlik eder. Kirlenme kontrolü, membranın ön arıtmasının, akı seçiminin ve temizlik stratejisinin tamamını belirler; bir membran tesisinin işletme maliyetinin ve ömrünün asıl belirleyicisidir. Membran ömrü, iyi işletilen tesislerde **5 ile 10 yılın** üzerindedir.

KİLİT MESAJ

Membranlar ileri arıtmanın en güvenilir bariyeridir: mikrofiltrasyon bakteri ve protozoaları, ultrafiltrasyon virüsleri, ters ozmoz ise tuzlar dahil hemen her şeyi fiziksel olarak durdurur. Bedel, osmotik basıncı yenmek için harcanan enerji, sürekli yönetilmesi gereken kirlenme ve bertaraf edilmesi gereken tuzlu konsantredir.

3.6 İleri Oksidasyon Prosesleri (AOP)

İleri arıtma zincirinde aktif karbon mikrokirleticileri sudan alıp bir katıya taşır; ileri oksidasyon prosesleri ise onları yerinde parçalar. İleri oksidasyonun ortak paydası, doğadaki en güçlü oksidanlardan biri olan **hidroksil radikalidir (OH·)**.

Hidroksil radikali neden bu kadar güçlü?

EPA'nın dezenfektan ve oksidan kılavuzuna göre hidroksil radikalinin standart indirgenme potansiyeli **+2,8 V**'tur. Bu değer ozonun (**+2,07 V**), hidrojen peroksitin (yaklaşık **1,8 V**), potasyum permanganatın (**1,68 V**) ve klorun (yaklaşık **1,4 V**) belirgin biçimde üstündedir. Ama asıl önemli özelliği gücü değil, **seçici olmamasıdır**. Ozon gibi seçici oksidanlar yalnızca belirli kimyasal gruplara saldırırken, hidroksil radikali organik moleküllerin büyük çoğunluğuyla, sulu ortamda difüzyonun sınırladığı hıza yakın hızlarda (ikinci derece hız sabitleri tipik olarak **10^8 ile 10^{10} $M^{-1}s^{-1}$**) reaksiyona girer. Bu, ozonla doğrudan oksidasyonun hızının birkaç mertebe üstündedir.

Hidroksil radikalinin ömrü mikrosaniyelerle ölçüldüğü için depolanamaz; ileri oksidasyon prosesleri onu suyun içinde, yerinde üreten yöntemlerdir:

- **Ozon ve hidrojen peroksit (peroksone):** Hidrojen peroksit, ozonun bozunmasını hızlandırır ve tüketilen her mol ozon başına yaklaşık **bir mol** hidroksil radikali üretir. Trikloretilen ve perkloretilen giderimi için optimum H_2O_2/O_3 oranı ağırlıkça yaklaşık **0,5**'tir.
- **UV ve hidrojen peroksit:** 254 nm'lik UV ışığı, hidrojen peroksit molekülünü ikiye bölerek iki hidroksil radikali üretir. Orange County'nin içme suyu kalitesinde su üreten zincirinin son kademesi budur.
- **Fenton prosesi:** Demir(II) iyonu hidrojen peroksitle reaksiyona girerek hidroksil radikali üretir. Etkili ama optimum pH'ı yaklaşık **2,8** olduğu için nötr pH'taki kentsel atıksuda pratik değildir; daha çok endüstriyel atıksularda kullanılır.

Enerji verimliliği açısından bu prosesler arasında büyük farklar vardır. 2018'de *Water Research* dergisinde yayımlanan kapsamlı bir derlemeye göre ozon, peroksone ve UV/H_2O_2 gibi yöntemlerin kirletici derişimini bir mertebe azaltmak için gereken medyan enerjisi **1 kWh/m³'ün altındayken**, ultrason ve UV fotokataliz gibi yöntemlerde bu değer **100 kWh/m³'ü** aşar ve bunlar henüz tam ölçekte uygulanabilir değildir.

Bir uyarı: bromat ve dönüşüm ürünleri

İleri oksidasyon kirleticiyi her zaman tamamen karbondioksit ve suya çevirmez. EPA'nın vurguladığı gibi ne ozon ne de peroksone, toplam organik karbonu belirgin biçimde azaltır; ürünler aldehitler, ketonlar ve daha kolay biyolojik olarak ayrışan organik maddelerdir. İsviçre uygulamasında ozonlamanın arkasına biyolojik bir filtrenin konmasının nedeni budur.

Daha ciddi bir yan ürün **bromattır**. Bromür içeren suların ozonlanmasında ozon, bromürü önce hipobromite, sonra bromata yükseltger; bromat muhtemel insan kanserojeni olarak sınıflandırılır. WHO, içme suyunda bromat için **10 µg/L** geçici kılavuz değeri belirlemiştir ve ozonlama sonrası bildirilen derişimlerin **2 µg/L'nin altından 293 µg/L'ye** kadar uzandığını not eder. Bromat oluşumunun en iyi tahmin edicileri sudaki bromür derişimi ve ozon dozudur. Bu, kıyı kentlerinde deniz suyu sızması nedeniyle bromürü yüksek atıksuların ozonla arıtılmasında tasarımı doğrudan etkileyen bir kısıttır.

> **UZMAN NOTU**
>
> İleri oksidasyonun karbon ayak izi ilgi çekici bir karşılaştırmaya konu olur. İsviçre'deki işletme verilerine göre ozonlama kademesi nüfus eşdeğeri başına yılda **1 ile 4 kg** karbondioksit eşdeğeri emisyona yol açarken, fosil kaynaklı aktif karbon kullanan tesislerde bu değer **6 ile 23 kg**'a çıkar; karbonun üretimi ve yakılması enerji yoğundur. Biyojenik (odun ya da kabuk kökenli) aktif karbonda değer **3 ile 7 kg**'a iner. Teknoloji seçimi bu yüzden yalnızca giderim verimine değil, karbon muhasebesine de dayanmalıdır.

3.7 Dezenfeksiyon: Klor, UV ve Ozon

Arıtılmış atıksuyun berrak olması, güvenli olduğu anlamına gelmez. İkincil arıtmadan, hatta ileri arıtmadan geçmiş su, bağırsak kökenli bakteriler, virüsler ve protozoa kistleri taşımaya devam eder. Dezenfeksiyon, bu patojenlerin yok edilmesi değil, **etkisiz hâle getirilmesidir**: amaç, mikroorganizmaların çoğalma yeteneğini ortadan kaldırarak hastalık yapma risklerini kabul edilebilir düzeye indirmektir. Bu ayrım önemlidir, çünkü dezenfeksiyonun başarısı "kaç mikroorganizma kaldı" sorusuyla değil, "kaç mertebe azaltıldı" sorusuyla ölçülür.

Logaritmik dil ve dezenfeksiyon kinetiği

Dezenfeksiyonun ölçü birimi **log giderimdir**: 1 log giderim %90'a, 2 log %99'a, 3 log %99,9'a, 4 log %99,99'a karşılık gelir. Bu dilin altında yatan fiziksel gerçeklik, 1908'de Harriette Chick'in gözlemidir: sabit dezenfektan derişiminde hayatta kalan mikroorganizma sayısı zamanla **birinci derece** bir kinetikle, yani her eşit zaman aralığında aynı oranda azalır. Aynı yıl Herbert Watson bu modele dezenfektan derişimini ekledi ve bugün hâlâ dezenfeksiyon tasarımının temelini oluşturan Chick-Watson yasası doğdu.

DENKLEM 3.4 · CHİCK-WATSON YASASI · DEZENFEKSİYON KİNETİĞİ VE CT

$$\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k \cdot C^{n} \cdot t \tag{3.4}$$

BURADA

- N_0, N başlangıç ve t anındaki canlı mikroorganizma sayısı
- k inaktivasyon hız sabiti
- C kalıntı dezenfektan derişimi (mg/L)
- n seyrelme katsayısı (boyutsuz)
- t temas süresi (dk)

n ≈ 1 ise belirli bir giderim için C·t sabittir: CT kavramı (mg·dk/L). 1 log = %90, 2 log = %99, 3 log = %99,9, 4 log = %99,99 giderim. Tasarımda T, suyun yüzde onunun tankı terk ettiği süredir: T_{10} = ortalama bekleme süresi × bölmeleme faktörü (bölmesiz 0,1 · iyi bölmeli 0,7 · piston akış 1,0).

Chick-Watson yasasının en önemli pratik sonucu **CT kavramıdır**: kalıntı dezenfektan derişimi (C, mg/L) ile temas süresinin (T, dakika) çarpımı. Seyrelme katsayısı 1'e yakın olduğunda, belirli bir log giderim için gereken CT değeri sabittir; düşük derişimle uzun temas ile yüksek derişimle kısa temas aynı sonucu verir. EPA'nın kılavuzları, her dezenfektan, her mikroorganizma grubu, her sıcaklık ve pH için gereken CT değerlerini tablolaştırır ve bu tablolar dünyanın her yerinde dezenfeksiyon tasarımının başlangıç noktasıdır. Gerçek inaktivasyon eğrileri her zaman düz değildir: dezenfeksiyonun başında bir gecikme (omuz) ya da sonunda bir yavaşlama (kuyruklanma) görülebilir; bu sapmalar zamanın bir üssüyle ifade edilen Hom modeliyle tanımlanır.

Klor: ucuz, güçlü ama sorunlu

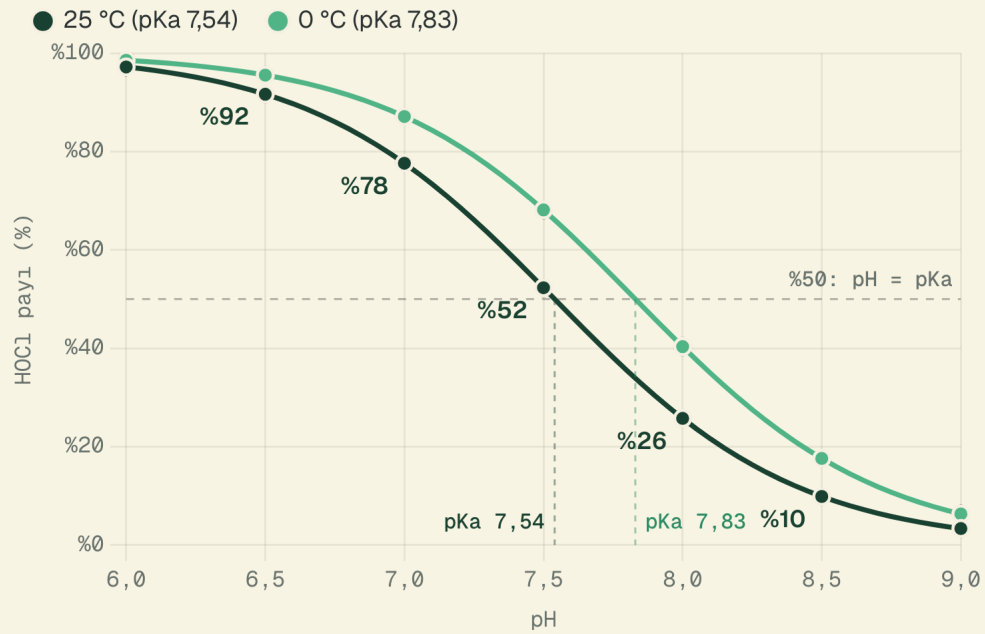
Klor, yüz yılı aşkın süredir dünyanın en yaygın dezenfektanıdır. Klor gazı, sodyum hipoklorit (tipik **%12,5** aktif klor) veya kalsiyum hipoklorit (tipik **%65**) suya verildiğinde, asıl dezenfeksiyonu yapan **hipokloröz asit (HOCl)** oluşur. HOCl zayıf bir asittir ve suyun pH'ına göre hipoklorit iyonuna (OCl^-) ayrışır. Bu ayrışma dezenfeksiyon etkinliğini doğrudan belirler, çünkü HOCl'nin öldürücü gücü hipoklorit iyonununkinden çok yüksektir.

HOCl'nin ayrışma sabiti (pKa) 25 °C'de yaklaşık **7,5**'tir ve soğuk suda yükselir: 1966'da Morris'in türettiği denkleme göre 0 °C'de yaklaşık **7,8**'dir. Bu basit kimya, büyük bir tasarım sonucu doğurur: 25 °C'de pH 6,5'te serbest klorun yaklaşık **%92**'si HOCl hâlindeyken, pH 7,5'te bu oran **%52**'ye, pH 8,5'te **%10**'a düşer. Yani aynı klor dozu, pH 8,5'te pH 6,5'tekinin onda biri kadar güçlü bir dezenfektan gibi davranır.

ŞEKİL 3.5

pH, Klorun Gücünü Nasıl Değiştirir?

Serbest klorun dezenfekte eden asıl biçimi olan hipokloröz asidin (HOCl) payı



HOCl'nin öldürücü gücü hipoklorit iyonundan (OCl^-) çok yüksektir; aynı klor dozu pH 8,5'te pH 6,5'tekinin yaklaşık onda biri etkinlikte çalışır. pKa, Morris (1966) denklemiyle hesaplandı. Kaynak: EPA Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual (1999); Morris (1966).

Atıksuda klorlamayı karmaşıklaştıran bir unsur daha vardır: **amonyak**. Klor önce amonyakla reaksiyona girerek kloraminler oluşturur. Klor/azot ağırlık oranı **5'in**

altında monokloramin baskındır; oran 5 ile **7,6** arasında **kırılma noktası** reaksiyonu gerçekleşir, kloraminler azot gazına yükseltgenir ve kalıntı klor minimuma iner; 7,6'nın üzerinde eklenen klor **serbest klor** olarak birikir. Kloraminler zayıf dezenfektanlardır: EPA tablolarına göre virüslerde 2 log giderim için serbest klorla **3 mg·dk/L** yeterken kloraminle **643 mg·dk/L** gerekir. Nitrifikasyonun tam olmadığı, amonyak taşıyan bir atıksuda klor bu yüzden beklenenden çok daha zayıf kalır.

Aşağıdaki tablo, farklı dezenfektanların aynı işi ne kadar farklı "maliyetlerle" yaptığını gösterir:

TABLO 3.3

Dezenfektan	Virüs, 4 log (10 °C)	Giardia kisti, 3 log (10 °C)
Serbest klor	6	104
Kloramin	1.491	1.850
Klor dioksit	25,1	23
Ozon	1,0	1,43

Kaynak: EPA Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual (1999), Tablo 2-13 ve 2-14. Değerler mg·dk/L; serbest klor satırı virüs için pH 6–9, Giardia için pH 7 ve 0,4 mg/L'nin altındaki kalıntıya aittir.

Direnç sıralaması ve Cryptosporidium sorunu

Mikroorganizmalar klora aynı direnci göstermez. EPA'ya göre klorla dezenfeksiyonun zorluk sırası **bakteri < virüs < protozoa** şeklindedir; Giardia kistlerinin direnci bağırsak virüslerininkinden iki, bağırsak bakterilerininkinden üç mertebe yüksektir. Sıralamanın en ucunda **Cryptosporidium** oosistleri durur: pH 6 ve 22 °C'de yalnızca 1 log giderim için **3.000 ile 4.000 mg·dk/L** CT gerekir; bu, pratik bir klorlama tesisinde ulaşılabilecek değerin çok üstündedir. ABD içme suyu mevzuatı bu yüzden klora Cryptosporidium için hiç kredi vermez.

Klorun bir başka bedeli **dezenfeksiyon yan ürünleridir**. Klor, sudaki doğal organik maddeyle reaksiyona girerek trihalometanlar ve haloasetik asitler gibi sağlık açısından istenmeyen bileşikler oluşturur. Teknik Usuller Tebliği de klorlamanın mahzurları arasında kaza riskini, toksisiteyi, kokuyu ve yan ürün oluşumunu sayar. Atıksuda ek bir sorun daha vardır: alıcı ortama verilen kalıntı klor, sucul canlılar için toksiktir. Bu yüzden klorlanan atıksu çoğu zaman deşarjdan önce kükürt dioksit veya sodyum bisülfitle **deklorine edilir**; tipik doz, her miligram kalıntı klor için yaklaşık **1 mg kükürt dioksittir**. Deklorinasyon eklendiğinde toplam klorlama maliyeti **%30 ile 50** artar.

Tasarımda klorun etkinliğini temas tankının hidroliği belirler. Bir tankta suyun bir kısmı ortalama bekleme süresinden çok daha erken çıkar (kısa devre); bu yüzden CT hesabında ortalama süre değil, suyun yüzde onunun tankı terk ettiği süre (T_{10}) kullan

ılır. T_{10}'un ortalama bekleme süresine oranına **bölmeleme faktörü** denir: bölmesiz, karışık bir havuzda **0,1**, delikli giriş bölmesi ve serpantin akış yolu olan iyi tasarlanmış bir tankta **0,7**, piston akışa yaklaşan bir boru reaktörde **1,0**'dır. Türkiye'de Teknik Usuller Tebliği, klor temas süresini **ortalama debide 30 ile 120 dakika, pik debide 20 ile 60 dakika** olarak tanımlar ve **en az iki** klor tankı ister.

ÖRNEK 3.2 klor temas tankı

Bir klor temas tankının CT değerini kontrol etmek

VERİLENLER Q_{ort} = 20.000 m³/gün pik faktörü 2,0 → Q_{pik} = 40.000 m³/gün = 27,8 m³/dk
Teknik Usuller Tebliği: pik debide en az 20 dk temas
serpantin bölmeli tank, bölmeleme faktörü T_{10}/T = 0,7
temas çıkışı serbest kalıntı klor C = 1,0 mg/L su 10 °C, pH 7

1. Hacim: V = 27,8 × 20 = 556 m³ → **560 m³** seçilir

2. Bekleme süresi: pikte 560 / 27,8 = **20,1 dk**; ortalamada 560 / 13,9 = **40,3 dk** (Tebliğ: ortalama debide 30-120 dk ✓)

3. T 10 : pikte 20,1 × 0,7 = **14,1 dk**; ortalamada 40,3 × 0,7 = **28,2 dk**

4. CT: pikte 1,0 × 14,1 = **14,1 mg·dk/L**; ortalamada **28,2 mg·dk/L**

5. Virüs kontrolü: 4 log için gereken CT (10 °C) 6 mg·dk/L → sağlanır ✓

6. Protozoa kontrolü: Giardia 1 log için gereken CT (10 °C, pH 7, C = 1 mg/L) 37 mg·dk/L → sağlanmaz ×

7. Deklorinasyon: 1 mg SO_2 / mg kalıntı klor × 1,0 mg/L × 20.000 m³/gün = **20 kg SO_2/gün**

SONUÇ
V = 560 m³ · CT pik 14,1 / ortalama 28,2 mg·dk/L · virüs 4 log ✓ · Giardia × · SO_2 ≈ 20 kg/gün

YORUM *Aynı tank virüslere karşı geniş bir güvenlik marjı sunarken, protozoalara karşı yetersiz kalır; Cryptosporidium için ise klorla pratik bir CT'ye ulaşmak imkânsızdır. Yeniden kullanım amaçlı arıtmada filtrasyonun ardından UV'nin eklenmesinin nedeni budur.*

UV: kalıntısız ve yan ürünsüz dezenfeksiyon

Ultraviyole dezenfeksiyon, mikroorganizmaları kimyasalla değil ışıkla etkisiz hâle getirir. **200 ile 300 nm** arasındaki germisit aralıktaki UV ışığı, DNA ve RNA'da yan yana duran pirimidin bazları arasında kovalent bağlar (en yaygını timin-timin dimeri) oluşturur. EPA'ya göre bu dimerler, zincir kırılmaları ve çapraz bağlardan yaklaşık **1.000 kat** daha olasıdır. Hasar mikroorganizmayı öldürmez ama çoğalmasını engeller, bu da hastalık yapamaması anlamına gelir. Bazı bakteriler görünür ışık altında bu hasarı onarabilir (fotoonarım); UV dozunun bu yüzden yeterli marjla seçilmesi gerekir.

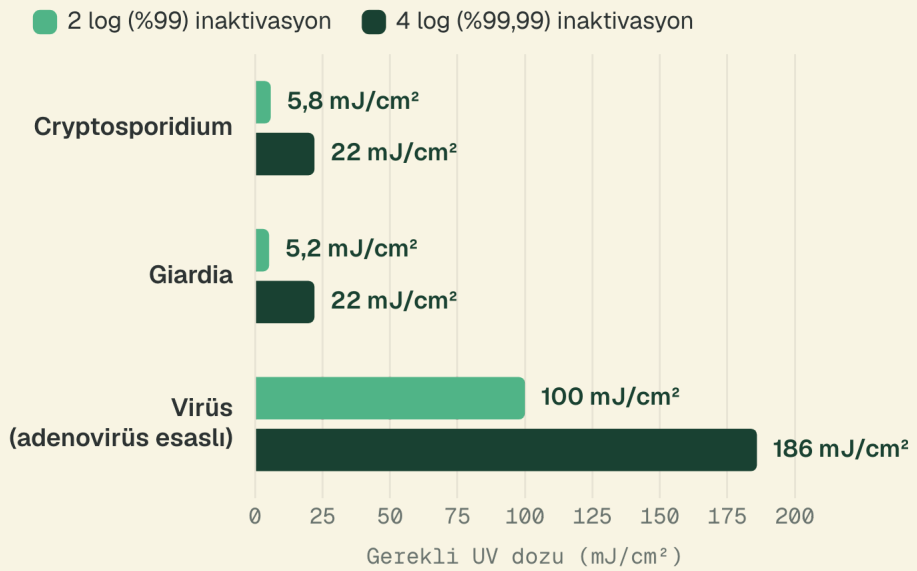
UV'nin tasarım büyüklüğü **dozdur**: birim alana düşen ışık enerjisi, yoğunluk ile sürenin çarpımı, mJ/cm² cinsinden. Düşük basınçlı cıva lambaları neredeyse tamamen **253,7 nm**'de, yani germisit etkinin en yüksek olduğu dalga boyunda ışık yayar; orta basınçlı lambalar çok dalga boylu ve çok daha güçlüdür, büyük tesislerde daha az lambayla aynı işi görür. Düşük basınçlı lambalarla temas süresi yalnızca **20 ile 30 saniyedir**. UV'nin etkinliğini sınırlayan en önemli etken suyun ışığı geçirme oranıdır (**UVT**, 254 nm'de ve 1 cm yol uzunluğunda); askıda katılar ışığı saçar ve parçacıkların içine gizlenen mikroorganizmaları gölgede bırakır. EPA'ya göre askıda katısı **30 mg/L'nin** üzerindeki ikincil çıkışta düşük basınçlı UV'nin etkinliği düşer; Teknik Usuller Tebliği de UV'yi en çok etkileyen hususun askıda katı olduğunu vurgular.

UV'nin en dikkat çekici özelliği, klordaki direnç sıralamasını **tersine çevirmesidir**. Klora neredeyse tamamen dirençli olan Cryptosporidium ve Giardia, UV'ye son derece duyarlıdır; buna karşılık bazı virüsler, özellikle adenovirüsler, UV'ye en dirençli grup olur. ABD içme suyu mevzuatının UV doz tablosuna göre 4 log giderim için Cryptosporidium ve Giardia'da yalnızca **22 mJ/cm²** yeterken, virüslerde **186 mJ/cm²** gerekir.

ŞEKİL 3.6

UV'de Direnç Sıralaması Tersine Döner

Klora en dirençli protozoalar UV'ye en duyarlı gruptur; virüsler ise yüksek doz ister.



Yeniden kullanımda dozlar virüslere göre seçilir: Kaliforniya'da granüler filtre sonrası en az 100 mJ/cm², membran sonrası 80 mJ/cm² (NWRI).
Kaynak: 40 CFR § 141.720 (LT2ESWTR UV doz tablosu); NWRI UV kılavuzu.

Atıksuyun yeniden kullanımında UV dozları bu yüzden virüslere göre belirlenir. Kaliforniya'da izin şartı olarak uygulanan su araştırma enstitüsü (NWRI) kılavuz değerleri, granüler veya kumaş filtre sonrasında en az **100 mJ/cm²** doz ve **%55** UVT, membran filtrasyonu sonrasında **80 mJ/cm²** doz ve **%65** UVT öngörür. UV'nin kalıntı bırakmaması hem avantaj hem dezavantajdır: alıcı ortama toksik bir madde gitmez, yan ürün oluşmaz, ama dağıtım şebekesinde yeniden kirlenmeye karşı koruma da yoktur. Türkiye'de Teknik Usuller Tebliği, sulama amaçlı geri kazanımda UV kullanılacağını açıkça belirtir.

Ozon: güçlü ama pahalı

Ozon, klordan çok daha güçlü bir dezenfektan ve virüsittir: EPA tablosuna göre virüslerde 4 log giderim için **1 mg·dk/L** CT yeterlidir. Ozon kararsız bir gaz olduğu için yerinde, kuru hava veya saf oksijenden yüksek gerilimle üretilir; havadan üretilen gazda ağırlıkça **%0,5 ile 3** ozon bulunur, oksijenden üretimde bu oran iki ile dört kat yüksektir. Atıksuda tipik temas süresi **10 ile 30 dakika**, tasarımda uygulanan dozlar **3 ile 14 mg/L** aralığındadır.

Ozonun atıksu dezenfeksiyonunda en az kullanılan yöntem olmasının nedeni enerji ve maliyettir: EPA'nın tasarım el kitabına göre hava beslemeli bir ozon sistemi, hava hazırlama dahil gram ozon başına yaklaşık **23 Wh** enerji harcar. Ayrıca askıda katısı ve organik maddesi yüksek atıksuda ozonun büyük kısmı patojenlere ulaşmadan organik maddeyle tüketilir. Ozonun asıl yükselişi bugün dezenfeksiyondan çok, mikrokirletici giderimindedir; yani yukarıda anlatılan dördüncül arıtmadadır.

Klor, UV ve Ozon: Üç Dezenfeksiyon Yöntemi

Doğru seçim, hedeflenen patojene ve suyun gideceği yere bağlıdır.

	Klor	UV	Ozon
TİPİK DOZ	**5-20 mg/L**	**80-100 mJ/cm²** yeniden kullanım	**3-14 mg/L** uygulanan
TEMAS SÜRESİ	**15-30 dk** Türkiye Tebliği: ortalama debide 30-120 dk	**20-30 saniye**	**10-30 dk**
ENERJİ	**≈0,016-0,066 kWh/m³**	**≈0,026-0,066 kWh/m³** düşük basınçlı lamba	**≈23 Wh/g O_3** üretim, hava beslemeli
BAKTERİ / VİRÜS	BAKTERİ: Çok etkili VİRÜS: Çok etkili	BAKTERİ: Etkili VİRÜS: Etkili virüslerde yüksek doz	BAKTERİ: Çok etkili VİRÜS: Çok etkili
PROTOZOA	Etkisiz-az etkili Cryptosporidium'a etkisiz	Çok etkili	Etkili
KALINTI	**Var** şebekede koruma; deşarjda toksik	**Yok**	**Yok** kısa ömürlü

(maliyet +%30-50)	Yan ürün yok; askıda katı >30 mg/L'de etkinlik düşer	Bromat (bromürlü sularda)

ETKİNLİK **Çok etkili** **Etkili** **Az etkili / etkisiz**

Kaynak: Teknik Usuller Tebliği Ek 4 (Tablo 4.1-4.2); EPA Wastewater Technology Fact Sheets (1999); LBNL/DOE UV tipsheet (2021); EPA/625/1-86/021 (1986).

UZMAN NOTU

Atıksu dezenfeksiyonu ile içme suyu dezenfeksiyonu farklı hedeflere hizmet eder ve bu fark sayılarda görülür. Kaliforniya'nın üçüncül geri kazanılmış su mevzuatı, filtrasyon sonrası klorla en az **450 mg·dk/L** CT ve en az **90 dakika** modal temas süresi ister; bu, ABD standartlarının pik debide istediği en az 15 dakikanın ve Teknik Usuller Tebliği'nin ortalama debide önerdiği 30 ile 120 dakikanın alt sınırlarının belirgin biçimde üstündedir. Yeraltı suyu besleme amaçlı içme suyu kaynağı üretiminde ise aynı mevzuat virüslerde **12 log**, Giardia ve Cryptosporidium'da **10 log** toplam giderim ister ve tek bir prosese en fazla 6 log kredi tanır. Dezenfeksiyon tasarımı, suyun hangi insanla, hangi yoldan temas edeceği sorusundan başlar.

KİLİT MESAJ

Dezenfeksiyon patojenleri öldürmekten çok etkisiz bırakmaktır ve başarısı log giderimle ölçülür. Klor ucuz ve kalıntı bırakan bir dezenfektandır ama pH'a, amonyağa ve Cryptosporidium'a karşı zayıftır, yan ürün üretir; UV protozoaları kolayca etkisizleştirir ama virüsler için yüksek doz ister ve kalıntı bırakmaz; ozon en güçlüsüdür ama en pahalısıdır. Doğru seçim, suyun gideceği yere ve hangi patojenin hedeflendiğine bağlıdır.

3.8 Çamur Yönetimi: Arıtmanın Görünmeyen Yarısı

Birinci ve ikinci bölümlerde defalarca vurgulandığı gibi, arıtma kirliliği yok etmez; onu bir biçimden diğerine taşır. Fiziksel arıtma çökebilen katıları, biyolojik arıtma çözünmüş organik maddeyi, ileri arıtmadaki kimyasal çöktürme fosforu suyun içinden alıp **çamura** aktarır. Bu yüzden bir arıtma tesisi aslında iki ürün üretir: arıtılmış su ve çamur. İlki görünür ve mevzuatla sıkı biçimde izlenir; ikincisi tesisin arka bahçesinde kalır ama yatırım ve işletme maliyetinin önemli bir kısmını tek başına oluşturur.

Çamur nereden gelir, ne kadardır?

Bir kentsel arıtma tesisinde iki ana çamur akımı vardır. **Birincil çamur**, birincil çökeltim havuzunun tabanından alınır; organik içeriği yüksek, kokulu ve görece kolay susuzlaştırılan bir çamurdur. **Fazla (atık) aktif çamur** ise ikinci bölümde gözlenen verim ve çamur yaşı ilişkisiyle hesaplanan, sistemden sürekli atılan biyokütledir. Çevre Bakanlığı ile Dokuz Eylül Üniversitesi'nin teknik doküman serisinde aktarılan değerlere göre birincil çamur kişi başı günde yaklaşık **72 g kuru madde**, birincil artı aktif çamur ise yaklaşık **114 g kuru madde** üretir; yani fazla aktif çamurun payı kişi başı yaklaşık **42 g**'dır.

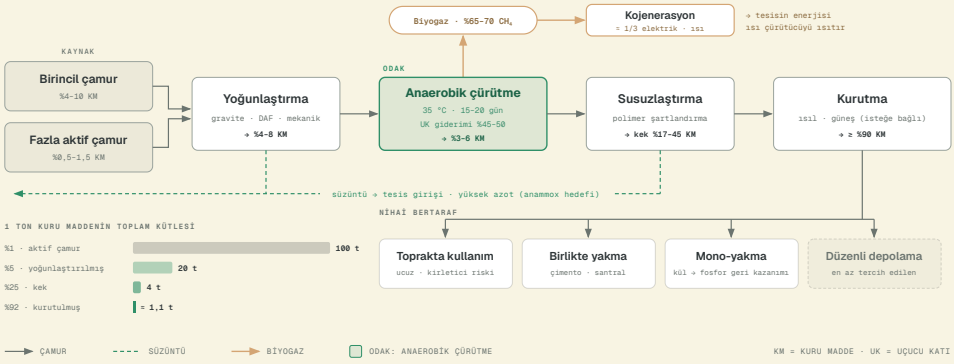
Çamurun asıl sorunu kütlesi değil, hacmidir. Birincil çamur tipik olarak **%4 ile 10** kuru madde içerirken, son çökeltimden alınan aktif çamurun kuru maddesi yalnızca **%0,5 ile 1,5**'tir. Yani yüzde bir kuru maddeli bir aktif çamurun her tonunun 990 kilogramı sudur. Çamur arıtımının bütün mantığı, bu suyu kademeli olarak uzaklaştırmak ve kalan organik maddeyi stabilize etmektir.

Türkiye'de bu akımın ulusal büyüklüğü TÜİK verileriyle izlenir: belediye arıtma tesislerinde 2022'de **348 bin ton**, 2024'te **353 bin ton** (kuru madde) çamur oluştu. Eurostat'a TÜİK tarafından bildirilen verilere göre bu, kişi başı yılda yaklaşık **4,1 kg** kuru madde demektir. Belediye dışı (organize sanayi bölgesi ve sanayi) arıtma tesislerinin çamuru ise 2024'te **837 bin ton** ile kentsel çamurun yaklaşık 2,4 katıdır. Bu farkın nedenleri istatistikte ayrışmaz.

ŞEKİL 3.7

Çamur Hattı: Sudan Kurtulmanın Kademeleri

Her kademe kuru madde oranını yükseltir; anaerobik çürütme aynı anda organik maddeyi azaltır ve biyogaz üretir. Ayrılan su tesisin girişine döner.



Değerler tipik aralıklardır. Kaynak: Teknik Usuller Tebliği; EPA Biosolids Technology Fact Sheets (2000); DEÜ/Çevre Bakanlığı teknik doküman serisi. Kek kuru maddesi ekipmana göre değişir (dekantör santrifüjde %17-24, kireç ve demirle şartlandırılmış plakalı filtrede %35-45).

Yoğunlaştırma: suyun ilk yarısını almak

Çamur hattının ilk kademesi **yoğunlaştırmadır**. Amaç, sonraki kademelerin (çürütücü, susuzlaştırma) boyutunu küçültmek için kuru madde oranını birkaç katına çıkarmaktır. Kütle dengesi, yoğunlaştırmanın etkisini çarpıcı biçimde gösterir.

DENKLEM 3.5 · YOĞUNLAŞTIRMADA HACİM VE KATI İLİŞKİSİ · ÇAMUR KÜTLE DENGESİ

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot S_1}{S_2} \tag{3.5}$$

BURADA

- V_1 başlangıç çamur hacmi (m^3)
- V_2 yoğunlaştırılmış hacim (m^3)
- S_1 başlangıç katı oranı (%)
- S_2 son katı oranı (%)

Katı kütlesi korunur, su azalır. Nem oranıyla ($P = 100 - S$) eşdeğer yazım: $V_2 = V_1 \cdot (100 - P_1) / (100 - P_2)$. Kuru maddeyi %3'ten %6'ya çıkarmak hacmi yarıya indirir; %1 katılı 100 m^3 aktif çamur %4'e yoğunlaştırılınca 25 m^3 kalır.

EPA'nın gravite yoğunlaştırma bilgi notundaki ifadeyle, sıvı çamurun kuru maddesini %3'ten %6'ya çıkarmak hacmi **%50** azaltır. Yöntemler çamurun türüne göre seçilir:

- **Gravite yoğunlaştırıcı:** Birincil çamur için idealdir; kuru maddeyi **%2-7**'den **%5-10**'a çıkarır, bekleme süresi **24 ile 48 saattir**. Metcalf & Eddy'nin tablolarına göre birincil çamur için katı yükü **98 ile 146 kg/m²·gün** aralığındadır. Aktif çamur ise geniş özgül yüzeyi nedeniyle yavaş çöker ve sıkışmaya direnir; gravite tek başına onu yalnızca **%2-3**'e çıkarabilir.
- **Çözünmüş hava flotasyonu (DAF):** Birinci bölümde atıksu için anlatılan yöntemin çamura uygulanmasıdır; aktif çamuru küçük hava kabarcıklarıyla yüzeye taşıyarak **%3,5 ile 5** kuru maddeye çıkarır.
- **Mekanik yoğunlaştırıcılar:** Santrifüj, graviteli bant ve döner elekli yoğunlaştırıcılar aktif çamuru polimer yardımıyla **%4 ile 8** kuru maddeye çıkarır. Yüzde 0,8 kuru maddeli bir fazla çamuru %4'e yoğunlaştırmak, hacmi beş kat azaltır.

Stabilizasyon: anaerobik çürütme ve biyogaz

Yoğunlaştırılmış çamur hâlâ çürümeye hazır, kokulu ve patojen yüklü bir organik maddedir. **Stabilizasyon**, çamurun ayrışabilir organik kısmını azaltarak bu sorunları gideren kademedir. Orta ve büyük tesislerin tercihi olan **anaerobik çürütme**, aynı zamanda çamuru bir enerji kaynağına dönüştürür.

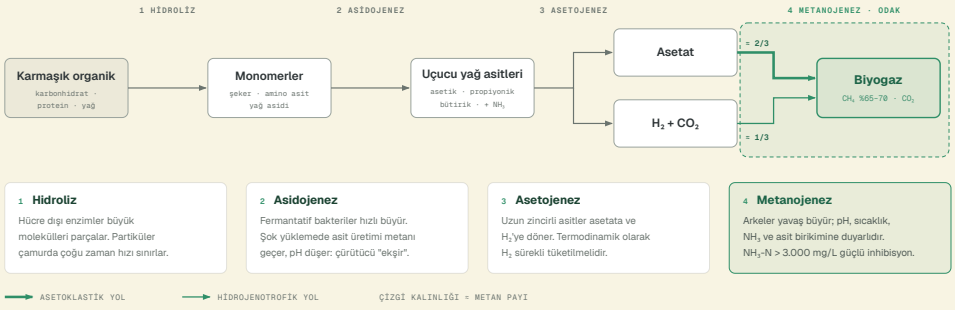
İkinci bölümde anaerobik koşulun, oksijen ve nitratın hiç bulunmadığı rejim olduğu tanımlanmıştı. Anaerobik çürütme, bu rejimde çalışan dört mikroorganizma grubunun bir üretim bandı gibi art arda çalışmasıdır:

1. **Hidroliz:** Hücre dışı enzimler, karbonhidrat, protein ve yağ gibi büyük molekülleri şekerlere, amino asitlere ve yağ asitlerine parçalar. Çamurda partiküler madde baskın olduğu için çoğu zaman sürecin hızını sınırlayan adım budur.
2. **Asidojenez:** Fermantatif bakteriler bu ürünleri uçucu yağ asitlerine (asetik, propiyonik ve bütirik asit) dönüştürür. Proteinlerin parçalanması amonyak da üretir.
3. **Asetojenez:** Daha uzun zincirli yağ asitleri asetata, hidrojene ve karbondioksite dönüşür. Bu adımın termodinamik olarak ilerleyebilmesi için ortamdaki hidrojenin sürekli tüketilmesi gerekir.
4. **Metanojenez:** Zorunlu anaerobik arkeler metan üretir. Metanın yaklaşık **üçte ikisi** asetatın parçalanmasıyla (asetoklastik yol), **üçte biri** hidrojen ve karbondioksitten (hidrojenotrofik yol) oluşur.

ŞEKİL 3.8

Anaerobik Çürütmenin Dört Aşaması

Dört mikroorganizma grubu bir üretim bandı gibi art arda çalışır: her grubun ürünü bir sonrakinin besinidir. Bandın en yavaş ve en hassas halkası metanojenlerdir.



Metan payları ve inhibisyon eşiği: EPA anaerobik çürütme kaynakları (toplam amonyak azotu 1.500-3.000 mg/L arasında orta, 3.000 mg/L üzerinde güçlü inhibisyon). Mezofilik çürütme yaklaşık 35 °C'de, termofilik çürütme 50-57 °C'de çalışır.

Bu zincirin en hassas halkası metanojenlerdir: yavaş büyür, pH ve sıcaklık değişimlerine, amonyağa ve uçucu yağ asidi birikimine duyarlıdırlar. Asidojenler hızlı büyüdüğü için bir şok yüklemede asit üretimi metan üretimini geçebilir; pH düşer ve çürütücü "ekşir". EPA'nın inhibisyon tablosuna göre toplam amonyak azotu **1.500 ile 3.000 mg/L** arasında orta, **3.000 mg/L**'nin üzerinde güçlü inhibisyon yaratır.

İşletmenin iki ana değişkeni sıcaklık ve çamur bekleme süresidir. **Mezofilik** çürütme yaklaşık **35 °C**'de (30 ile 38 °C aralığı), **termofilik** çürütme **50 ile 57 °C**'de çalışır; termofilik rejimde reaksiyonlar ve patojen giderimi hızlanır, ama enerji ihtiyacı ve kararsızlık riski artar. Türkiye'de Teknik Usuller Tebliği, yüksek hızlı mezofilik çürütücü için **15 ile 20 gün** katı bekleme süresi ve **1,6 ile 4,8 kg uçucu katı/m³·gün** yükleme önerir;

35 °C'de çürütücünün yıkanmaya uğramaması için gereken asgari süre 4, tasarım değeri **10 gündür**. ABD mevzuatı patojen azaltımı için **35 ile 55 °C**'de en az **15 gün** bekleme ister ve çamurun böcek ve kemirgenleri çekmemesi için uçucu katı kütlesinin en az **%38** azaltılmasını şart koşar.



Fotoğraf: Kristian Bjornard from Baltimore, Maryland / Wikimedia Commons (CC BY-SA 2.0)

Biyogaz ürünü, çamur içindeki organik maddenin kimyasal oksijen ihtiyacı üzerinden hesaplanabilir. Bir gram metan dört gram KOİ'ye eşdeğer olduğu için, giderilen her kilogram KOİ standart koşullarda (0 °C, 1 atm) **0,35 m³**, 35 °C'de yaklaşık **0,40 m³** metan üretir. Teknik Usuller Tebliği'ne göre tek kademeli mezofilik çürütmede uçucu katı giderimi **%45 ile 50**, biyogazın metan oranı **%65 ile 70**, gaz üretimi giderilen her kilogram uçucu katı başına **0,75 ile 1,12 m³**'tür; aynı tebliğ kişi başı üretimi yaklaşık **1.000 kişi başına günde 28 m³** olarak verir. Biyogazın ısıl değeri metan oranına bağlı olarak metreküp başına yaklaşık **6 ile 7 kWh**'tir; birleşik ısı ve güç (kojenerasyon) motorlarında bunun yaklaşık üçte biri elektriğe, önemli bir kısmı da çürütücüyü ısıtmakta kullanılan ısıya dönüşür.

ÖRNEK 3.3 anaerobik çürütme ve biyogaz

100.000 NE'lik bir tesisin biyogaz ve elektrik potansiyeli

VERİLENLER 100.000 NE ham çamur 114 g KM/NE·gün (birincil 72 + fazla aktif 42)
uçucu katı oranı 0,70 uçucu katı giderimi %50
gaz verimi 0,9 m^3/kg giderilen uçucu katı (Teknik Usuller Tebliği: 0,75-1,12)
metan oranı %65 kojenerasyon 4 kWh elektrik / m^3 CH_4
tesis tüketimi 30,8 kWh/NE·yıl (Almanya ortalaması, DWA 2022)

1. Ham çamur: 100.000 × 0,114 = **11.400 kg KM/gün**

2. Uçucu katı: 11.400 × 0,70 = **7.980 kg/gün**

3. Giderilen uçucu katı: 7.980 × 0,50 = **3.990 kg/gün**

4. Biyogaz: 3.990 × 0,9 ≈ **3.590 m^3/gün**

5. Metan: 3.590 × 0,65 ≈ **2.334 m^3 CH_4/gün**

6. Elektrik: 2.334 × 4 ≈ **9.340 kWh/gün** ≈ 3,4 GWh/yıl (ortalama ≈ 390 kW)

7. Tesis ihtiyacı: 100.000 × 30,8 = 3,08 GWh/yıl → biyogaz elektriği ihtiyacın **≈ %110**'u (üst sınır)

SONUÇ
≈ 3.600 m^3 biyogaz/gün · ≈ 9.300 kWh elektrik/gün · ihtiyacın ≈ %110'u (üst sınır)

YORUM *Çapraz kontrol: Viyana'nın ölçülmüş KOİ dengesiyle (NE başına günde 39 g KOİ metana, 0,35 m^3 CH_4/kg KOİ) üretim 1.365 m^3 CH_4/gün ve ≈ 5.460 kWh/gün (ihtiyacın ≈ %65'i); Tebliğ'in 1.000 kişi başına günde 28 m^3 biyogaz değeriyle ≈ 7.300 kWh/gün (≈ %86). Gerçekçi bant %50-90'dır; %100'ün üstü ancak verimli havalandırma ve yan akım deamonifikasyonuyla aşılır.*

UZMAN NOTU

Biyogaz hesabı, kullanılan yönteme şaşırtıcı ölçüde duyarlıdır. Çamur kütlesine ve ders kitabı gaz verimine dayanan klasik hesap, Avrupa'da ölçülen KOİ dengesine göre **1,7 ile 2,6 kat** daha fazla metan öngörebilir. Viyana Ana Arıtma Tesisi'nin ölçülmüş verileri, giriş KOİ'sinin nüfus eşdeğeri başına günde yalnızca **39 gramının** (tek kademeli aktif çamurda) metana gittiğini gösteriyor. Bir yatırım fizibilitesinde iyimser hesap, hayal kırıklığı yaratan bir enerji dengesine yol açar; bu yüzden tasarımda en az iki bağımsız yöntemle çapraz kontrol yapılmalıdır.

Enerjisini kendisi üreten tesisler

Biyogaz, bir arıtma tesisinin enerji tüketimini önemli ölçüde karşılayabilir. Almanya'da 5.000'i aşkın tesisin 2022 ortalaması nüfus eşdeğeri başına yılda **30,8 kWh** elektrik tüketimidir. Ölçülmüş örneklere ve hesaplara göre anaerobik çürütmeli tesislerde biyogaz bu ihtiyacın çoğunlukla yarısından fazlasını karşılar; tamamını aşmak ise ancak enerji verimli havalandırma, çamur suyunda yan akım deamonifikasyonu (ikinci bölümde anlatılan anammox süreci) ve verimli kojenerasyonun birlikte uygulanmasıyla mümkündür.

Bu birleşimin en çok bilinen örnekleri Avrupa'dadır. Avusturya'daki **Strass im Zillertal** tesisi (200.000 NE), dışarıdan substrat eklemeden yılda tükettiğinden yaklaşık **%8 fazla** enerji üretir. Danimarka'daki **Marselisborg** tesisi (Aarhus, 200.000 NE), tükettiğinin yaklaşık **%150'si** kadar enerji üretir ve fazlasını elektrik şebekesine ve bölgesel ısıtmaya verir. Dört milyon nüfus eşdeğerlik **Viyana Ana Arıtma Tesisi** ise 2020'de tamamlanan yükseltmeyle ihtiyacının **%100'ünden fazlasını** biyogazdan karşılamaya başladı. AB'nin 2024 direktifi bu örnekleri bir hedefe dönüştürdü: 10.000 NE üzerindeki tesislerin ulusal toplamda 2045'e kadar enerji nötr olması isteniyor.

Aerobik çürütme ve kireç stabilizasyonu

Küçük tesislerde anaerobik çürütmenin yatırımı ve işletme karmaşıklığı ekonomik değildir. Bu tesislerde **aerobik çürütme** tercih edilir: çamur havalandırılarak mikroorganizmaların kendi hücre maddelerini enerji için tükettiği içsel solunum evresine sokulur; ikinci bölümdeki uzun havalandırmanın çamura uygulanmış hâli olarak düşünülebilir. Teknik Usuller Tebliği iyi patojen giderimi için **20 °C'de 40 gün, 15 °C'de 60 gün** bekleme süresi önerir ve uçucu katı giderimini **%38 ile 50** olarak verir. İşletmesi basittir ama havalandırma enerjisi yüksektir ve biyogaz üretmez. **Kireç stabilizasyonunda** ise çamurun pH'ı kireçle 12'nin üzerine çıkarılarak mikroorganizmalar etkisiz bırakılır; ABD mevzuatı patojen azaltımı için pH'ın iki saatlik temasın ardından 12'ye ulaşmasını ister. Yöntem ucuz ve hızlıdır ama çamur kütlesini artırır.

Şartlandırma ve susuzlaştırma

Çürütülmüş çamur hâlâ yüzde 3 ile 6 kuru maddeli bir sıvıdır. **Susuzlaştırma**, onu kürekle taşınabilen bir keke dönüştürür. Çamurdaki su, parçacıklara farklı güçlerle bağlıdır ve mekanik yöntemler bu suyun ancak bir kısmını alabilir; ayrımı kolaylaştırmak için önce **şartlandırma** yapılır, yani polimer veya demir tuzları ve kireç gibi kimyasallarla floklar güçlendirilir.

Başlıca susuzlaştırma ekipmanları ve tipik sonuçları şunlardır:

TABLO 3.4

Ekipman	Anaerobik çürütülmüş karışık çamurda kek kuru maddesi	Polimer (kg/ton KM)
Bant filtre pres	%18–44	2–8
Dekantör santrifüj	%17–24	3–8
Plakalı (pres) filtre	kireç ve demir şartlandırmasıyla %35–45	(kimyasal şartlandırma)
Vidalı pres	%24–30	(değişken)

Kaynak: EPA Biosolids Technology Fact Sheets (2000); DEÜ/Çevre Bakanlığı teknik doküman serisi (Metcalf & Eddy 1991 aktarımı).

Susuzlaştırmanın etkisi yine kütle dengesiyle görülür: günde 13 ton kuru madde taşıyan, %4 kuru maddeli 323 m^3'lük çürütülmüş çamur, %95 katı tutma verimiyle %27 kuru maddeli keke susuzlaştırıldığında hacim günde yaklaşık **43 m^3**'e iner. Ayrılan **süzüntü suyu** ise tesisin girişine geri döner ve azot yükü yüksek olduğu için ihmal edilemez: çürütülmüş çamurun süzüntüsü, tesisin toplam azot yükünün önemli bir bölümünü taşıyabilir. Anammox gibi yan akım arıtmalarının hedefi tam olarak bu sudur.

Kurutma, yakma ve nihai bertaraf

Susuzlaştırılmış kek hâlâ yüzde 70'ten fazla su içerir. Bunun ötesine geçmenin yolu **ısıl kurutmadır**: EPA'ya göre ısıl kurutucular buharlaştırılan her ton su için yaklaşık **905 ile 1.100 kWh** ısı harcar ve en az **%90** kuru maddeli, granül veya pelet hâlinde bir ürün üretir. Türkiye'de Teknik Usuller Tebliği de termal kurutmanın **%90 ile 92** kuru katılı, kokusuz ve stabilize bir ürün verdiğini belirtir. Enerji ihtiyacını azaltmanın bir yolu güneş enerjisidir: İtalya'da zorlamalı havalandırmalı bir güneş serasıyla yapılan pilot çalışmada buharlaştırılan ton su başına yaklaşık **450 kWh** harcandı, yani konvansiyonel ısıl kurutmanın yarısından az.

Kurutulmuş ya da yalnızca susuzlaştırılmış çamurun nihai bertarafı için dört ana yol vardır:

- **Toprakta kullanım:** Stabilize çamur organik madde, azot ve fosfor içerdiği için tarımda gübre ve toprak iyileştirici olarak kullanılabilir. Bu, en ucuz ve besin döngüsü açısından en mantıklı yoldur; ancak çamurdaki ağır metaller, kalıcı organik kirleticiler ve son yıllarda PFAS ve mikroplastikler nedeniyle giderek daha sıkı kısıtlanmaktadır.
- **Birlikte yakma:** Kurutulmuş çamur, enerji değeri linyite yakın bir yakıttır ve çimento fırınlarında, kömür santrallerinde ya da evsel atık yakma tesislerinde ek yakıt olarak kullanılabilir. Çimento fırınında çamurun külü klinkere bağlanır; bu bir bertaraf avantajıdır ama fosforun geri kazanılmasını imkânsız kılar.
- **Mono-yakma:** Çamur yalnızca kendisi için tasarlanmış (genellikle akışkan yataklı) tesislerde yakılır. Ön kurutmayla çamurun alt ısıl değeri kilogram başına yaklaşık **4,5 MJ**'ye ulaştığında yanma ek yakıt gerektirmeden kendini sürdürür. Oluşan kül fosforca zengindir ve fosfor geri kazanımının en uygun hammaddesidir.
- **Düzenli depolama:** En az tercih edilen yoldur; organik madde içeren çamurun depolanması metan emisyonu ve sızıntı suyu sorunları yaratır ve birçok ülkede yasaklanmış ya da kısıtlanmıştır.

Avrupa'daki eğilim açıkça yakmaya doğrudur. Almanya'da 2024'te bertaraf edilen **1,67 milyon ton** çamurun **%82'si** yakıldı; mono-yakmanın payı **%44**'e yükselirken

tarımda kullanılan pay **%12**'ye geriledi. İsviçre ise çamurun tarımda kullanımını **2006'dan beri** tamamen yasaklamıştır.

Kaynak olarak çamur: fosfor geri kazanımı

Fosfor, tarım için ikamesi olmayan, rezervleri birkaç ülkede yoğunlaşmış sınırlı bir hammaddedir; AB onu kritik hammaddeler listesine almıştır. Kentsel atıksuya giren fosforun büyük bölümü ise arıtma sonunda çamurda toplanır. Almanya Federal Çevre Ajansı'nın (UBA) 2025 tarihli raporuna göre çürütülmüş çamur ortalama **%3,7** fosfor (kuru madde) içerir; mono-yakma külünde bu oran yaklaşık **%7,3**'e çıkar. Geri kazanım potansiyeli kaynağa göre değişir: çamur suyundan struvit (magnezyum amonyum fosfat) çöktürmeyle pratikte en fazla yaklaşık **%30**, çürütülmüş çamurdan asitle **%70**'e kadar, yakma külünden ise **%90**'a kadar.

Almanya, bu potansiyeli bir yükümlülüğe dönüştüren ilk büyük ülkedir. 2017'de yenilenen Arıtma Çamuru Yönetmeliği'ne (AbfKlärV) göre kuru maddesinde kilogram başına **20 g**'dan fazla fosfor bulunan çamurlardan **1 Ocak 2029**'dan itibaren fosfor geri kazanılması zorunludur; külden geri kazanımda oran en az **%80** olmalıdır. Aynı yönetmelik çamurun toprakta kullanımını **100.000 NE**'nin üzerindeki tesislerde **2029**'dan, **50.000 NE**'nin üzerindekilerde **2032**'den itibaren yasaklar. İsviçre de benzer bir yükümlülüğü 2026'da başlatmayı planlamış, ancak hedef tutturulamayınca 2025 sonbaharında yöntemi değiştirmiştir: kantonlar 2028'e kadar plan sunacak ve ton kuru çamur başına en az **16 kg** fosfor geri kazanılacak. AB'nin 2024 direktifi de Komisyon'a, çamurdan ve atıksudan fosfor için asgari geri kazanım oranını **2 Ocak 2028**'e kadar belirleme görevi vermiştir.

Yeni riskler: PFAS ve mikroplastikler

Çamurun toprakta kullanımı tartışmasını son yıllarda yeniden alevlendiren iki kirletici grubu vardır. Birincisi **PFAS**'tır. EPA'nın 2025 tarihli bilgi notunda vurgulandığı gibi konvansiyonel arıtma PFOA ve PFOS'u ne giderir ne de parçalar; bu maddeler tipik olarak çamurda birikir. EPA'nın Ocak 2025'teki taslak risk değerlendirmesi, **1 ppb** PFOA veya PFOS içeren çamurun araziye uygulanmasının bazı senaryolarda insan sağlığı riskini kabul edilebilir eşiklerin üstüne çıkarabileceğini öne sürmüş; ancak Haziran 2026'da yayımlanan taslak kılavuz bu değerlendirmeyi metodolojik olarak eleştirip gönüllü önerilerle yetinmiştir. ABD'de federal bir sınır olmadığı için eyaletler ayrışıyor: Maine 2022'de çamurun araziye uygulanmasını tamamen yasakladı, Michigan PFOS için **100 ppb**, Virginia **50 ppb** eşiği getirdi.

İkincisi **mikroplastiklerdir**. 2020 tarihli kapsamlı bir derlemeye göre ikincil arıtma tesisleri mikroplastiklerin ortalama yaklaşık **%88**'ini, üçüncül tesisler **%94**'ünü sudan giderir. Ne var ki bu "giderim", mikroplastiklerin büyük bölümünün çamura geçmesi demektir; çamur tarlaya serildiğinde mikroplastikler sucul ortam yerine karasal

ortama taşınmış olur. AB'nin 2024 direktifi, 10.000 NE üzerindeki tesislerde özellikle tarımda kullanılan çamurdaki mikroplastiklerin izlenmesini şart koşmuştur. Arıtma çamurunun toprak kirliliği[7] ile ilişkisi bu yüzden artık yalnızca ağır metallerle sınırlı bir konu değildir.

KİLİT MESAJ

Çamur, arıtmanın yan ürünü değil ikinci ürünüdür: suyun içinden alınan kirliliğin toplandığı yerdir. Yoğunlaştırma ve susuzlaştırma hacmi onlarca kat azaltır, anaerobik çürütme organik maddeyi stabilize ederken tesisin enerjisinin büyük kısmını karşılayabilecek biyogaz üretir. Avrupa'daki yön açıktır: çamuru tarlaya vermekten yakmaya ve külden fosfor geri kazanmaya doğru bir dönüşüm.

3.9 Su Geri Kazanımı ve Yeniden Kullanım

Su stresi yaşayan bir ülkede arıtılmış atıksu, bir atık değil, kuraklıkta bile kesilmeyen bir su kaynağıdır. Bir kentin atıksu debisi, yağış rejiminden bağımsız olarak yıl boyunca neredeyse sabittir. İleri arıtmanın son on yıllardaki en büyük dönüşümü, deşarj kalitesini sağlamaktan bu kaynağı yeniden kullanılabilir hâle getirmeye kaymasıdır.

Kullanım türleri ve kalite basamakları

Arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımı, gerekli kaliteye göre bir merdiven gibi düşünülebilir. En alt basamakta sanayide soğutma suyu ve gıda dışı tarımsal ürünlerin sulaması bulunur. Ortada park, yeşil alan ve golf sahası sulaması, yangın suyu ve tuvalet sifonları gelir. Üst basamaklarda çiğ tüketilen sebzelerin sulaması, yeraltı suyu besleme ve sonunda içme suyu kaynağına katkı yer alır. Her basamak, arıtma zincirine bir kademe daha ekler.

Avrupa Birliği'nde tarımsal sulama için bu merdiven, **26 Haziran 2023**'ten beri uygulanan Suyun Yeniden Kullanımı için Asgari Gereksinimler Tüzüğü (EU) 2020/741[8] ile tanımlanır:

7. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/toprak-kirliligi-nedir-nedenleri-etkileri-cozum-yollari
8. Kaynak: eur-lex.europa.eu

TABLO 3.5

Sınıf	Kullanım	Gösterge arıtma	E. coli (/100 mL)	$BOİ_5$ (mg/L)	AKM (mg/L)	Bulanıklık (NTU)
A	Çiğ tüketilen, yenen kısmı suyla temas eden gıda bitkileri; tüm yöntemler	İkincil + filtrasyon + dezenfeksiyon	≤10	≤10	≤10	≤5
B	Yenen kısmı suyla temas etmeyen gıda, işlenmiş gıda, yem bitkileri	İkincil + dezenfeksiyon	≤100	Direktif sınırı	Direktif sınırı	–
C	B ile aynı ürünler, yalnız damla sulama	İkincil + dezenfeksiyon	≤1.000	Direktif sınırı	Direktif sınırı	–
D	Endüstriyel, enerji ve tohumluk bitkiler	İkincil + dezenfeksiyon	≤10.000	Direktif sınırı	Direktif sınırı	–

Kaynak: Tüzük (EU) 2020/741, Ek I Tablo 2. Not: B, C ve D sınıflarında $BOİ_5$ ve AKM için kentsel atıksu direktifinin ikincil arıtma sınırları uygulanır.

Tüzük yalnızca çıkış kalitesine bakmaz. A sınıfında arıtma zincirinin bir kez **doğrulanması** istenir: E. coli'de en az **5 log**, kolifajlarda **6 log**, Clostridium perfringens sporlarında **4 log** giderim kanıtlanmalıdır. Ayrıca tesis işletmecisi, diğer sorumlu taraflar ve son kullanıcılarla birlikte bir **Su Yeniden Kullanım Risk Yönetim Planı** hazırlamak zorundadır. Bu, yeniden kullanımın bir mühendislik sorunu olduğu kadar bir risk yönetimi sorunu olduğunun da kabulüdür.

Dünyadan örnekler

Yeniden kullanımın sınırlarını zorlayan örnekler, farklı coğrafyalarda farklı ihtiyaçlardan doğmuştur:

- **Windhoek, Namibya:** Dünyanın ilk **doğrudan** içme suyu geri kazanım tesisi, Goreangab, **1968**'de devreye alındı. 2002'de açılan yeni tesis günde **21.000 m^3** su üretir; ön ozonlama, toz aktif karbon, koagülasyon, çözünmüş hava flotasyonu, çift ortamlı filtrasyon, ana ozonlama, biyolojik ve granüler aktif karbon ile ultrafiltrasyondan oluşan çok bariyerli bir zincir kullanır. Nisan 2026 tarihli yerel basına göre kentin su arzının yaklaşık **%20**'si geri kazanılmış sudur.
- **Orange County, ABD:** Dünyanın en büyük dolaylı içme suyu geri kazanım tesisi olan GWRS, Nisan 2023'teki genişlemeyle günde **130 milyon galon** (yaklaşık **492.000 m^3**) kapasiteye ulaştı. Mikrofiltrasyon (son genişlemede ultrafiltrasyon), ters ozmoz ve UV ile hidrojen peroksitten oluşan zincirden çıkan su, yeraltı su havzasını besler ve yaklaşık bir milyon kişiye yetecek suyu sağlar.

- **Singapur:** NEWater adıyla üretilen geri kazanılmış su mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon, ters ozmoz ve UV dezenfeksiyondan geçer; ağırlıkla yarı iletken sanayiinde kullanılır, kurak dönemlerde ise rezervuarlara eklenerek içme suyuna dolaylı katkı yapar. 2024'te ilk tesislerden Bedok kapanırken, yeni tesislerle kapasitenin artırılması planlanıyor.
- **İsrail:** Arıtılmış atıksuyun tarımda yeniden kullanımında dünya birincisidir; İsrail Devlet Denetçisi'nin 2024 raporuna göre oran **%80**'in üzerindedir. Aynı rapor, büyük tesislerin önemli bir kısmının hâlâ kısıtsız sulamaya uygun üçüncül seviyede arıtma yapmadığını da belgeleyerek oranın tek başına kaliteyi garanti etmediğini hatırlatır.
- **İspanya:** Avrupa'nın en büyük yeniden kullanıcıları arasındadır; yılda yaklaşık **400 milyon m³** geri kazanılmış su kullanır ve Ekim 2024'te yürürlüğe giren yeni kraliyet kararnamesiyle bu miktarı ikiye katlamayı hedefler.

> **UZMAN NOTU**
>
> İçme suyu amaçlı geri kazanımın asıl zorluğu teknoloji değil, güvencedir. Bir ters ozmoz membranı virüsleri fiziksel olarak durdurur, ama tek bir contanın sızdırması bu bariyeri anında devre dışı bırakabilir. Bu yüzden WHO'nun içme amaçlı yeniden kullanım rehberi çoklu bariyer yaklaşımını esas alır; Kaliforniya mevzuatı ise log giderim kredilerini proseslere ayrı ayrı dağıtır, her bariyerin sürekli izlenmesini ister ve tek bir prosese en fazla 6 log kredi tanır. Çoklu bariyer ilkesi, bir bariyer başarısız olduğunda diğerlerinin halk sağlığını korumaya devam edebilmesi için vardır.

KİLİT MESAJ

Arıtılmış atıksu, kuraklıktan etkilenmeyen bir su kaynağıdır. Kalite merdiveni, sanayi ve tarımdan içme suyuna kadar uzanır; basamak yükseldikçe zincire filtrasyon, membran, ters ozmoz ve ileri oksidasyon eklenir ve risk yönetimi teknoloji kadar önem kazanır.

3.10 Türkiye'de Uygulama: Çamur, Dezenfeksiyon ve Yeniden Kullanım

Sayılar ne söylüyor?

TÜİK'in 2024 Su ve Atıksu İstatistikleri'ne göre Türkiye'de kanalizasyonla toplanan **5,8 milyar m³** atıksuyun **4,9 milyar m³**'ü arıtıldı. Arıtılan hacmin **%53,8**'i gelişmiş (ileri) arıtma, **%24,5**'i biyolojik, **%21,4**'ü fiziksel ve **%0,3**'ü doğal arıtma tesislerinden geçti. Tesis sayısı açısından tablo farklıdır: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın Çevresel Göstergeler[9] yayınına göre 2022 sonunda faaliyette olan **1.315** belediye arıtma tesisinin yalnızca **%20**'si gelişmiş, **%51**'i biyolojik tesistir. Bu iki istat-

9. Kaynak: cevreselgostergeler.csb.gov.tr

istik birlikte okunduğunda, büyük kentlerin az sayıda ama yüksek kapasiteli ileri biyolojik tesisle atıksuyun yarısından fazlasını ileri seviyede arıttığı, çok sayıda küçük belediyenin ise ikincil seviyede kaldığı görülür.

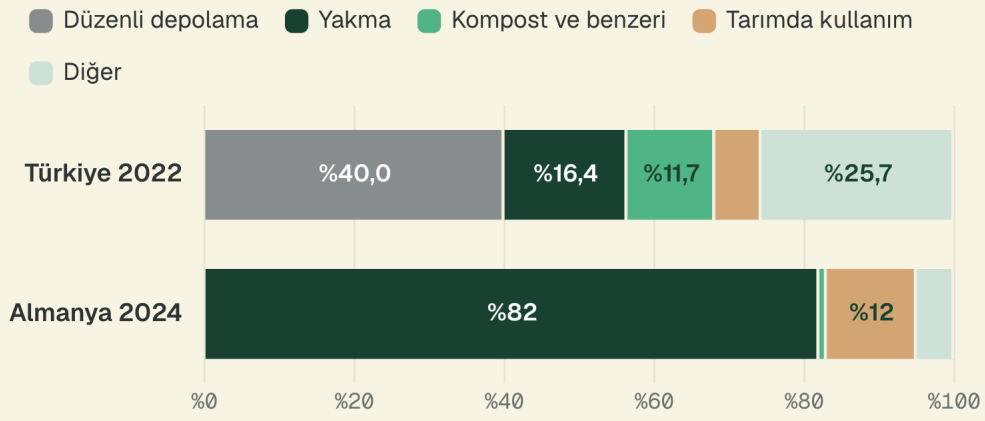
Arıtılmış suyun deşarj edildiği ortamların dağılımı da tasarım önceliklerini açıklar: akarsulara **%48,5**, denizlere **%37,9**. Deniz deşarjının bu kadar yüksek payı, Türkiye'de dezenfeksiyon ve derin deniz deşarjı hükümlerinin önemini artırır; deniz kirliliği[10] ile kentsel atıksu arasındaki bağ, en çarpıcı biçimde 2021'de Marmara'da yaşanan müsilaj krizinde görülmüştür. Krizin ardından ilan edilen 6 Haziran 2021 tarihli Marmara Denizi Eylem Planı ve Bakanlığın aynı ay yayımladığı deşarj genelgesi, bölgedeki tesislerin ileri biyolojik arıtmaya geçirilmesini öncelik hâline getirdi. Bölgenin uzun vadeli yönetimi ise ayrıca kapsamlı bir çevre yönetim planıyla[11] ele alınmaktadır.

Çamur tarafında Eurostat'a TÜİK tarafından bildirilen 2022 verilerine göre bertaraf edilen kentsel çamurun **%40**'ı düzenli depolanmış, **%16,4**'ü yakılmış, **%11,7**'si kompost ve benzeri uygulamalarda, **%6,2**'si tarımda kullanılmış, **%25,7**'si "diğer" yöntemlerle bertaraf edilmişti.

ŞEKİL 3.9

Arıtma Çamuru Nereye Gidiyor?

Kentsel arıtma çamurunun bertaraf yollarına dağılımı (%)



Almanya'da "kompost ve benzeri" peyzaj kullanımını, "diğer" kalan payı gösterir (türetilmiş).
Kaynak: Eurostat env_ww_spd (TÜİK beyanı, Türkiye); Destatis (2025, Almanya 2024).

10. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/deniz-kirliligi-nedir-nedenleri-ve-etkileri
11. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/marmara-denizi-cevre-yonetim-plani

Çamurun toprakta kullanımı

Türkiye'de arıtma çamurunun tarımda kullanımı, 2010'dan bu yana hiç değişmeyen Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik[12] ile düzenlenir. Yönetmeliğin temel hükümleri şunlardır:

- **Ham çamurun toprakta kullanılması yasaktır;** yalnızca biyolojik, kimyasal ya da ısıl işlemden geçmiş stabilize çamur kullanılabilir.
- Çamurdaki ağır metaller için üst sınırlar, kilogram kuru madde başına **kadmiyumda 10 mg, cıvada 10 mg, kurşunda 750 mg, krom ve bakırda 1.000 mg, çinkoda 2.500 mg**'dır. Bu değerler AB'nin 1986 tarihli çamur direktifinin aralıklarının alt ucunda ya da altındadır (AB'de kadmiyum 20 ile 40, cıva 16 ile 25 mg/kg); üstelik Türk yönetmeliği, AB direktifinde bulunmayan organik kirletici ve dioksin sınırları da içerir.
- Patojenler için tek şart, stabilizasyonla **E. coli'nin en az 2 log** (%99) azaltılmasıdır.
- Çamur; çiğ yenen sebzelerin yetiştirildiği topraklarda, pH'ı 6'nın altındaki, kumlu ya da eğimi %12'yi aşan arazilerde, su kaynaklarına **300 m**'den yakın alanlarda kullanılamaz.
- Kapasitesi **1 milyon** nüfus eşdeğerinin üzerindeki tesislerde çamurun en az **%90 kuru maddeye** kadar kurutulması esastır.
- Kullanım izne tabidir; il müdürlüğü başkanlığında tarım, sağlık ve DSİ temsilcilerinden oluşan komisyonun uygun görüşüyle **3 yıllık** izin belgesi verilir.

Depolama, yakma ve ek yakıt

Atık Yönetimi Yönetmeliği[13], kentsel atıksu arıtma çamurunu **19 08 05** koduyla tehlikesiz atık olarak sınıflandırır ve bu çamuru yenilenebilir enerji mevzuatı bakımından biyokütle kapsamında sayar; çamurdan biyogazla elektrik üretimi bu yüzden yenilenebilir enerji destek mekanizmasından yararlanabilir. Çamurun depolanmasında önemli bir eşik geride kaldı: Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik[14], en az **%50 kuru maddeli** arıtma çamurunun ayrı lotta depolanmasında çözünmüş organik karbon sınırını aramayan ve toplam organik karbonu yüksek bir değerle kabul eden geçici bir istisna tanıyordu; bu istisnanın süresi **1 Ocak 2025**'te doldu ve uzatılmadı.

Çamurun yakıt olarak kullanımında ise Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği, çamurun en fazla **%50 nemle** kurutulmuş olarak tesise gelmesini ya da tesiste bir kurutma ünitesi bulunmasını şart koşar. Büyük kentlerin tesisleri bu yolu seçmiştir. İSKİ'nin günde **650.000 m³** kapasiteli Tuzla İleri Biyolojik Arıtma Tesisi'nde kojenerasyon motorlarının atık ısısıyla üretilen buharla çamur kurutulur ve

12. Kaynak: mevzuat.gov.tr
13. Kaynak: mevzuat.gov.tr
14. Kaynak: mevzuat.gov.tr

kurutulmuş çamur çimento fabrikalarında ek yakıt olarak kullanılır. İZSU'nun Çiğli'deki çamur kurutma tesisi, tasarım değerlerine göre yüzde 25 kuru maddeli çamuru yüzde 92 kuru maddeye kurutarak günlük **800 tonu yaklaşık 220 tona** indirecek biçimde kurulmuştur.

Dezenfeksiyon ne zaman zorunlu?

Türk mevzuatının dikkat çekici bir özelliği, kentsel atıksuyun dezenfeksiyonunu genel bir yükümlülük olarak tanımlamamasıdır: **Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'nde dezenfeksiyon ya da koliform deşarj sınırı yoktur**; yönetmeliğin sınırları organik madde, askıda katı, azot ve fosforla ilgilidir. Dezenfeksiyonu açıkça zorunlu kılan temel hüküm, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nin 36. maddesidir: yüzme ve rekreasyon amacıyla kullanılan sulara derin deniz deşarjının mümkün olmadığı hâllerde, atıksuyun azot ve fosfor giderimi **ile birlikte dezenfeksiyon** işleminden geçirilmesi gerekir.

Derin deniz deşarjı ise kendi kurallarına tabidir. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nin **23 Ekim 2025**'te yenilenen tablosu, derin deniz deşarjına izin verilecek atıksuyun mikrobiyolojik kalitesini Yüzme Suyu Kalitesinin Yönetimine Dair Yönetmelik'e[15] bağlamıştır. Yüzme Suyu Yönetmeliği'ne göre yüzme alanlarında her türlü atıksuyun kıyıdan deşarjı yasaktır ve arıtılmış atıksuyun dahi **kıyı koruma bandının** dışına deşarj edilmesi zorunludur; bu bant Ege ve Akdeniz'de **500 m**, Marmara ve Karadeniz'de **300 m**'dir. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nin 35. maddesine göre de derin deniz deşarjında ilk seyrelme en az **40**, tercihen 100 olmalı, deşarj derinliği en az **20 m** olmalıdır.

Arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımı

Türkiye'de arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımına özgü ayrı bir yönetmelik bulunmuyor. Çerçeve üç metinden oluşur: kullanımı teşvik eden ve uygunluğunu valilik bünyesinde çevre, tarım ve DSİ temsilcilerinden oluşan bir komisyona bağlayan **Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nin 28. maddesi** (2022 değişikliği); sulama kalite kriterlerini belirleyen **Teknik Usuller Tebliği'nin** 22. maddesi ve Ek 7'si; ve yeniden kullanımı elektrik desteğiyle ödüllendiren **Atıksu Arıtma Tesisi Enerji Teşviki Yönetmeliği** (Resmî Gazete, 11 Kasım 2023, sayı 32366). Teknik Usuller Tebliği'nin 2022'deki değişikliği, sanayi proses suyu, soğutma kulesi, yangın suyu ve toz kontrolü gibi sulama dışı kullanımları da çerçeveye ekledi.

Tebliğ, sulamada iki sınıf tanımlar ve bu sınıflar AB tüzüğüyle karşılaştırıldığında ilginç bir tablo ortaya çıkar:

15. Kaynak: mevzuat.gov.tr

TABLO 3.6

Kriter	Türkiye Sınıf A	AB Sınıf A	Türkiye Sınıf B
Kullanım	Çiğ yenen ürünler, park ve golf sahası dahil her türlü yeşil alan	Çiğ tüketilen, suyla temas eden gıda bitkileri	İşlenen gıda, meyve bahçesi, bağ, mera, girişi kısıtlı alanlar
Arıtma	İkincil + filtrasyon + dezenfeksiyon	İkincil + filtrasyon + dezenfeksiyon	İkincil + dezenfeksiyon
$BOİ_5$ (mg/L)	< 20	≤ 10	< 30
Bulanıklık / AKM	< 2 NTU	≤ 5 NTU; AKM ≤ 10 mg/L	AKM < 30 mg/L
Mikrobiyoloji (/100 mL)	Fekal koliform 0	E. coli ≤ 10	Fekal koliform < 200

Kaynak: Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, Ek 7 Tablo E7.1; Tüzük (EU) 2020/741, Ek I.

Türk Sınıf A, mikrobiyoloji ve bulanıklıkta AB'den daha katı, organik madde ($BOİ_5$) bakımından daha gevşektir. Daha önemli fark ise yapısaldır: AB'nin zorunlu risk yönetim planı ve arıtma zincirinin doğrulanması şartının Türk mevzuatında karşılığı bulunmuyor.

Teşvik tarafında, Çevre Kanunu'nun[16] 29. maddesi, arıtma tesislerinin elektrik giderlerine sanayi tarifesinin **%50**'sine kadar destek verilmesine ve ileri arıtmayla arıttığı suyu yeniden kullanan kuruluşlar için bu oranın yeniden kullanım oranına göre **%100**'e kadar artırılmasına imkân tanır. Bakanlığın Şubat 2024 tarihli bir sunumuna göre 2023'te mevzuata uygun çalışan **835 tesise** toplam **1 milyar 33 milyon TL** ödeme yapıldı.

Yeniden kullanım oranını izlerken iki farklı ölçütün karıştırılmaması gerekir. Bakanlık verilerine dayanan 12. Kalkınma Planı[17], arıtılmış atıksuların yeniden kullanım oranını 2022 için **%4,7**, 2023 için **%5,2** olarak verir ve **2028 hedefini %11** olarak koyar; Bakanlığın 2024 başındaki sunumunda oranın 2018'deki **%1,2**'den bugünkü yaklaşık **%5,3**'e yükseldiği ve 2030 için **%15** hedeflendiği belirtiliyor. TÜİK'in yalnızca belediye arıtma tesislerini kapsayan istatistiğinde ise belediyelerce arıtılan atıksuyun yeniden kullanılan payı 2024'te yalnızca **%1,3**'tür. Farkın kaynağı kapsamdır: Bakanlık ölçütü sanayi tesislerinin yeniden kullanımını da içerdiği izlenimini verir. Sahadan örnekler arasında İSKİ'nin Ataköy tesisindeki günde **20.000 m³** kapasiteli MBR geri kazanım ünitesi (proses soğutma, tesis içi sulama ve yangın suyu) ve İZSU'nun Kemalpaşa, Bayındır ve Tire'deki tarımsal sulama projeleri sayılabilir. Tarım ve Orman

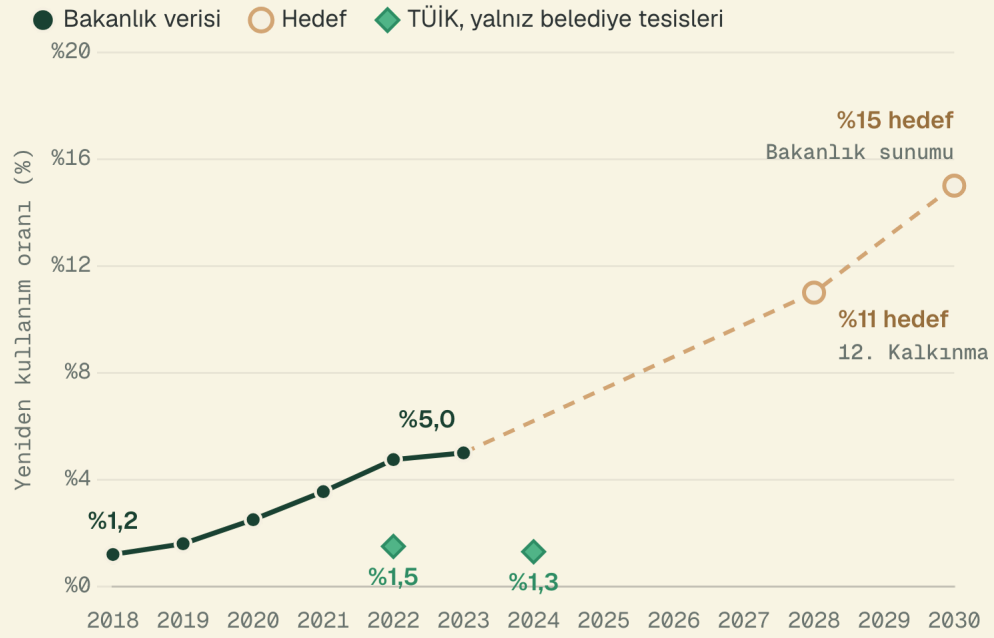
16. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/cevre-kanunu-rehberi-2026-kapsamli-klavuz
17. Kaynak: sbb.gov.tr

Bakanlığı'nın Aralık 2024'te yayımladığı Su Verimliliği Yönetmeliği[18] de atık suları "geleneksel olmayan su kaynakları" arasında sayarak kullanımlarını esas kabul ediyor; bu, Türkiye'nin su ayak izi ve su yönetimi[19] gündemiyle doğrudan bağlantılıdır.

ŞEKİL 3.10

Arıtılmış Atıksuyun Yeniden Kullanımı: İki Ölçüt, Bir Hedef

Türkiye'de yeniden kullanım oranı (%) ve hedefler



İki ölçüt farklı kapsamlıdır: Bakanlık verisi sanayi tesislerinin yeniden kullanımını da içerdiği izlenimini verir; TÜİK yalnız belediyelerce arıtılan atıksuyu kapsar. 12. Kalkınma Planı 2023 için %5,2 tahmin eder.

Kaynak: ÇŞİDB Çevre Yönetimi GM sunumu (Şubat 2024); 12. Kalkınma Planı, Tablo 51; TÜİK Su ve Atıksu İstatistikleri.

18. Kaynak: mevzuat.gov.tr

19. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/ulusal-su-kurulu-su-ayak-izi-2030

UZMAN NOTU

Türkiye'nin yeniden kullanım tartışmasında sıkça atlanan bir ayrıntı, kalite sınıflarının kâğıt üzerinde değil sahada izlenmesidir. Teknik Usuller Tebliği Sınıf A için bulanıklığın **sürekli**, fekal koliformun **günlük** izlenmesini ister ve sudaki kalıntı klorun 30 dakikalık temas sonrasında **1 mg/L**'nin üzerinde olmasını şart koşar. Ancak aynı tebliğde Sınıf B koliform ortalaması bir yerde 7 günlük, başka bir yerde 30 günlük olarak tanımlanmıştır; ayrıca tebliğin derin deniz deşarjı hükümleri Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nin artık yürürlükte olmayan eski tablo numaralarına atıf yapmaktadır. Yeniden kullanım genişledikçe bu metinlerin güncellenmesi, uygulamadaki belirsizliği azaltacaktır.

AB'nin yeni direktifi Türkiye için ne anlama geliyor?

AB'nin 2024 direktifi, Türkiye'nin aday ülke olarak uyumlaştırma yükümlülüğü taşıdığı en kapsamlı su mevzuatı değişikliklerinden biridir. Direktif **1 Ocak 2025**'te yürürlüğe girdi; üye devletlerin onu **31 Temmuz 2027**'ye kadar iç hukuka aktarması gerekiyor. Başlıca yükümlülükleri şöyle özetlenebilir:

- **İkincil arıtma:** 1.000 ile 2.000 NE arasındaki küçük yerleşimler de **31 Aralık 2035**'e kadar ikincil arıtma yapacak.
- **Üçüncül arıtma:** 150.000 NE ve üzerindeki tüm tesisler **2039** sonuna kadar azot ve fosfor giderecek; yeni sınırlar toplam fosfor için **0,7 / 0,5 mg/L**, toplam azot için **10 / 8 mg/L**.
- **Dördüncül arıtma:** 150.000 NE ve üzerindeki tesislerin **%20**'si **2033**, **%60**'ı **2039**, tamamı **2045** sonuna kadar mikrokirletici giderecek; riskli alanlara deşarj eden 10.000 NE ve üzeri tesisler için takvim %10 (2033), %30 (2036), %60 (2039) ve %100 (2045) olarak işliyor.
- **Genişletilmiş üretici sorumluluğu:** İlaç ve kozmetik üreticileri, dördüncül arıtmanın yatırım ve işletme maliyetinin **en az %80**'ini karşılayacak; sistem **31 Aralık 2028**'e kadar kurulacak.
- **Enerji nötrlüğü:** 10.000 NE ve üzerindeki tesislerin ulusal toplamda kendi ürettikleri yenilenebilir enerjiyle tükettikleri enerjiyi karşılama oranı **2030'da %20**, **2035'te %40**, **2040'ta %70**, **2045'te %100** olacak. Hedef tek tek tesisler için değil, ulusal düzeyde tanımlanmıştır ve dışarıdan satın alınan yenilenebilir enerji kural olarak sayılmaz.

Direktifin en tartışmalı unsuru maliyeti kimin ödeyeceğidir. AB Ortak Araştırma Merkezi'nin (JRC) Aralık 2025'te güncellediği tahmine göre dördüncül arıtmanın AB genelindeki maliyeti 2045'te yılda **1,48 ile 1,8 milyar avro** olacak; ilaç sektörü bu rakamın gerçeği yansıtmadığını savunuyor. Üreticilerin genişletilmiş sorumluluk hükümlerine karşı açtığı iptal davaları **20 Şubat 2026**'da AB Genel Mahkemesi'nce kabul edilemez bulunarak reddedildi; Avrupa Parlamentosu ise **18 Haziran 2026**'da uygulamanın askıya alınmasını isteyen bağlayıcı olmayan bir kararı **294'e karşı 245**

oyla kabul etti. Komisyon bu talebi reddetti ve kendi analizine göre mikrokirletici gideriminin 2045'te kişi başı yılda **2,70 ile 3,20 avro** maliyet getireceğini açıkladı.

Türkiye açısından tablo şöyledir: Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'nin 2023'teki son değişikliği bu yenilikleri içermiyor. Avrupa Komisyonu'nun 2025 Türkiye Raporu, arıtma tesislerinin belediye nüfusunun **%91**'ine hizmet verdiğini kaydediyor. Yeşil Ajanda olarak, Türkiye'nin önce ikincil ve üçüncül arıtma açığını kapatması gerektiğini, dördüncül arıtmanın ise öncelikle içme suyu havzaları ve yüzme suları gibi riskli alanlarda değerlendirilmesi gereken bir sonraki adım olduğunu değerlendiriyoruz. Bu yatırımların finansmanında, Resmî Gazete'de yayımlanan Türkiye Yeşil Taksonomisi[20] gibi sürdürülebilir finansman çerçeveleri de önem kazanıyor.

3.11 Sonuç: Atıksu Arıtımının Son Kademeleri ve Serinin Büyük Resmi

Üç bölümlük bu seri, bir damla atıksuyun tesis girişinden alıcı ortama ya da yeniden kullanıma uzanan yolculuğunu izledi. Birinci bölümde atıksuyun ne olduğu ve fiziksel arıtmanın çökebilen katıları nasıl ayırdığı, ikinci bölümde mikroorganizmaların çözünmüş kirliliği nasıl tükettiği anlatıldı. Bu son bölüm, işin en çok gözden kaçan iki ucunu tamamladı: suyu alıcı ortamın ve sonraki kullanıcının beklediği kaliteye çıkaran ileri arıtma ve dezenfeksiyon ile kirliliğin sonunda toplandığı çamurun yönetimi.

Bu bölümün temel dersi, ileri arıtmanın "daha fazla arıtma" değil, "doğru hedefe yönelik arıtma" olduğudur. Hassas bir göl fosfor, bir yüzme alanı patojen, bir sanayi kullanıcısı tuz, bir içme suyu kaynağı ise bunların hepsinin üstüne mikrokirletici ve virüs giderimi ister. Her hedef zincire yeni bir kademe ekler ve her kademe enerji, kimyasal ve çamur olarak bir bedel getirir.

Yeşil Ajanda olarak, atıksu arıtımının önümüzdeki on yılını şekillendirecek üç dönüşüme dikkat çekiyoruz:

1. **Arıtmadan geri kazanıma.** Arıtma tesisleri artık yalnızca kirliliği gideren tesisler olarak değil, su, enerji ve fosfor üreten "kaynak fabrikaları" olarak tasarlanıyor. Marselisborg ve Strass gibi tesisler enerjisini kendisi üretiyor, Almanya ve İsviçre çamurdan fosfor geri kazanımını zorunlu kılıyor; Türkiye'nin %11'lik yeniden kullanım hedefi de bu yönde bir adımdır.
2. **Mikrokirleticiler ve PFAS, arıtmanın yeni sınırı olacak.** İlaç kalıntıları, kalıcı flor bileşikleri ve mikroplastikler hem arıtılmış suyun hem de çamurun kullanımını

20. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/turkiye-yesil-taksonomisi-yonetmeligi

sınırlıyor. Dördüncül arıtma ve kaynakta önleme, önümüzdeki yılların temel yatırım ve düzenleme gündemini oluşturacak.

3. **Çamur, bir bertaraf sorunundan bir yönetim stratejisine dönüşecek.** Depolama istisnasının sona ermesi, tarımda kullanımın fiilen durması ve çimento sanayiinde ek yakıt kullanımının artması, Türkiye'de çamur yönetiminin bir yol ayrımında olduğunu gösteriyor. Mono-yakma ve fosfor geri kazanımı ile birlikte düşünülen bir ulusal çamur stratejisi, bu dönüşümü yönlendirebilir.

Atıksu arıtımı, kentin görünmeyen altyapısıdır; ama su kirliliği[21], su kıtlığı ve iklim değişikliğinin kesiştiği yerde, giderek daha görünür bir sürdürülebilirlik meselesi hâline geliyor. Serinin üç bölümü birlikte, bu meselenin hangi sayılarla, hangi süreçlerle ve hangi mevzuatla yönetildiğine dair bütünlüklü bir çerçeve sunmayı amaçladı: Bölüm 1: Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma[22] · Bölüm 2: Biyolojik (İkincil) Arıtma[23] · Bölüm 3: İleri Arıtma, Dezenfeksiyon ve Çamur Yönetimi.

Sıkça Sorulan Sorular

İleri arıtma ile üçüncül arıtma aynı şey mi?

Tam olarak değil. Üçüncül arıtma terimi geleneksel olarak ikincil arıtmanın ardından gelen azot, fosfor ve askıda katı giderimini anlatır. İleri arıtma ise daha geniş bir kavramdır: ikincil arıtma çıkışında kalan ve hedeflenen kullanım için sorun olan her kirletici sınıfını (fosfor, patojenler, mikrokirleticiler, tuzlar) gideren kademelerin genel adıdır. AB'nin 2024 direktifiyle buna mikrokirletici giderimini anlatan "dördüncül arıtma" kavramı da eklendi.

Arıtılmış atıksu neden dezenfekte edilir?

Biyolojik arıtma bağırsak kökenli bakteri ve virüslerin önemli bir kısmını giderir ama tamamını değil. Arıtılmış atıksu yüzme alanlarına deşarj edilecek ya da sulamada kullanılacaksa, insan sağlığını korumak için patojenlerin ayrı bir kademede etkisiz hâle getirilmesi gerekir. Türkiye'de yüzme alanlarına derin deniz deşarjının mümkün olmadığı durumlarda dezenfeksiyon zorunludur; sulamada yeniden kullanılacak su için de Teknik Usuller Tebliği dezenfeksiyon şartı koyar.

21. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/su-kirliligi-nedir-nedenleri-etkileri-ve-cozum-yollari
22. Serinin önceki cildi: Bölüm 1, Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma.
23. Serinin önceki cildi: Bölüm 2, Biyolojik (İkincil) Arıtma.

Klor mu, UV mi, ozon mu daha iyi?

Tek bir doğru yoktur. Klor ucuzdur ve dağıtım şebekesinde koruma sağlayan bir kalıntı bırakır, ama Cryptosporidium'a karşı etkisizdir, yan ürün oluşturur ve alıcı ortama verilmeden önce genellikle deklorine edilmesi gerekir. UV, kalıntı ve yan ürün bırakmaz ve protozoaları kolayca etkisizleştirir, ama virüsler için yüksek doz ister ve bulanık suda etkinliği düşer. Ozon en güçlü dezenfektandır ama enerji ve yatırım maliyeti yüksektir. Seçim, hedeflenen patojene, suyun kalitesine ve gideceği yere göre yapılır.

Arıtma çamuru tarlada gübre olarak kullanılabilir mi?

Türkiye'de yalnızca stabilize edilmiş, ağır metal, organik kirletici ve mikrobiyolojik sınırları sağlayan çamur, izin alınarak ve belirli arazi koşullarında toprakta kullanılabilir; ham çamurun kullanımı yasaktır. Ancak PFAS ve mikroplastik kaygıları nedeniyle birçok ülke bu kullanımı kısıtlıyor: İsviçre 2006'dan beri tamamen yasaklamıştır, Almanya büyük tesislerde 2029 ve 2032'den itibaren yasaklayacaktır. Türkiye'de 2022'de bertaraf edilen kentsel çamurun yalnızca **%6,2**'si tarımda kullanıldı.

Anaerobik çürütme bir arıtma tesisine ne kazandırır?

Anaerobik çürütme, çamurun organik maddesini azaltarak kokusunu ve patojen yükünü düşürür, susuzlaştırılmasını kolaylaştırır ve en önemlisi metan içeren biyogaz üretir. Biyogaz, kojenerasyon motorlarında elektrik ve ısıya dönüştürülerek tesisin enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayabilir; iyi tasarlanmış tesislerde bu oran çoğunlukla yarıdan fazladır, en verimli örneklerde ise tesisler tükettiğinden fazla enerji üretir.

Atıksudan içme suyu üretmek mümkün mü?

Evet. Namibya'nın başkenti Windhoek 1968'den beri arıtılmış atıksudan doğrudan içme suyu üretiyor; ABD'deki Orange County ve Singapur ise geri kazanılmış suyu yeraltı suyu ya da rezervuarlar üzerinden dolaylı olarak içme suyuna katıyor. Bu tesisler mikrofiltrasyon veya ultrafiltrasyon, ters ozmoz ve ileri oksidasyondan oluşan çok bariyerli zincirler kullanır ve sürekli izlemeyle virüslerde 9 ile 12 log mertebesinde toplam giderim sağlar.

BÖLÜM SONU

Bölüm özeti

Bölümdeki Kilit Mesaj kutularının birebir derlemesi.

§3.1 İleri arıtma tek bir teknoloji değil, ikincil arıtma çıkışında kalan kirletici sınıfına ve suyun gideceği yere göre seçilen kademelerin toplamıdır. Deşarj için fosfor ve askıda katı, sulama için patojen, içme suyu kaynağı için tuzlar, mikrokirleticiler ve virüsler hedeflenir; ihtiyaç arttıkça zincir uzar ve çoklu bariyer ilkesi devreye girer.

§3.2 Kimyasal arıtma, kendiliğinden çökmeyen kolloidleri yük nötralizasyonu, süpürme flok ve polimer köprüleriyle büyütüp çöktürülebilir hâle getirir; aynı kimya, ortofosfatı metal fosfat olarak çamura aktarır. Çıkış fosforu düştükçe gereken metal dozu stokiyometrinin altı yedi katına çıkar ve her gram fosfor yaklaşık on gram ek çamur demektir.

§3.5 Membranlar ileri arıtmanın en güvenilir bariyeridir: mikrofiltrasyon bakteri ve protozoaları, ultrafiltrasyon virüsleri, ters ozmoz ise tuzlar dahil hemen her şeyi fiziksel olarak durdurur. Bedel, osmotik basıncı yenmek için harcanan enerji, sürekli yönetilmesi gereken kirlenme ve bertaraf edilmesi gereken tuzlu konsantredir.

§3.7 Dezenfeksiyon patojenleri öldürmekten çok etkisiz bırakmaktır ve başarısı log giderimle ölçülür. Klor ucuz ve kalıntı bırakan bir dezenfektandır ama pH'a, amonyağa ve Cryptosporidium'a karşı zayıftır, yan ürün üretir; UV protozoaları kolayca etkisizleştirir ama virüsler için yüksek doz ister ve kalıntı bırakmaz; ozon en güçlüsüdür ama en pahalısıdır. Doğru seçim, suyun gideceği yere ve hangi patojenin hedeflendiğine bağlıdır.

§3.8 Çamur, arıtmanın yan ürünü değil ikinci ürünüdür: suyun içinden alınan kirliliğin toplandığı yerdir. Yoğunlaştırma ve susuzlaştırma hacmi onlarca kat azaltır, anaerobik çürütme organik maddeyi stabilize ederken tesisin enerjisinin büyük kısmını karşılayabilecek biyogaz üretir. Avrupa'daki yön açıktır: çamuru tarlaya vermekten yakmaya ve külden fosfor geri kazanmaya doğru bir dönüşüm.

§3.9 Arıtılmış atıksu, kuraklıktan etkilenmeyen bir su kaynağıdır. Kalite merdiveni, sanayi ve tarımdan içme suyuna kadar uzanır; basamak yükseldikçe zincire filtrasyon, membran, ters ozmoz ve ileri oksidasyon eklenir ve risk yönetimi teknoloji kadar önem kazanır.

BAŞVURU

Semboller ve birimler

Bölümün denklemlerindeki değişkenler; tanımlar denklem kartlarından birebir.

SEMBOL	TANIM VE BİRİM	İLK GEÇTİĞİ
$1/n$	adsorpsiyon yoğunluğu üssü (boyutsuz)	(3.2)
C	kalıntı dezenfektan derişimi (mg/L)	(3.4)
C_e	denge derişimi (mg/L)	(3.2)
G	hız gradyanı (s^{-1})	(3.1)
J	akı (L/m²·sa)	(3.3)
k	inaktivasyon hız sabiti	(3.4)
K_F	Freundlich kapasite sabiti	(3.2)
μ	dinamik viskozite (N·s/m²; 20 °C'de $1{,}002\times10^{-3}$)	(3.1)
n	seyrelme katsayısı (boyutsuz)	(3.4)
N_0, N	başlangıç ve t anındaki canlı mikroorganizma sayısı	(3.4)
P	harcanan güç (W)	(3.1)
q_e	denge yükü (mg kirletici / g karbon)	(3.2)
R_f	kirlenme tabakasının direnci (m^{-1})	(3.3)
R_m	membranın kendi direnci (m^{-1})	(3.3)
S_1	başlangıç katı oranı (%)	(3.5)
S_2	son katı oranı (%)	(3.5)
t	temas süresi (dk)	(3.4)
TMP	transmembran basınç (Pa)	(3.3)
V	tank hacmi (m^3)	(3.1)
V_1	başlangıç çamur hacmi (m^3)	(3.5)
V_2	yoğunlaştırılmış hacim (m^3)	(3.5)

BAŞVURU

Denklem dizini

Bölümün tüm denklemleri tek yerde. Sayfa numarası denklemin açıklandığı yeri gösterir.

(3.1) **Hız Gradyanı (Camp-Stein) · karıştırma ve flokülasyon tasarımı** s. 10

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}}$$

(3.2) **Freundlich İzotermi · aktif karbonun yük taşıma kapasitesi** s. 15

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n}$$

(3.3) **Membran Akısı · direnç-seri modeli** s. 18

$$J = \frac{TMP}{\mu \cdot (R_\mathrm{m} + R_\mathrm{f})}$$

(3.4) **Chick-Watson Yasası · dezenfeksiyon kinetiği ve CT** s. 23

$$\log_{10}\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k \cdot C^n \cdot t$$

(3.5) **Yoğunlaştırmada Hacim ve Katı İlişkisi · çamur kütle dengesi** s. 32

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot S_1}{S_2}$$

Kaynaklar

1. Avrupa Birliği – Directive (EU) 2024/3019 concerning urban wastewater treatment (recast)
2. Avrupa Birliği – Regulation (EU) 2020/741 on minimum requirements for water reuse
3. Avrupa Birliği – Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption
4. Mevzuat.gov.tr – Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği
5. Mevzuat.gov.tr – Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği
6. Mevzuat.gov.tr – Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik
7. Mevzuat.gov.tr – Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
8. Mevzuat.gov.tr – Atık Yönetimi Yönetmeliği
9. Mevzuat.gov.tr – Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik
10. Mevzuat.gov.tr – Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği
11. Mevzuat.gov.tr – Yüzme Suyu Kalitesinin Yönetimine Dair Yönetmelik
12. Mevzuat.gov.tr – Atıksu Arıtma Tesisi Enerji Teşviki Yönetmeliği
13. Mevzuat.gov.tr – Su Verimliliği Yönetmeliği
14. Strateji ve Bütçe Başkanlığı (SBB) – On İkinci Kalkınma Planı (2024-2028)
15. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) – Çevresel Göstergeler: Atıksu Arıtma Tesisi ile Hizmet Verilen Belediyeler
16. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) – Su ve Atıksu İstatistikleri 2024; Atık İstatistikleri 2022 ve 2024
17. Eurostat – Sewage sludge production and disposal (env_ww_spd), Türkiye
18. Avrupa Komisyonu – Türkiye 2025 Report, SWD(2025) 756
19. İSKİ – Atık Su Arıtma Tesisleri
20. İZSU – Çamur kurutma tesisi devreye alınıyor
21. U.S. EPA – Nutrient Control Design Manual (EPA/600/R-10/100), 2010
22. U.S. EPA Region 10 – Advanced Wastewater Treatment to Achieve Low Concentration of Phosphorus, 2007
23. U.S. EPA – Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual (EPA 815-R-99-014), 1999
24. U.S. EPA – Membrane Filtration Guidance Manual (EPA 815-R-06-009), 2005
25. U.S. EPA – Ultraviolet Disinfection Guidance Manual for the Final LT2ESWTR (EPA 815-R-06-007), 2006
26. U.S. EPA – Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection (EPA/625/1-86/021), 1986
27. U.S. EPA – Wastewater Technology Fact Sheet: Ultraviolet Disinfection, 1999
28. U.S. EPA – Wastewater Technology Fact Sheet: Ozone Disinfection, 1999
29. ABD Federal Mevzuatı – 40 CFR § 141.720, Inactivation toolbox components
30. ABD Federal Mevzuatı – 40 CFR Part 503, Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge
31. U.S. EPA – Biosolids Technology Fact Sheet: Gravity Thickening, 2003
32. U.S. EPA – Biosolids Technology Fact Sheet: Multi-Stage Anaerobic Digestion, 2006
33. U.S. EPA – Biosolids Technology Fact Sheet: Belt Filter Press, 2000
34. U.S. EPA – Biosolids Technology Fact Sheet: Heat Drying, 2006
35. U.S. EPA – Fact Sheet: Draft Sewage Sludge Risk Assessment for PFOA and PFOS, 2025
36. U.S. EPA – Draft Guidance for Reducing Risk from PFOA and PFOS in Biosolids, 2026
37. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) – Bromate in Drinking-water, 2005
38. U.S. EPA – Summary of the WHO Water Reuse Guideline for Potable Water Reuse
39. TU Delft OpenCourseWare – Water Treatment: Coagulation and flocculation
40. TU Delft OpenCourseWare – Activated carbon filtration (Heijman, 2007)
41. The Open University – The reverse osmosis (RO) process
42. DEÜ / T.C. Çevre Bakanlığı – Teknik Doküman Serisi: 6. İleri Atıksu Arıtımı, 8. Çamur Arıtımı ve Uzaklaştırılması
43. Krzeminski vd. – Membrane bioreactors: a review on recent developments in energy reduction, Journal of Membrane Science, 2017
44. Miklos vd. – Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment, Water Research, 2018
45. Kim vd. – Occurrence, Fate, and Removal of PFAS in Small- and Large-Scale Municipal Wastewater Treatment Facilities, ACS ES&T Water, 2024
46. Iyare, Ouki ve Bond – Microplastics removal in wastewater treatment plants: a critical review, 2020
47. Hunziker Betatech / VSA – Energy and cost figures of processes for the elimination of micropollutants in WWTPs, 2024
48. VSA Platformu – Liste der ARA mit MV-Stufe, Aralık 2025
49. Kroiss ve Klager – How to make a large nutrient removal plant energy self-sufficient (Vienna Main WWTP), TU Wien, 2018
50. State of Green / Aarhus Vand – Achieving 150% energy self-sufficiency at Marselisborg WWTP, 2020
51. DWA – Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen 2022
52. Umweltbundesamt (UBA) – Evaluierung verfügbarer Kapazitäten thermischer Klärschlammbehandlung sowie zur Phosphorrückgewinnung, TEXTE 56/2025
53. Destatis – Einsatz von Klärschlamm als Dünger in der Landwirtschaft im Jahr 2024 erneut gesunken, 2025
54. BAFU – Erläuterungen zur Änderung der Abfallverordnung (VVEA), 2025
55. Orange County Water District (OCWD) – Groundwater Replenishment System
56. PUB Singapore – NEWater
57. State Comptroller of Israel – Wastewater Reclamation, its Quality and Use, 2024

58. MITECO – Aprobado el Real Decreto de reutilización de las aguas, 2024
59. JRC (Pistocchi) – Updated estimation of the costs of quaternary wastewater treatment in the EU, 2025
60. EurEau – General Court dismisses lawsuits against EPR, 2026
61. Vital Signs – Commission defends Urban Wastewater Directive against EPP-ECR challenge, 2026

AKADEMİ SERİSİ

Atıksu Arıtımının Esasları: serideki ciltler

Her cilt bir önceki cildin terminolojisi ve sembolleri üzerine kurulur. QR kodu cildin web sürümüne götürür.

1

Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma

2

Biyolojik (İkincil) Arıtma

3

İleri Arıtma, Dezenfeksiyon ve Çamur Yönetimi

ÖNERİLEN ATIF

Yeşil Ajanda (2026). *Atıksu Arıtımının Esasları, Bölüm 3: İleri Arıtma, Dezenfeksiyon ve Çamur Yönetimi* (Yeşil Ajanda Akademi Serisi, Sürüm 1.0). yesilajanda.com/atiksu-aritimi-esaslari-ileri-aritma-dezenfeksiyon-camur

YEŞİL AJANDA

Çevre, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik

AKADEMİ SERİSİ

Atıksu Arıtımının Esasları · Bölüm 3 / 3

> Bu doküman bilgilendirme amaçlıdır ve hukuki görüş niteliği taşımaz. İçerik, yayımlandığı tarihteki mevzuat ve kaynaklara dayanır; zamanla güncelliğini yitirebilir. Kesin değerlendirme için ilgili mevzuata ve konunun uzmanına başvurunuz.

Kaynak yazı: https://yesilajanda.com/atiksu-aritimi-esaslari-ileri-aritma-dezenfeksiyon-camur/

Yayın tarihi: 6 Ekim 2026

Sürüm: 1.0

İletişim: yesilajanda.com

BİZİ TAKİP EDİN

LinkedIn · linkedin.com/company/yesilajandacom

Instagram · @yesilajandacom

X · @yesilajandacom

Facebook · @yesilajandacom

Bu yayın yesilajanda.com'da yayımlanan içerikten üretilmiştir. Tüm hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek alıntılanabilir.