YEŞİL AJANDA
Çevre, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik

AKADEMİ SERİSİ

Atıksu Arıtımının Esasları

2 / 3

Biyolojik (İkincil) Arıtma

Biyolojik arıtma nedir, nasıl çalışır? Aktif çamur, çamur yaşı, Monod kinetiği, azot-fosfor giderimi ve Türkiye'de KAAY deşarj standartları ($BOİ_5$ 25 mg/L).

1 Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma

2 Biyolojik (İkincil) Arıtma

3 İleri Arıtma, Dezenfeksiyon ve Çamur Yönetimi

2

Biyolojik (İkincil) Arıtma

BU BÖLÜMDE

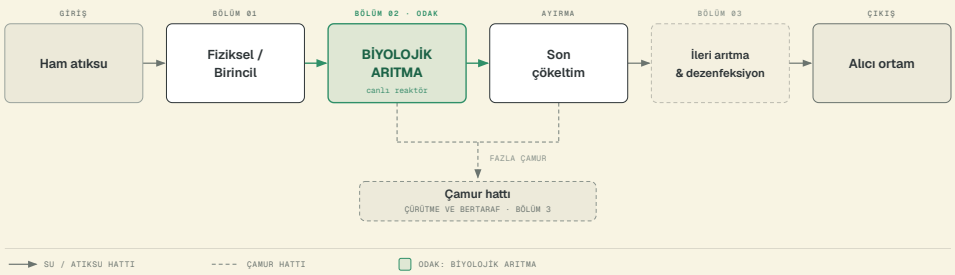
2.1	Fiziksel Arıtmadan Sonra Ne Kaldı? İkincil Arıtmanın Mantığı	4
2.2	Mikrobiyal Metabolizmanın Esasları	5
2.3	Büyüme Kinetiği: Monod Denklemi	8
2.4	Aktif Çamur Prosesi: Sistemin Anatomisi	12
2.5	Oksijen ve Aerasyon: Görünmeyen En Büyük Gider Kalemi	18
2.6	Son Çökeltim ve Çamurun Çökelebilirliği	21
2.7	Aktif Çamurun Çeşitleri	24
2.8	Biyofilm (Sabit Film) Sistemleri	26
2.9	Besin Giderimi: Azot ve Fosfor	28
2.10	Membran Biyoreaktör (MBR): Çökeltimi Ortadan Kaldırmak	33
2.11	Geleceğin Biyolojik Arıtması: Granüler Çamur, Anammox ve Karbon Dengesi	34
2.12	Türkiye'de Biyolojik Arıtma ve Deşarj Standartları	36
2.13	Sonuç: Arıtmanın Canlı Kalbi	40

Bir atıksu arıtma tesisine giren kirliliğin büyük bölümü gözle görülmez. Serinin birinci bölümünde[1] ele alındığı gibi ızgaralar, kum tutucular ve birincil çökeltim havuzları çökebilen ve yüzebilen katıları ayırdıktan sonra bile, suda çözünmüş ve kolloidal hâldeki organik maddenin neredeyse tamamı ile azot ve fosforun büyük kısmı yerinde durur. Orta kuvvette evsel bir atıksuda birincil çökeltim, giren **$BOİ_5$ yükünün yalnızca yaklaşık %35'ini** giderir; geri kalan **%65'lik organik yük** ikinci bir kademeye, biyolojik arıtmaya taşınır. Modern bir kentsel arıtma tesisinin kalbi burada, biyolojik reaktörde atar.

ŞEKİL 2.1

Biyolojik Arıtmanın Arıtma Zincirindeki Yeri

Fiziksel arıtmanın (Bölüm 1) çözemediği çözünmüş kirliliği ikincil (biyolojik) arıtma giderir.



Fiziksel arıtma yalnızca çökebilen ve yüzebilen katıları alır; suda çözünmüş ve kolloidal organik madde ile azot-fosfor, ancak biyolojik arıtmada mikroorganizmalarca giderilir. Biyolojik reaktör ve son çökeltimde üretilen fazla biyokütle çamur hattına gider.

Peki fiziksel yöntemlerin dokunamadığı bu çözünmüş kirlilik nasıl giderilir? Cevap, kimyasal bir işlem değil, kontrol altına alınmış bir ekosistemdir: milyarlarca mikroorganizmanın kirliliği besin olarak tüketmesi. Yeşil Ajanda olarak bu bölümde biyolojik arıtmayı çevre mühendisliği ders derinliğinde ele alıyoruz: mikroorganizmaların metabolizmasından **Monod büyüme kinetiğine**, aktif çamur prosesinin kalbindeki **çamur yaşı (SRT)** ve **besin/mikroorganizma (F/M)** parametrelerinden oksijen tasarımına, biyofilm sistemlerinden **azot ve fosfor giderimine**, membran biyoreaktörlerden Türkiye'nin deşarj standartlarına kadar. Amaç, bir tesisin neden "canlı" bir sistem olarak işletildiğini ve bu sistemin hangi sayılarla tasarlandığını göstermek.

1. Serinin önceki cildi: Bölüm 1, Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma.

2.1 Fiziksel Arıtmadan Sonra Ne Kaldı? İkincil Arıtmanın Mantığı

Birinci bölümde atıksuyun katı madde hiyerarşisi tanımlanmıştı: **toplam katı madde**, çözünmüş ve askıda fraksiyonlara; askıda kısım da çökebilen ve çökemeyen (kolloidal) fraksiyonlara ayrılıyordu. Fiziksel ve mekanik arıtma yalnızca **çökebilen ve yüzebilen** kısma etki eder. Kolloidal parçacıklar (yaklaşık 0,01 ile 1 mikron arası) yer-çekimiyle pratik sürelerde çökmez; suda gerçekten çözünmüş organik moleküller ise hiçbir fiziksel bariyerle tutulamaz. Oysa evsel atıksuyun kirletme gücünü, yani biyo-kimyasal oksijen ihtiyacının ($BOİ_5$) büyük bölümünü tam da bu çözünmüş ve kolloidal organik madde taşır.

Sonuç şudur: birincil çökeltimden çıkan su hâlâ alıcı ortama deşarj edilemeyecek kadar kirlidir. Orta kuvvette bir evsel atıksuda birincil çökeltim çıkışı tipik olarak **120 ile 150 mg/L arası $BOİ_5$** taşır; oysa Türkiye'de Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'nin ikincil arıtma deşarj sınırı **25 mg/L $BOİ_5$**'tir. Aradaki bu farkı kapatmak, yani çözünmüş organik maddeyi ortadan kaldırmak, biyolojik arıtmanın görevidir.

Bu farkı bir benzetmeyle netleştirmek mümkün. Birinci bölümde ele alınan orta kuvvette bir evsel atıksuda askıda katının yaklaşık dörtte üçü organiktir ve birincil çökeltim bunun ancak çökebilen kısmını alır. Geriye kalan kolloidal ve çözünmüş organik madde ise bir bardak suya karıştırılmış şeker gibidir: gözle görülmez, dibe çökmez, hiçbir mekanik süzgeçte tutulmaz. Onu sudan almanın tek pratik yolu, bir canlıya yedirmektir. İşte biyolojik arıtmanın varlık nedeni budur.

Temel fikir: kirliliği yakmak değil, yedirmek

Biyolojik arıtmanın mantığı sezgisel olarak basittir. Sudaki çözünmüş organik madde, mikroorganizmalar için besindir. Bir tesis, doğada bir gölde veya nehirde kendiliğinden yavaşça gerçekleşen ayrışma sürecini alır, onu bir reaktörün içine hapseder ve doğadakinden yüzlerce kat hızlandırır. Bunu iki şeyi kontrol ederek yapar: mikroorganizma kütlesini yüksek tutmak ve onlara ihtiyaç duydukları oksijeni bol bol vermek. Mikroorganizmalar organik maddeyi tüketirken bir kısmını enerji için karbondioksite yükseltger, bir kısmını da yeni hücrelere, yani yeni mikroorganizma kütlesine dönüştürür.

Bu dönüşümün pratik bir sonucu vardır ve birinci bölümdeki kütle dengesi ilkesiyle örtüşür: **fiziksel arıtma gibi biyolojik arıtma da kirliliği yok etmez, onu bir biçimden diğerine taşır.** Çözünmüş organik kirlilik, çökebilen mikroorganizma kütlesine (biyo-kütleye) dönüşür. Bu yeni kütle sonra bir çökeltim havuzunda sudan ayrılır. Yani biyolojik arıtma aslında bir "çözünmüş kirliliği çökebilir katıya çevirme" işlemidir; asıl giderim, üretilen fazla biyokütlenin sistemden çamur olarak alınmasıyla tamamlanır.

Üç metabolik rejim: aerobik, anoksik, anaerobik

Mikroorganizmaların organik maddeyi parçalarken kullandıkları "terminal elektron alıcısı", biyolojik arıtmanın tüm çeşitlerini tanımlayan ana ayraçtır. Basitçe, mikroorganizmanın kirliliği yakarken artan elektronları nereye verdiği sorusudur bu.

- **Aerobik:** Elektron alıcısı çözünmüş oksijendir (O_2). BOİ gideriminin ve nitrifikasyonun temel rejimidir; hızlıdır ve en çok enerji açığa çıkarır, ama sürekli havalandırma ister.
- **Anoksik:** Çözünmüş oksijen yoktur; elektron alıcısı nitrat veya nitrittir (NO_3^-/NO_2^-). Denitrifikasyonun, yani azotun gaz hâlinde atmosfere geri verilmesinin gerçekleştiği rejimdir.
- **Anaerobik:** Ne oksijen ne nitrat vardır; fermantasyon ve sülfat veya karbondioksit indirgeme devreye girer. Biyolojik fosfor gideriminin (EBPR) ilk aşaması ve çamur çürütmesi bu rejimde işler.

Bir modern tesisin gücü, aynı çamuru bu üç rejim arasında dolaştırarak tek bir sistemde hem organik maddeyi hem azotu hem fosforu giderebilmesinden gelir. Bu bölümün ilerleyen kısımları esasen bu üç rejimin nasıl bir araya getirildiğinin hikâyesidir.

> **UZMAN NOTU**
>
> Aerobik, anoksik ve anaerobik terimleri günlük dilde sıkça karıştırılır. Kritik ayrım "oksijen var mı yok mu" değil, "hangi terminal elektron alıcısı kullanılıyor" sorusudur. Anoksik bir bölgede serbest oksijen yoktur ama nitrat vardır; bu yüzden anoksik ile anaerobik aynı şey değildir. Denitrifikasyon anoksik koşulda çalışır, çürütme ise gerçek anaerobik koşulda. Tasarımda bu ayrım havalandırma ve karıştırma stratejisinin tamamını belirler.

2.2 Mikrobiyal Metabolizmanın Esasları

Biyolojik arıtma bir kimya değil, bir mikrobiyoloji disiplinidir. Reaktörün içindeki karışım, "aktif çamur" adı verilen kahverengi, floklaşmış bir mikroorganizma topluluğudur ve bu topluluk son derece kalabalıktır.

Aktif çamur bir ekosistemdir

Aktif çamurun biyolojik topluluğu virüsleri, bakterileri, protozoaları, mantarları, algleri ve rotifer gibi çok hücreli canlıları içerir. Ancak birey sayısının yaklaşık **%95'ini bakteriler oluşturur** ve arıtmanın esas işini onlar yapar (EVS Institute verisi). Bakteriler organik maddeyi doğrudan tüketen "üreticilerdir"; besin ağının geri kalanı bir denge ve gösterge işlevi görür.

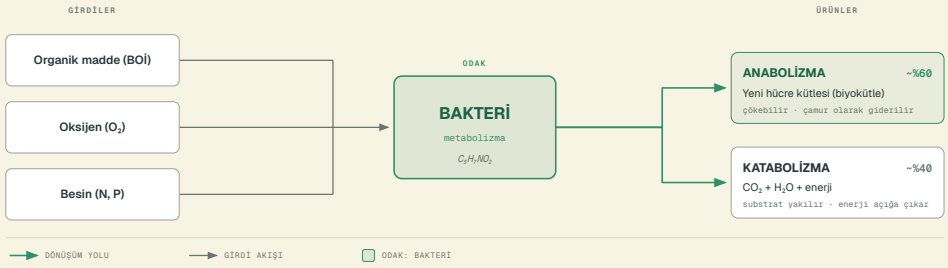
Bu ekosistemde bir besin zinciri hiyerarşisi kurulur. Protozoalardan siller (ciliata), askıda kalmış, floklaşmamış bakterileri ve partikül maddeyi otlayarak (predasyon) tüketir; böylece çıkış suyunu berraklaştırırlar. Su araştırmalarında sillerin yaklaşık **4 ile 18 mg/L BOİ** bandında iyi bir çıkış kalitesi göstergesi olduğu belirlenmiştir. Rotiferler ise hem bakteriyle hem protozoayla beslenir, besin ağının üst basamağını oluşturur ve **toksik yükten ilk etkilenen gruptur**; bu yüzden bir tesiste rotiferlerin varlığı, çamurun sağlıklı ve olgun olduğunun işaretidir.

Bu topluluğun bileşimi sabit değildir; işletme koşullarına göre bir "süksesyon" (ardıllık) gösterir. Genç ve çok beslenen bir çamurda (yüksek F/M) kamçılılar (flagellat) baskındır ve kötü çıkış kalitesine işaret eder. Besin azaldıkça (F/M düştükçe) önce serbest yüzen siller, sonra saplı siller, en sonunda rotiferler ve yavaş büyüyen nitrifiye bakteriler yerleşir. Deneyimli bir işletmeci mikroskop altında bu toplulukları izleyerek tesisin sağlığını, çoğu laboratuvar testinden önce okuyabilir. Nitekim aktif çamur işletmeciliğinde mikroskop en hızlı teşhis aracıdır: bir damla çamurda hangi organizmaların baskın olduğu, saatler sonra çıkacak bir BOİ sonucundan çok daha erken, çamurun genç mi yaşlı mı, sağlıklı mı stresli mi olduğunu söyler.

ŞEKİL 2.2

Mikroorganizma Kirliliği Nasıl Kullanır?

Bakteri giderdiği substratı iki eşleşik yola böler: bir kısmını yeni hücreye çevirir (anabolizma), bir kısmını enerji için yakar (katabolizma).



Giderilen her gram BOİ'nin bir kısmı gaz olarak uçar (katabolizma), bir kısmı çökebilir biyokütleye dönüşür (anabolizma); bu bölüşümü hücre verimi Y belirler (evsel atıksu için tipik ~0,6). Bakterinin ampirik formülü $C_5H_7NO_2$'dir; hücre kütlesinin ~%12,4'ü azottur.

Bu topluluğun bir arada çökebilmesini sağlayan da yine bakterilerin kendisidir. Zoogloea gibi bakterilerin salgıladığı hücre dışı polimerik maddeler (EPS), mikroorganizmaları birbirine yapıştırıp **flok** adı verilen çökebilir kümeler oluşturur. İyi bir flok yapısı hem berrak bir çıkış suyu hem de son çökeltimde kolay ayrılma demektir; işte bu yüzden aktif çamurun başarısı yalnızca kirliliği tüketmesine değil, tükettikten sonra iyi floklaşıp çökebilmesine de bağlıdır. Flok iskeletini bir miktar ipliksi bakteri

kurar; asıl sorun, bu ipliksilerin dengeyi bozacak kadar çoğalmasıdır (ileride ele alınan şişkin çamur).

Katabolizma ve anabolizma: kirliliğin iki kaderi

Bir bakteri organik maddeyi tükettiğinde iki eşleşik süreç aynı anda işler. **Katabolizma** (enerji üreten yıkım) sırasında substratın bir kısmı oksitlenip karbondioksite çevrilir ve enerji açığa çıkar. **Anabolizma** (sentez) sırasında ise bu enerji kullanılarak substratın kalan kısmı yeni hücre kütlesine dönüştürülür. Yani giren her gram BOİ'nin bir kısmı gaz olarak (CO_2) uçar, bir kısmı çökebilir biyokütleye dönüşür. Bu bölüşümün oranını **hücre verimi (Y)** belirler.

Bakteri hücresinin ampirik formülü, çevre mühendisliğinde standart bir kabul olarak **$C_5H_7NO_2$** alınır (molekül ağırlığı 113 g/mol). Bu formülün iki pratik sonucu vardır. Birincisi, hücrenin kendisi de bir organik maddedir ve oksitlenebilir; bir gram hücre kütlesinin oksijen (veya nihai BOİ) eşdeğeri **1,42 g O_2/g hücre**'dir. İkincisi, hücrenin kuru ağırlığının yaklaşık **%12,4'ü azottur** ve %1,5 ile %2'si fosfordur; bu yüzden biyolojik arıtma, organik madde giderirken kaçınılmaz olarak bir miktar azot ve fosforu da hücre yapısına katarak giderir. Sağlıklı bir bakteri büyümesi için gereken besin oranı kabaca **BOİ:N:P = 100:5:1** kuralıyla ifade edilir; giriş suyunda bu orana göre azot veya fosfor eksikse, çamur zayıflar.

Aerobik oksidasyonun stokiyometrisi

Katabolizma ile anabolizmanın nasıl iç içe geçtiği, basit bir sentez denklemiyle somutlaşır. Basit bir organik karbon kaynağıyla aerobik hücre sentezi molar olarak şöyle yazılabilir: $5CH_2O + HCO_3^- + NH_4^+ \rightarrow C_5H_7NO_2 + 4H_2O + CO_2$. Bu tek denklem üç şeyi aynı anda anlatır: organik karbonun bir bölümü yeni hücre kütlesine ($C_5H_7NO_2$) bağlanır, bir bölümü karbondioksite yükseltgenir ve büyüme için ortamdan azot (amonyak) çekilir. Hücre sentezinin azot ihtiyacı hesaplandığında yaklaşık **0,12 g azot/g hücre** çıkar; bu, biyolojik arıtmanın organik madde giderirken neden kaçınılmaz olarak bir miktar azotu da hücreye kattığının sayısal kanıtıdır.

Hücrenin kendisi de oksitlenebilir bir organik maddedir. İçsel solunumun denklemi $C_5H_7NO_2 + 5O_2 \rightarrow 5CO_2 + NH_3 + 2H_2O$ biçimindedir ve buradan hücrenin oksijen eşdeğeri 160/113 ≈ **1,42 g O_2/g hücre** olarak çıkar. Pratikte bir gram hücre tümüyle yakılmaz: yaklaşık **0,8 gramı** oksitlenip enerjiye çevrilirken, geri kalan **0,2 gram** biyolojik olarak ayrışmayan kalıcı bir kalıntı (inert) olarak kalır. Bu kalıcı fraksiyon, ne kadar uzun havalandırılırsa havalandırılsın bir tesisin çamur üretimini asla sıfıra indiremeyeceğinin nedenidir.

Hücre verimi (Y) ve içsel solunum (kd)

Hücre verimi Y, giderilen birim substrat başına üretilen biyokütleyi verir. Evsel atıksuyun heterotrof bakterileri için $BOİ_5$ bazında **Y = 0,4 ile 0,8 g UAKM/g $BOİ_5$** aralığındadır, tipik değer **0,6**'dır (ABD Enerji Bakanlığı Better Plants biyokinetik verisi). Yani giderilen her 100 gram $BOİ_5$'in yaklaşık 60 gramı yeni bakteri kütlesine dönüşür, kalanı enerji için yakılır.

Ancak bir reaktörde biyokütle sonsuza dek birikmez. Besin azaldığında bakteriler kendi hücre içi rezervlerini, sonra birbirlerini tüketmeye başlar; bu sürece **içsel (endojen) solunum** denir ve hızını **kd** katsayısı ölçer. Evsel atıksu için kd tipik olarak **0,06 ile 0,08 $gün^{-1}$** mertebesindedir (kaynağa göre değişir). İçsel solunum, üretilen net (gözlenen) biyokütlenin teorik Y'den daima düşük olmasının nedenidir ve bir tesiste ne kadar fazla çamur atılacağını doğrudan belirler. Bu iki katsayı, Y ve kd, biyolojik arıtma tasarımının tüm sayısal iskeletini kuran denklemlerin girdileridir. Sıradaki bölüm tam da bu denklemi, Monod kinetiğini ele alıyor.

KİLİT MESAJ

Biyolojik arıtma, çözünmüş kirliliği çökebilir biyokütleye çeviren canlı bir ekosistemdir. Giren organik maddenin bir kısmı enerji için karbondioksite yükseltgenir, bir kısmı yeni hücrelere dönüşür; asıl giderim, bu fazla biyokütlenin sistemden atılmasıyla tamamlanır.

2.3 Büyüme Kinetiği: Monod Denklemi

Bir arıtma tesisini "boyutlandırmak", aslında mikroorganizmaların ne hızda büyüdüğünü bilmek demektir. Çünkü büyüme hızı, ne kadar substratın (kirliliğin) ne sürede tüketileceğini, dolayısıyla reaktörün ne kadar büyük olması gerektiğini belirler. Mikrobiyal büyümenin bu hızını tarif eden temel bağıntı, 1940'larda Jacques Monod tarafından formüle edilen denklemdir.

Doygunluk mantığı

Monod denklemi, mikroorganizmaların spesifik büyüme hızını (μ, birim biyokütle başına büyüme hızı) sınırlayıcı substrat derişimine (S) bağlar. Mantığı bir enzim doygunluğu gibidir: substrat bolken bakteriler alabildiğine hızlı büyür, substrat azaldıkça büyüme yavaşlar.

DENKLEM 2.1 · MONOD DENKLEMİ · MİKROBİYAL BÜYÜME HIZI

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} \tag{2.1}$$

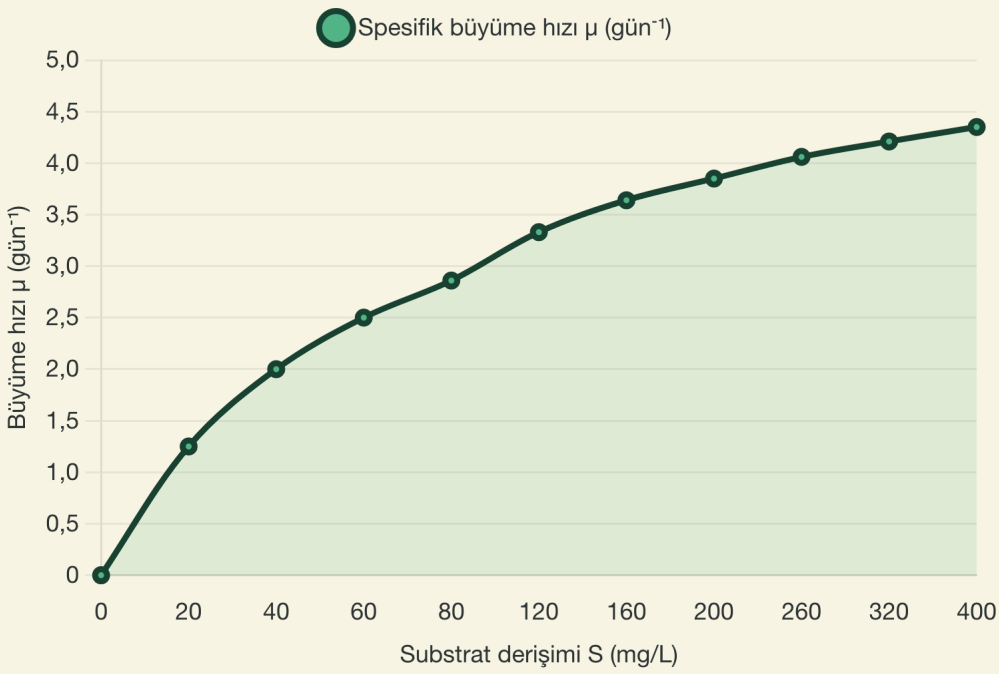
BURADA

- μ spesifik büyüme hızı (1/gün)
- μ_{max} maksimum spesifik büyüme hızı (1/gün)
- S sınırlayıcı substrat derişimi (mg/L)
- K_s yarı doygunluk sabiti (mg/L)

K_s, büyüme hızının yarıya düştüğü substrat derişimidir. Substrat bolken ($S \gg K_s$) büyüme μ_{max}'a doygunlaşır; substrat azken ($S \ll K_s$) büyüme substratla doğru orantılıdır. Reaktör çıkışında S düşük olduğu için son miligramları gidermek en zor kısımdır.

Denklemdeki **Ks (yarı doygunluk sabiti)**, büyüme hızının maksimumun tam yarısına düştüğü substrat derişimidir ve bir organizmanın düşük besine ne kadar dayanabileceğinin ölçüsüdür. Denklemin davranışı iki uçta belirginleşir: substrat çok bolken (S, Ks'ten çok büyük) büyüme hızı maksimuma (μmax) yaklaşır ve substrattan bağımsız hâle gelir (sıfırıncı mertebe); substrat azaldığında (S, Ks'ten çok küçük) büyüme hızı substratla doğru orantılı olur (birinci mertebe). Bir arıtma reaktörünün çıkışında substrat çok düşük olduğu için, sistem çoğunlukla bu birinci mertebe bölgesinde çalışır; işte bu yüzden son birkaç miligram kirliliği gidermek, ilk yüz miligramı gidermekten çok daha zordur.

ŞEKİL 2.3



Substrat bolken büyüme maksimuma (μ_{max}) doygunlaşır; substrat azken büyüme substratla doğru orantılıdır. Yarı doygunluk sabiti K_s = 60 mg/L'de büyüme hızı tam olarak maksimumun **yarısıdır** (2,5 gün^{-1}).

Substrat tüketiminden çıkış kalitesine

Büyüme hızı ile kirlilik giderme hızı, madalyonun iki yüzüdür: mikroorganizmalar büyüdükçe substrat (kirlilik) tüketilir. Bu bağın kararlı durumdaki sonucu zariftir ve çoğu kişiyi şaşırtır: bir reaktörün çıkışındaki çözünmüş substrat derişimi, esasen giriş yüküne değil, **seçilen çamur yaşına** bağlıdır. Çamur yaşı arttıkça çıkış substratı düşer ve belli bir değerin üstünde neredeyse sabitlenir. Bunun pratik anlamı büyüktür: bir tesisin ne kadar temiz su ürettiğini asıl belirleyen, ne kadar kirli su geldiği değil, sistemin nasıl işletildiğidir. Aynı denklem bir alt sınır da koyar; **minimum çamur yaşı**, yani mikroorganizmaların yıkanıp gitmeden tutunabildiği en kısa süre, kabaca `1/(Y·k − kd)` ile verilir ve tasarım her zaman bu sınırın belirgin üstünde, bir emniyet payıyla yapılır.

Kinetik katsayılar: heterotroflar

Evsel atıksuyu tüketen heterotrof bakteriler için tipik Monod katsayıları, ABD Enerji Bakanlığı ve Metcalf & Eddy kaynaklarında geniş biçimde tablolanmıştır. $BOİ_5$ bazında maksimum spesifik büyüme hızı **μmax = 2 ile 10 gün^{-1}** (tipik **5**), yarı

doygunluk sabiti **Ks = 25 ile 100 mg/L** (tipik **60**), verim **Y = 0,4 ile 0,8** (tipik **0,6**) ve içsel bozunma **kd = 0,05 ile 0,15 gün^{-1}** (tipik **0,08**) alınır.

Burada bir uyarı gereklidir, çünkü kinetik katsayılardaki en yaygın karışıklık kaynağı budur: katsayıların değeri, substratın **BOİ$_5$** ile mi yoksa **biyobozunur KOİ (bCOD)** ile mi ölçüldüğüne bağlıdır. Metcalf & Eddy'nin güncel baskısı katsayıları bCOD bazında verir (μmax tipik 6, Ks tipik 20 mg/L, Y tipik 0,40). İki gösterim de doğrudur ve birbiriyle tutarlıdır; ancak bir hesapta hangi tabanın kullanıldığı mutlaka belirtilmelidir. Bu rehberde tutarlılık için, birinci bölümde standart alınan **BOİ$_5$** tabanı esas alınıyor.

Kinetik katsayılar: nitrifiye eden ototroflar çok daha yavaştır

Azotu gideren nitrifiye bakteriler ise tümüyle farklı bir kinetik dünyada yaşar. Bu bakteriler ototrofdur (karbon kaynağı olarak organik madde değil karbondioksit kullanır) ve enerjilerini amonyağı oksitlemekten alır. Metcalf & Eddy verilerine göre nitrifiye ototroflar için maksimum büyüme hızı yalnızca **μmax = 0,2 ile 0,90 gün^{-1}** (tipik **0,75**), verim ise sadece **Y = 0,10 ile 0,15 g UAKM/g azot** (tipik **0,12**)'dir.

Bu sayıların taşıdığı mesaj, biyolojik azot gideriminin tüm tasarım mantığını belirler: **nitrifiye bakteriler heterotroflardan yaklaşık 7 ile 8 kat daha yavaş büyür ve verimleri yaklaşık 5 kat daha düşüktür.** Yavaş büyüyen bir organizmayı bir reaktörde tutabilmenin tek yolu, ona büyümesi için yeterince zaman tanımaktır. İşte "çamur yaşı" (SRT) kavramının neden bu kadar merkezi olduğunun ve nitrifikasyonun neden uzun çamur yaşı gerektirdiğinin kökeni buradadır. Nitrifiye bakteriler ayrıca çevresel koşullara çok daha duyarlıdır: çözünmüş oksijen **0,5 mg/L**'nin altına düştüğünde nitrifikasyon neredeyse tümüyle durur, pH optimum **7,5** bandından uzaklaştığında hız hızla azalır, ve ağır metaller ile toksik bileşikler nitrifiye bakterileri heterotroflardan önce vurur.

Sıcaklık: gizli değişken

Biyolojik hız sıcaklığa güçlü biçimde bağlıdır ve bu ilişki tasarımın en kritik ama en kolay gözden kaçan yönüdür. Genel kural olarak **sıcaklıkta her 10 °C'lik düşüş, biyolojik reaksiyon hızını yaklaşık yarıya indirir.** Matematiksel olarak katsayılar Arrhenius tipi bir düzeltmeyle (kT = k20 · θ^(T−20)) soğuğa göre azaltılır. Nitrifikasyonun büyüme hızı sıcaklığa heterotroflardan daha duyarlıdır; bu yüzden azot giderimli bir tesis, yılın en soğuk günündeki en düşük su sıcaklığına göre tasarlanmalıdır, mevsimsel ortalamaya göre değil. Ortalamaya göre tasarlanan bir tesis, kışın nitrifikasyonu kaybedebilir.

ÖRNEK 2.1 Monod uygulaması

Substrat azalınca büyüme nasıl yavaşlar?

VERİLENLER heterotrof $\mu_{max} = 5$ gün^{-1} $K_s = 60$ mg/L BOİ$_5$

1. Reaktör girişinde (S = 200 mg/L):
$\mu = 5 \times 200 / (60 + 200) = 1000 / 260 \approx$ **3,85 gün^{-1}**

2. Reaktör çıkışında (S = 10 mg/L):
$\mu = 5 \times 10 / (60 + 10) = 50 / 70 \approx$ **0,71 gün^{-1}**

SONUÇ **Büyüme hızı giriş→çıkış boyunca yaklaşık 5 kat düşer (3,85 → 0,71 gün^{-1})**

YORUM *Substrat tükendikçe büyüme, dolayısıyla giderim yavaşlar. Bu yüzden çıkıştaki son birkaç miligramı gidermek, ilk yüz miligramdan çok daha zordur ve yüksek arıtma verimi orantısız biçimde daha büyük reaktör ile daha uzun çamur yaşı ister.*

Bu duyarlılık, biyolojik arıtmanın neden basit bir "kirlilik giderme kutusu" gibi değil, canlı bir kültür gibi yönetilmesi gerektiğini gösterir. Sıcaklık, pH ve toksik yük aynı anda uygun olmalıdır: alkalinite tükenip pH 6,5'in altına düştüğünde nitrifikasyon durur; ağır metaller, çözücüler veya yüksek tuzluluk gibi toksik şoklar nitrifiye bakterileri heterotroflardan önce vurur ve bir kez kaybedilen nitrifikasyon topluluğunun yeniden kurulması, yavaş büyüme nedeniyle günler alır. İşte bu yüzden bir arıtma tesisi, giriş suyunu sürekli izleyen ve endüstriyel deşarjları denetleyen bir ön savunma hattına ihtiyaç duyar; canlı çamuru korumak, onu yeniden yetiştirmekten çok daha kolaydır.

KİLİT MESAJ

Monod denklemi, bir reaktörün boyutunu belirleyen köprüdür: mikroorganizmaların büyüme hızını sudaki kirlilik derişimine bağlar. Nitrifiye bakterilerin heterotroflardan 7 ile 8 kat yavaş büyümesi, biyolojik azot gideriminin neden uzun çamur yaşı, ılık sıcaklık ve yeterli oksijen istediğini tek başına açıklar.

2.4 Aktif Çamur Prosesi: Sistemin Anatomisi

Biyolojik arıtmanın dünyada en yaygın uygulanan biçimi, 1914'te İngiltere'de geliştirilen **aktif çamur prosesidir**. Türkiye'de de tesis sayısında baskın olan yöntem budur. Adındaki "aktif" sözcüğü, sürekli geri devir ettirilerek canlı ve yoğun tutulan mikroorganizma kütlesine işaret eder. Yüz yılı aşkın süredir dünyada en çok kurulan biyolojik arıtma yöntemi olması tesadüf değildir: nispeten basit, esnek ve iyi anlaşılmış bir sistemdir ve doğru işletildiğinde giriş BOİ'sinin **%90'ından fazlasını** giderir. Sistem,

ilk bakışta sade görünen ama her bileşeni bir tasarım parametresine karşılık gelen bir döngüden oluşur.

Döngünün anatomisi

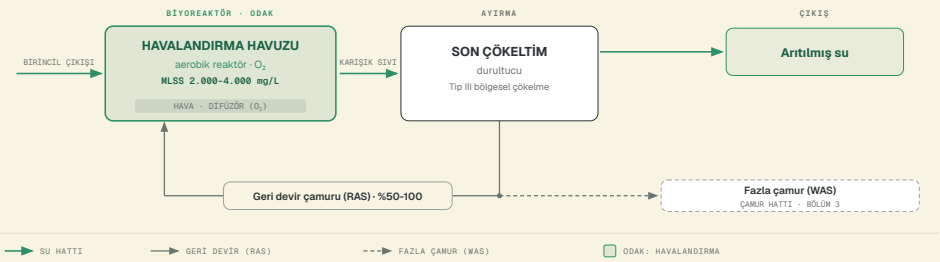
Aktif çamur prosesi iki ana üniteden ve onları birbirine bağlayan bir geri devir hattından oluşur:

- **Havalandırma havuzu (biyoreaktör):** Birincil çökeltimden gelen atıksu, yoğun mikroorganizma kütlesiyle karıştırılır ve tabandan üflenen havayla sürekli oksijenlendirilir. Mikroorganizmalar burada çözünmüş organik maddeyi tüketip çoğalır. Havuzdaki bu karışıma **karışık sıvı askıda katı madde (MLSS)** denir.
- **Son çökeltim havuzu (durultucu):** Havalandırma havuzundan çıkan karışım buraya gelir; hava kesildiği için mikroorganizma flokları yerçekimiyle dibe çöker ve berrak arıtılmış su üstten alınır. Birinci bölümdeki çökelme tiplerinden **Tip III (bölgesel çökelme)** tam olarak burada iş başındadır: floklar tek tek değil, bir battaniye gibi topluca çöker.
- **Geri devir (RAS) ve fazla çamur (WAS):** Dibe çöken yoğun çamurun büyük bölümü havalandırma havuzuna **geri devir ettirilir**; böylece reaktördeki mikroorganizma kütlesi yüksek ve sabit tutulur. Büyüme nedeniyle sürekli artan kütlenin fazlası ise **fazla çamur** olarak sistemden atılır. İşte bu atılan fazla çamur, kirliliğin sistemden nihai olarak uzaklaştırıldığı noktadır.

ŞEKİL 2.4

Aktif Çamur Prosesinin Anatomisi

Havalandırma havuzu, son çökeltim ve geri devir döngüsü: su saatlerce (HRT), mikroorganizmalar günlerce (çamur yaşı) tutulur.

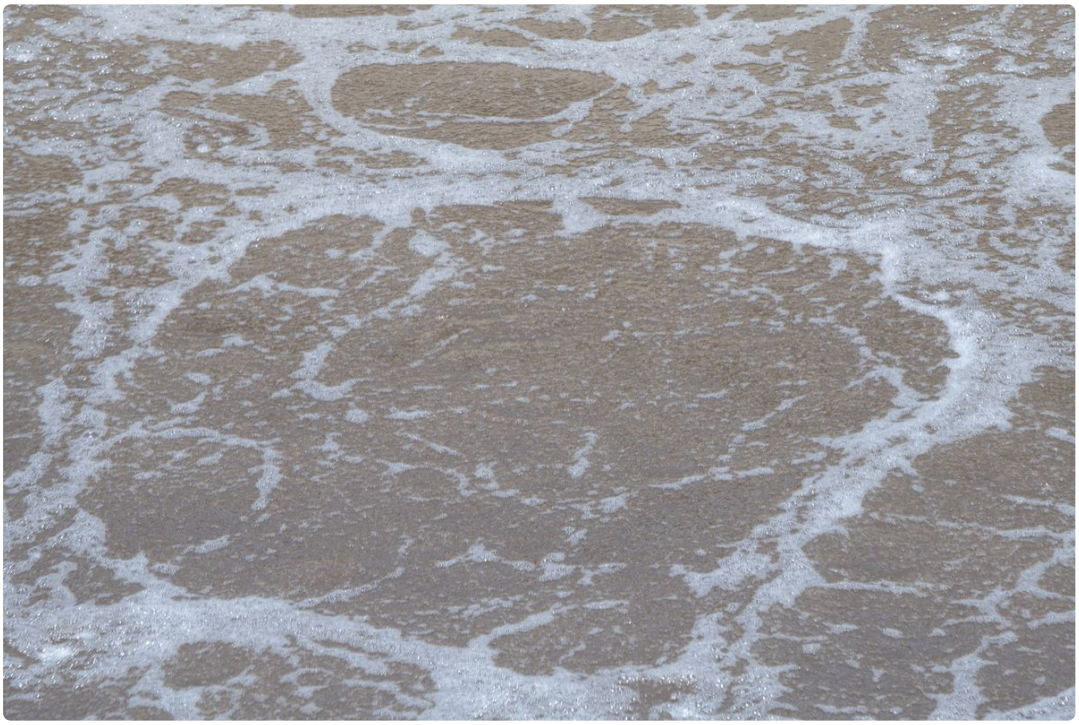


Döngünün zarafeti: geri devir sayesinde su birkaç saatte sistemden geçerken (HRT), mikroorganizmalar günlerce tutulur (çamur yaşı). Büyüme nedeniyle artan kütlenin fazlası fazla çamur (WAS) olarak atılır; kirliliğin sistemden nihai uzaklaştığı nokta burasıdır.

Bu döngünün zarafeti, iki bekleme süresini birbirinden ayırabilmesindedir. Suyun reaktörde kaldığı süre (hidrolik bekleme süresi, HRT) ile mikroorganizmaların sistemde kaldığı süre (çamur yaşı, SRT) farklıdır. Geri devir sayesinde su birkaç saatte sistemden geçerken, mikroorganizmalar günlerce hatta haftalarca tutulabilir. Bu ayrım, biyolojik arıtma tasarımının temel dayanağıdır.

MLSS ve MLVSS: reaktördeki kütlenin ölçüsü

Havalandırma havuzundaki toplam askıda katı derişimi **MLSS**, bunun organik (uçucu) kısmı ise **MLVSS** olarak ölçülür. Asıl "canlı ve aktif" biyokütleyi temsil eden MLVSS'tir ve tipik olarak MLSS'in **%70 ile %85'i** kadardır. Konvansiyonel aktif çamurda MLSS **1.500 ile 3.000 mg/L**, uzun havalandırmada **3.000 ile 6.000 mg/L** bandında tutulur (Metcalf & Eddy). Daha yüksek MLSS, aynı hacimde daha çok mikroorganizma, yani daha çok arıtma kapasitesi demektir; ancak MLSS arttıkça son çökeltim havuzunun çökeltme yükü de artar, bu yüzden bir üst sınır vardır. Membran biyoreaktörlerin (MBR) bu sınırı nasıl aştığı ilerideki bölümde ele alınıyor.



Çamur yaşı (SRT): en kritik tek parametre

Bir aktif çamur tesisini tanımlayan tek bir sayı seçilecek olsaydı, bu **çamur yaşı (SRT)** olurdu. SRT, bir mikroorganizmanın ortalama olarak sistemde kaç gün kaldığını, yani reaktördeki toplam biyokütlenin günlük atılan biyokütleye oranını verir.

DENKLEM 2.2 · ÇAMUR YAŞI (SRT) · EN KRİTİK TASARIM PARAMETRESİ

$$SRT = \frac{V \cdot X}{Q_a \cdot X_a} \qquad (2.2)$$

BURADA

- SRT (θ_c) çamur yaşı (gün)
- V reaktör hacmi (m^3)
- X reaktör biyokütlesi, MLVSS (mg/L)
- Q_a fazla çamur debisi (m^3/gün)
- X_a atılan çamur derişimi (mg/L)

*SRT, reaktördeki toplam biyokütlenin günde atılana oranıdır; bir mikroorganizmanın sistemde ortalama kaç gün kaldığını verir. Hangi türlerin tutunacağını seçer: nitrifikasyon için tipik olarak **11-14 gün** gerekir, altında yavaş nitrifiye bakteriler yıkanıp gider.*

SRT'nin bu kadar merkezi olmasının nedeni, sistemdeki mikroorganizma topluluğunu doğrudan seçmesidir. Bir mikroorganizmanın sistemde tutunabilmesi için, atılma hızından daha hızlı büyümesi gerekir. Kısa SRT'de yalnızca hızlı büyüyen heterotroflar tutunur; SRT uzadıkça yavaş büyüyen nitrifiye bakteriler de sistemde kalabilir. Nitrifiye bakterilerin **μmax ≈ 0,75 gün^{-1}** değerinden hareketle, teorik minimum çamur yaşı kabaca 1/μmax, yani birkaç gündür; bu değerin altında nitrifiye bakteriler **yıkanıp gider (washout)**. Pratikte nitrifikasyon için havalandırma havuzu **6 günden büyük** bir çamur yaşına, üstüne bir emniyet katsayısı (SF = 1,5 ile 2,0) uygulanarak **11 ile 14 gün** arası bir tasarım SRT'sine göre boyutlandırılır. ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (EPA) Besin Kontrolü el kitabı, debideki dalgalanmalara karşı bazı hesaplarda emniyet katsayısını **3,0**'a kadar çıkarır.

Çamur yaşı proses türünü de tanımlar: konvansiyonel aktif çamur **5 ile 15 gün**, uzun havalandırma ve oksidasyon hendeği ise **20 ile 30 gün** aralığında işletilir. Uzun çamur yaşı, daha stabil bir çamur, daha iyi nitrifikasyon ve daha az fazla çamur üretimi anlamına gelir; bedeli ise daha büyük reaktör hacmi ve daha yüksek oksijen ihtiyacıdır.

Besin/mikroorganizma oranı (F/M): reaktörün iştahı

Çamur yaşının işletme tarafındaki karşılığı **besin/mikroorganizma (F/M) oranıdır**. F/M, sisteme günde giren organik madde yükünün (besin, F) reaktördeki toplam aktif biyokütleye (mikroorganizma, M) oranıdır; yani her bir kilogram mikroorganizmanın günde kaç kilogram BOİ ile beslendiğini söyler.

DENKLEM 2.3 · BESİN/MİKROORGANİZMA ORANI (F/M)

$$F/M = \frac{Q \cdot S_0}{V \cdot X} \quad (2.3)$$

BURADA

- F/M besin/mikroorganizma oranı (kg $BOİ_5$/kg MLVSS·gün)
- Q giriş debisi (m^3/gün)
- S_0 giriş $BOİ_5$ derişimi (mg/L)
- V havalandırma havuzu hacmi (m^3)
- X reaktör biyokütlesi, MLVSS (mg/L)

*F/M, her kilogram mikroorganizmanın günde kaç kilogram BOİ ile beslendiğini söyler ve çamur yaşının aynasıdır: yüksek F/M (bol besin, az mikroorganizma) düşük çamur yaşına, düşük F/M yüksek çamur yaşına karşılık gelir. Konvansiyonel: **0,2-0,4**; uzun havalandırma: **0,05-0,15**.*

F/M ve SRT birbirinin aynası gibidir: yüksek F/M (bol besin, az mikroorganizma) düşük çamur yaşına, düşük F/M (az besin, çok mikroorganizma) yüksek çamur yaşına karşılık gelir. Konvansiyonel aktif çamurda F/M tipik olarak **0,2 ile 0,4 kg $BOİ_5$/kg MLVSS·gün**, uzun havalandırmada ise çok daha düşük, **0,05 ile 0,15** aralığındadır (Metcalf & Eddy). Düşük F/M'de mikroorganizmalar besin kıtlığı çeker, kendi rezervlerini tüketir (içsel solunum baskındır) ve sonuçta daha az ama daha stabil çamur üretilir. F/M paydasının MLVSS mi MLSS mi olduğu her zaman belirtilmelidir; bu rehberde standart olan **MLVSS** kullanılıyor.

Hidrolik bekleme ve geri devir

Havalandırma havuzunun hidrolik bekleme süresi (HRT), su hacminin debiye oranıdır ve konvansiyonel sistemlerde tipik olarak **4 ile 8 saat**tir. Geri devir oranı (RAS, geri devir debisinin giriş debisine oranı) ise büyük sistemlerde **%50 ile %100**, küçük sistemlerde **%150**'ye kadar çıkar. Geri devir oranı doğrudan son çökeltim havuzunun çamuru ne kadar yoğunlaştırabildiğine bağlıdır; bu da bir sonraki bölümde ele alınan çamurun çökelebilirliğiyle, yani SVI ile ilişkilidir.

Bir havalandırma havuzu boyutlandırma

Bu parametrelerin nasıl birlikte çalıştığını somut bir tasarım hesabıyla görmek en açıklayıcı yoldur. Aşağıdaki çözümlü örnek, bir çamur yaşı seçiminden başlayarak reaktör hacmini, bekleme süresini, fazla çamuru ve oksijen ihtiyacını Metcalf & Eddy denklemleriyle adım adım kurar.

ÖRNEK 2.2 aktif çamur boyutlandırma

Havalandırma havuzunu adım adım boyutlandırmak

VERİLENLER $Q = 10.000\ m^3/gün$ $S_0 = 250\ mg/L$ $S = 10\ mg/L$ $SRT = 10\ gün$
$X = 3.000\ mg/L$ (MLVSS) $Y = 0,6$ $k_d = 0,06\ gün^{-1}$ $f = 0,68$

1. Biyokütle envanteri: $V{\cdot}X = SRT{\cdot}Q{\cdot}Y(S_0-S) / (1+k_d{\cdot}SRT) = 10{\cdot}10.000{\cdot}0,6{\cdot}240 / 1,6 =$ **9.000 kg** VSS

2. Hacim: $V = 9.000.000\ g \div 3.000\ g/m^3 =$ **3.000 m³**

3. Bekleme süresi: $HRT = V/Q = 3.000/10.000 = 0,30$ gün = **7,2 saat** (konvansiyonel 4-8 s ✓)

4. Kontrol, F/M: $Q{\cdot}S_0 / (V{\cdot}X) = 2.500.000 / 9.000.000 =$ **0,28 gün⁻¹** (0,2-0,4 ✓)

5. Fazla çamur: $Y_{gözlenen} = 0,6/1,6 = 0,375 \rightarrow P_x = 0,375{\cdot}10.000{\cdot}240/1000 =$ **900 kg/gün**

6. Oksijen (karbonlu): $2.400/0,68 - 1,42{\cdot}900 = 3.529 - 1.278 \approx$ **2.250 kg O_2/gün**

7. Geri devir: $Q_r/Q = X/(X_r-X) = 3.000/7.000 \approx$ **0,43** (0,25-0,75 ✓)

SONUÇ

V ≈ 3.000 m³ · HRT 7,2 saat · F/M 0,28 · fazla çamur ~900 kg/gün · O_2 ~2.250 kg/gün

YORUM *Tek bir çamur yaşı seçimi (10 gün) hacmi, bekleme süresini ve F/M'yi aynı anda belirledi ve tüm ara sonuçlar konvansiyonel aktif çamur bandına düştü. Tasarımın "sanatı", bu birbirine bağlı değişkenleri tutarlı bir noktada dengelemektir.*

Bu hesabın çıktıları, seçilen tüm ara değerlerin birbirini nasıl doğruladığını gösterir: bir tek çamur yaşı seçimi, hacmi, bekleme süresini ve F/M'yi aynı anda belirler ve hepsi tabloların konvansiyonel bandına düşer. Tasarımın "sanatı", bu birbirine bağlı değişkenleri tutarlı bir noktada dengelemektir.

Gözlenen verim ve fazla çamur üretimi

Bir tesisin günde ne kadar fazla çamur üreteceği, hem işletme maliyetini hem de serinin üçüncü bölümünde ele alınacak çamur hattının boyutunu belirler. Teorik verim Y, içsel solunum nedeniyle hiçbir zaman tam olarak gerçekleşmez; sahada asıl önemli olan **gözlenen (net) verim** Yobs'tur ve çamur yaşıyla ters orantılıdır: `Yobs = Y / (1 + kd · SRT)`. Çamur yaşı uzadıkça gözlenen verim düşer, çünkü mikro-organizmalar daha uzun süre kendi rezervlerini ve birbirini tüketir. Bu yüzden uzun havalandırma, konvansiyonel sisteme göre belirgin biçimde **daha az fazla çamur** üretir; bu, uzun havalandırmanın büyük reaktör bedeline karşılık sunduğu en önemli avantajlardan biridir. Günlük fazla çamur kütlesi `Px = Yobs · Q · (So − S)` ile bulunur ve bir tesisin çamur yoğunlaştırma, susuzlaştırma ve bertaraf ünitelerinin tamamı bu sayının üstüne kurulur.

İşletmenin kaldıraçları: SRT ve F/M nasıl ayarlanır

Bütün bu denklemler, bir işletmecinin elinde iki somut vanaya iner: geri devir (RAS) ve fazla çamur (WAS) pompaları. **Fazla çamur debisini artırmak** sistemden daha çok biyokütle atar, yani çamur yaşını kısaltır, çamuru gençleştirir ve F/M'yi yükseltir; debiyi azaltmak ise çamur yaşını uzatır. **Geri devir debisi** ise havalandırma havuzundaki MLSS derişimini ve son çökeltim havuzundaki çamur battaniyesinin seviyesini korumaya yarar. Bir işletmeci bu iki vanayı, üç günlük göstergeyi izleyerek ayarlar: reaktördeki MLSS, çamurun çökelebilirliğini veren SVI ve havalandırmadaki çözünmüş oksijen. Örneğin nitrifikasyonun kaybolmaya başladığı bir kışta doğru tepki, fazla çamur atımını azaltıp çamur yaşını uzatmak, yani yavaş büyüyen nitrifiye bakterilere daha çok zaman tanımaktır. Biyolojik arıtmanın "canlı" bir süreç olması tam da budur: tasarım hesabı reaktörü kurar, ama onu her gün ayakta tutan şey bu işletme kararlarıdır.

KİLİT MESAJ

Aktif çamur prosesinin sırrı, suyun bekleme süresi (HRT, saatler) ile mikroorganizmaların bekleme süresini (çamur yaşı, günler) geri devir sayesinde birbirinden ayırabilmesidir. Çamur yaşı hangi mikroorganizmaların sistemde tutunacağını seçer; bu yüzden bir tesisin ne yapabileceğini (yalnızca BOİ mi, yoksa azot da mı giderir) belirleyen tek en kritik parametredir.

2.5 Oksijen ve Aerasyon: Görünmeyen En Büyük Gider Kalemi

Aerobik biyolojik arıtma oksijene dayanır ve bu oksijeni suya aktarmak, bir arıtma tesisinin en pahalı işidir. Havalandırma, tipik bir aktif çamur tesisinde **tüm elektrik tüketiminin yaklaşık %50 ile %60'ını** tek başına yer (ACEEE/EPA verisi). Bu yüzden oksijen ihtiyacını doğru hesaplamak ve havayı verimli aktarmak, hem mühendislik hem ekonomi meselesidir.

Oksijen ihtiyacı nasıl hesaplanır

Bir reaktörün günlük oksijen ihtiyacı üç bileşenden oluşur: organik maddenin oksitlenmesi, içsel solunum ve (varsa) nitrifikasyon.

DENKLEM 2.4 · OKSİJEN İHTİYACI · KARBONLU GİDERİM + NİTRİFİKASYON

$$R_{O_2} = \frac{Q\,(S_0 - S)}{f} - 1{,}42\,P_x + 4{,}57\,Q\,(N_0 - N) \qquad (2.4)$$

BURADA

- R_{O_2} oksijen ihtiyacı (kg O_2/gün)
- Q debi (m^3/gün)
- S_0, S giriş/çıkış $BOİ_5$ (mg/L)
- f $BOİ_5$ → nihai BOİ faktörü (~0,45-0,68)
- P_x üretilen fazla biyokütle (kg/gün)
- N_0, N giriş/çıkış TKN, azot (mg/L)

*İlk terim karbonlu oksidasyon, ikinci terim hücreye bağlanıp o gün yakılmayan payın düşülmesi, üçüncü terim nitrifikasyondur. **4,57 g O_2/g azot** katsayısı, azot giderimli bir tesisin havalandırma faturasının neden belirgin arttığını açıklar.*

Denklemin mantığı kütle korunumundan gelir. Giren organik maddenin oksijen eşdeğerinden, yeni hücrelere bağlanan (dolayısıyla o gün yakılmayan) kısım çıkarılır; nitrifikasyon varsa, amonyağın oksitlenmesi için gereken oksijen eklenir. Burada birinci bölümde ve önceki kısımda tanımlanan iki katsayı yeniden karşımıza çıkar: hücrenin oksijen eşdeğeri **1,42** ve amonyak azotunun tam oksidasyonu için gereken **4,57 g O_2/g azot**. Nitrifikasyonun bu yüksek oksijen bedeli (bir gram azot için yaklaşık dört buçuk gram oksijen), azot gideren bir tesisin havalandırma maliyetinin neden belirgin arttığını açıklar. WEF'in ön tasarım kuralları da bu değerleri doğrular: karbonlu giderim için giderilen BOİ başına **0,9 ile 1,3 kg oksijen**, nitrifikasyon için azot başına **4,6 kg oksijen**.

Havayı suya aktarmanın verimi: alfa ve beta faktörleri

Oksijen ihtiyacını hesaplamak yarım iştir; asıl zorluk, o oksijeni gerçekten suya geçirmektir. Bir difüzörden çıkan hava kabarcıklarının içindeki oksijenin ancak küçük bir kısmı suda çözünür. Bu verim, temiz suda ölçülen standart değerden (SOTR) yola çıkılıp bir dizi düzeltme faktörüyle saha koşuluna (AOTR) indirgenerek hesaplanır (WEF Aerasyon Tasarımı el kitabı).

Bu düzeltmelerin en önemlisi **alfa (α) faktörüdür**: atıksuyun oksijen aktarımını temiz suya göre ne kadar düşürdüğünü gösterir. Alfa, atıksudaki yüzey aktif maddeler ve kirlilik nedeniyle genellikle **1'den küçüktür**; WEF genel bandı **0,3 ile 1,0**, ince kabarcıklı difüzörlerde pratikte **0,3 ile 0,7** arasıdır. Buna kirlenme/tıkanma faktörü (F) ve tuzluluk düzeltmesi (beta, β ≈ 0,95 ile 0,98) eklenir. Alfa faktörünün düşük olması, hesaplanan teorik oksijenin çok üstünde hava üflenmesi gerektiği anlamına gelir; ve üflenen her fazla metreküp hava, doğrudan elektrik faturasına yansır. İşte havalandırma tasarımının ekonomik kalbi budur.

Difüzör verimini artıran bir başka etken derinliktir: kabarcık ne kadar derinden yükselirse suyla o kadar uzun temas eder ve daha çok oksijen çözünür. İnce kabarcıklı difüz

örlerde standart oksijen aktarım verimi, batırma derinliğinin her metresi başına yaklaşık %6 ile %7 mertebesindeyken, kaba kabarcıklı sistemlerde bu değerin yarısından azdır. Bu yüzden derin havalandırma havuzları ince kabarcıklı difüzörle birleştiğinde en verimli sonucu verir; ancak derinlik arttıkça üfleyicinin yenmesi gereken basınç da arttığından, tasarım burada da bir optimum arar.

Difüzör mü, yüzey aeratörü mü

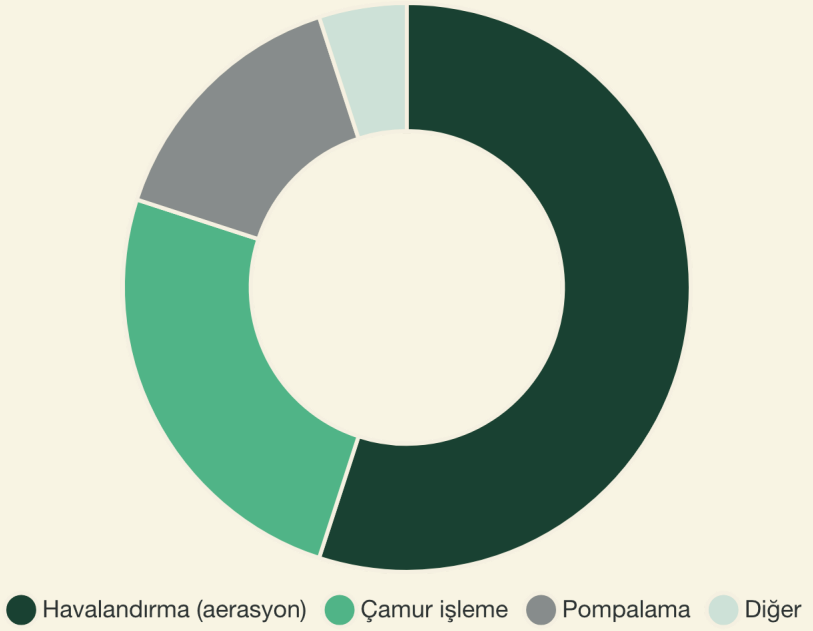
Havayı suya vermenin iki ana yolu vardır: tabana yerleştirilen difüzörlerden ince kabarcıklar üflemek veya yüzeyde mekanik aeratörlerle suyu havayla çalkalamak. **İnce kabarcıklı difüzörler** en yüksek aktarım verimini sunar (kilovatsaat başına yaklaşık **1,2 ile 2,0 kg oksijen**) ve derinlikle verimleri artar; kaba kabarcıklı sistemler ve yüzey aeratörleri daha basit ama daha az verimlidir. Aerasyonun enerji payının bu kadar büyük olması, son yıllarda ince kabarcıklı difüzörlere, yüksek verimli üfleyicilere ve çözünmüş oksijeni gerçek zamanlı ayarlayan otomatik kontrol sistemlerine yönelimi hızlandırdı; bu iyileştirmeler havalandırma enerjisini **%20 ile %40** azaltabiliyor (Springer, 2025).

Havanın gerçek maliyetini somut kılan bir kural, giderilen birim BOİ başına üflenmesi gereken hava hacmidir. Metcalf & Eddy verilerine göre bu miktar, yüksek F/M'li ince kabarcıklı bir sistemde giderilen kilogram BOİ başına yaklaşık **24 ile 36 m^3** iken, düşük F/M'li (içsel solunum ve nitrifikasyonun baskın olduğu) bir sistemde **75 ile 115 m^3**'e çıkar; tipik bir konvansiyonel tesiste yaklaşık 93,5 m^3, uzun havalandırmada ise 125 m^3 mertebesindedir. Yani daha ileri arıtma (daha düşük F/M) her zaman daha çok hava, dolayısıyla daha çok enerji ister. Debi ve yük gün içinde ikiye üçe katlandığı için, sabit hızlı bir üfleyici çoğu saat gereğinden fazla hava basar; değişken hızlı üfleyiciye geçmek ve havayı çözünmüş oksijene göre otomatik ayarlamak, tek başına belirgin bir enerji tasarrufu sağlar.

ŞEKİL 2.5

Bir Arıtma Tesisi Elektriğini Nereye Harcar?

Tipik aktif çamur tesisi enerji dağılımı (yaklaşık)



Havalandırma tek başına elektriğin yaklaşık **%50-60'ını** yer; bu yüzden difüzör verimi ve α faktörü seçimi, bir tesisin işletme maliyetinin ekonomik kalbidir. Yüzdeler yaklaşık değerlerdir, tesis türüne göre değişir.

UZMAN NOTU

Havalandırmadaki çözünmüş oksijen hedefi tarihsel olarak 2 mg/L alınır; bunun üstüne çıkmak arıtmayı iyileştirmez, yalnızca enerji harcar. Ancak oksijeni fazla düşürmek de risklidir: 0,5 mg/L altında nitrifikasyon durur. Üstelik güncel araştırmalar, oksijeni akıllıca düşürmenin hem enerjiyi hem de güçlü bir sera gazı olan diazot monoksit (N_2O) emisyonunu birlikte azaltabildiğini gösteriyor; bu "çift kazanç" konusuna Türkiye ve sürdürülebilirlik bölümünde dönülüyor.

2.6 Son Çökeltim ve Çamurun Çökelebilirliği

Aktif çamur prosesinin başarısı, çoğu zaman havalandırma havuzunda değil, son çökeltim havuzunda kazanılır veya kaybedilir. Çünkü mikroorganizmalar organik maddeyi ne kadar iyi tüketirse tüketsin, eğer üretilen biyokütle sudan iyi ayrılamazsa, çökemeyen floklar çıkış suyuyla birlikte alıcı ortama kaçar ve tesis deşarj standardını tutturamaz. Son çökeltim, biyolojik arıtmanın "sessiz" ama belirleyici adımıdır.

İkincil çökeltimin farkı

Birinci bölümdeki birincil çökeltimden farklı olarak, son çökeltim havuzuna gelen katı derişimi çok yüksektir (birkaç bin mg/L). Bu yoğunlukta floklar birbirinden bağımsız değil, topluca çöker; yani birinci bölümde tanımlanan **Tip III bölgesel çökelme** ve tabana yakın **Tip IV sıkışma çökelmesi** rejimleri hâkimdir. Bu yüzden son çökeltim havuzu yalnızca berraklaştırma değil, aynı zamanda **çamur yoğunlaştırma** işlevi görür: dibe çöken çamur ne kadar yoğunlaşırsa, geri devir o kadar etkili olur.



Fotoğraf: Vraj Acharya, WELL Labs / Wikimedia Commons (CC BY-SA 4.0)

Çamur Hacim İndeksi (SVI): çökelme kalitesinin karnesi

Çamurun ne kadar iyi çöktüğünü ölçen standart gösterge **Çamur Hacim İndeksi (SVI)**'dir. Tanımı basittir: bir litre karışık sıvı 30 dakika dinlendirildiğinde çöken çamurun kapladığı hacmin, o çamurun kütlesine oranıdır.

DENKLEM 2.5 · ÇAMUR HACİM İNDEKSİ (SVI) · ÇÖKELME KALİTESİ

$$SVI = \frac{V_{30} \times 1000}{\mathrm{MLSS}} \tag{2.5}$$

BURADA

- SVI çamur hacim indeksi (mL/g)
- V_{30} 30 dakikada çöken çamur hacmi (mL/L)
- $MLSS$ karışık sıvı askıda katı (mg/L)

Bir gram çamurun 30 dakikada kapladığı hacim. Dört bölge: ***80-150*** *mL/g sağlıklı;* ***>150*** *şişkin eğilimi;* ***≥200*** *belirgin şişkinlik;* ***<50*** *aşırı yaşlı, iğnebaşı flok. Yüksek SVI, daha yüksek geri devir oranı gerektirir.*

SVI'nin yorumu dört bölgeye ayrılır. **80 ile 150 mL/g** arası sağlıklı, iyi çöken bir çamuru gösterir. **150'nin üstü** kötü çökmeye, şişkin çamur eğilimine işaret eder;

200'ün üstü belirgin bir şişkinlik sorunudur. İlginç biçimde, SVI'nin **50'nin altına** düşmesi de istenmeyen bir durumdur: bu, aşırı yaşlanmış, iğnebaşı flok oluşturan ve bulanık bir süpernatan bırakan bir çamurun işaretidir. SVI ile geri devir tasarımı da doğrudan bağlıdır: yüksek SVI, çamurun az yoğunlaşması, dolayısıyla daha yüksek geri devir oranı gereksinimi demektir.

Şişkin çamur: en yaygın işletme sorunu

Aktif çamur işletmesinin klasik kâbusu **şişkin çamurdur (bulking)**. İpliksi (filament) bakterilerin aşırı çoğalıp floklar arasında bir ağ örmesiyle çamur gevşer, kabarır ve bir türlü çökmez. Şişkin çamurun sinsi yanı, çıkış suyunun genellikle çok berrak görünmesidir; ama çamur son çökeltimde tutulamadığı için katılar yavaş yavaş sisteme kaçar ve deşarjı bozar. Başlıca tetikleyicileri havalandırmada düşük çözünmüş oksijen, düşük F/M oranı, azot veya fosfor eksikliği ve septik (çürümüş) giriş suyudur.

En yaygın kontrol yöntemi bir **selektör** kullanmaktır: havalandırma havuzunun girişine, yüksek F/M'li küçük bir temas bölgesi (10 ile 30 dakika bekleme süreli) eklenir. Bu bölgede iyi floklaşan bakteriler ipliksilere karşı rekabet üstünlüğü kazanır ve ipliksilerin baskın hâle gelmesi engellenir. Şişkin çamur örneği, biyolojik arıtmanın neden sürekli izleme ve mikrobiyolojik anlayış gerektiren "canlı" bir süreç olduğunun en iyi kanıtıdır.

Köpük ve çökelmenin öbür yüzü

Şişkin çamurun yakın akrabası bir başka işletme sorunu **biyolojik köpüktür**. Genellikle Nocardia türü ipliksi bakterilerin yüzeyde kalın, kahverengi, kararlı bir köpük tabakası oluşturmasıyla ortaya çıkar; bu köpük hem estetik bir sorun hem de operasyonel bir risktir. Öte yandan iyi çöken bir çamurda bile son çökeltim havuzunun tabanında **Tip IV sıkışma çökelmesi** işler: çöken çamur kendi ağırlığıyla sıkışarak yoğunlaşır ve geri devir hattına daha yüksek derişimde beslenir. Bir işletmecinin son çökeltim havuzunda izlediği "çamur battaniyesi seviyesi" tam da bu sıkışma bölgesinin ne kadar iyi çalıştığının göstergesidir; battaniye yükselirse çamur kaçışı, aşırı alçalırsa geri devir çamurunun seyrelmesi riski doğar.

KİLİT MESAJ

Bir aktif çamur tesisi çoğu zaman havalandırma havuzunda değil son çökeltim havuzunda kazanır ya da kaybeder. Mikroorganizmalar kirliliği ne kadar iyi tüketirse tüketsin, üretilen biyokütle iyi çökmezse arıtılmış suyla kaçar; bu yüzden çamurun çökelebilirliği (SVI) en az giderim verimi kadar önemlidir.

2.7 Aktif Çamurun Çeşitleri

Aktif çamur prosesi tek bir reçete değil, ortak ilkelere dayanan bir aileler topluluğudur. Aynı temel döngü (havalandırma, çökeltim, geri devir) farklı çamur yaşları, farklı besleme düzenleri ve farklı havuz geometrileriyle uygulanınca, birbirinden belirgin ayrılan proses tipleri ortaya çıkar. Seçim; debiye, arazi kısıtına, istenen çıkış kalitesine ve işletme kapasitesine göre yapılır.

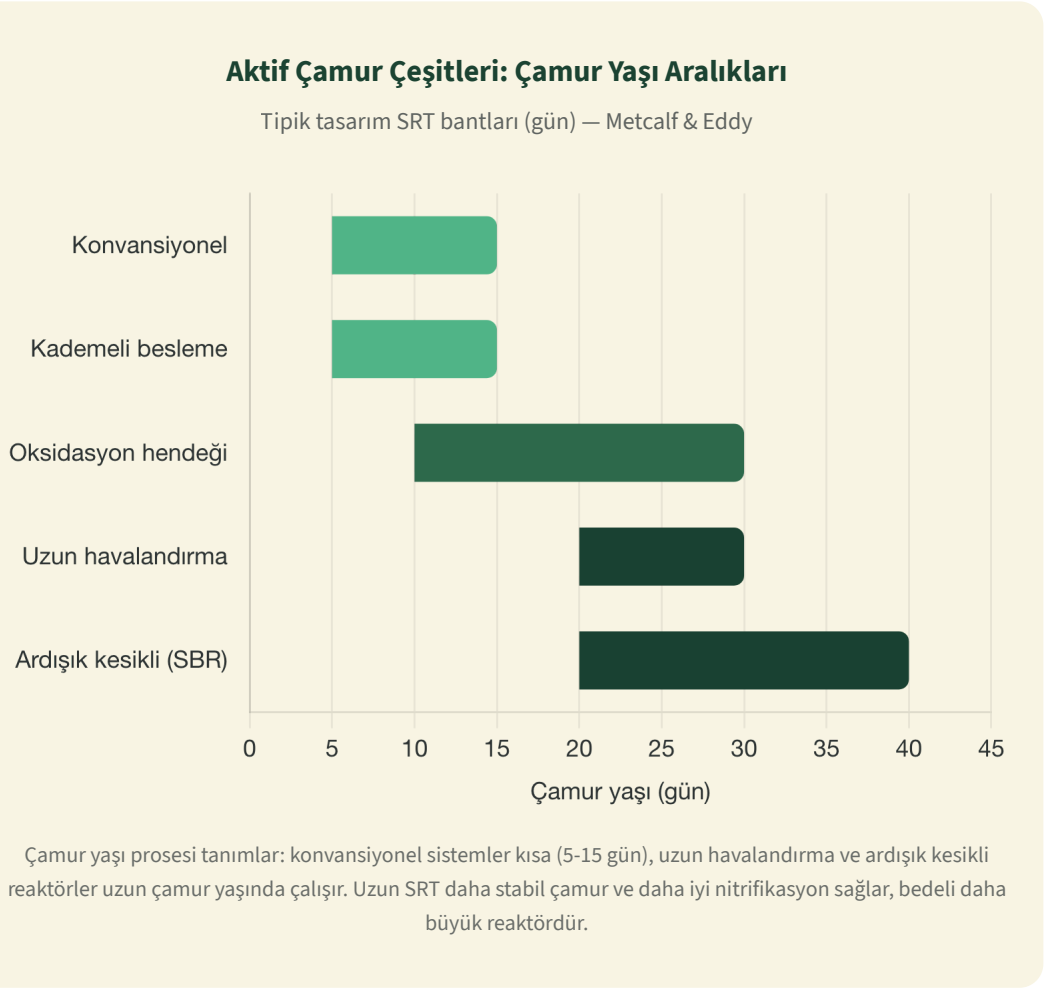
- **Konvansiyonel (piston akışlı):** En klasik biçim. Atıksu havuzun bir ucundan girer, diğer ucuna doğru bir "piston" gibi ilerler; girişte besin bol, çıkışta seyrektir. Çamur yaşı **5 ile 15 gün**, F/M **0,2 ile 0,4**. Verimli ama şok yüklere ve giriş dalgalanmalarına orta derecede duyarlıdır.
- **Tam karışımlı:** Havuz içeriği her noktada aynıdır; giren yük anında seyreltilir, bu da tesisi toksik şoklara ve ani yük artışlarına karşı dayanıklı kılar. Endüstriyel atıksularda sıkça tercih edilir.
- **Kademeli besleme (step feed):** Atıksu havuza tek noktadan değil, boyunca birkaç noktadan verilir. Böylece oksijen ihtiyacı havuz boyunca dengelenir ve pik oksijen talebi düşer.
- **Uzun havalandırma:** Çok düşük F/M (**0,05 ile 0,15**) ve uzun çamur yaşı (**20 ile 30 gün**) ile çalışır. Çok stabil bir çamur, mükemmel nitrifikasyon (BOİ giderimi %97 ile %98) ve az fazla çamur üretir; bedeli büyük hacim ve yüksek enerjidir. Küçük ve orta yerleşimlerde, birincil çökeltimsiz kurulabildiği için yaygındır.
- **Oksidasyon hendeği:** Uzun havalandırmanın oval bir hendekte, yatay rotorlarla uygulanan biçimi. Su hendek boyunca **0,3 ile 0,4 m/s** hızla döner; hem havalandırma hem karıştırma tek ekipmanla sağlanır. Bir turun bazı bölgelerinde oksijen tükendiği için doğal bir anoksik bölge oluşur ve kısmi denitrifikasyon sağlar.
- **Ardışık kesikli reaktör (SBR):** Belki de en zarif varyasyon. Ayrı havalandırma ve çökeltim havuzları yerine, tüm adımlar tek bir tankta zaman içinde sırayla gerçekleşir: doldurma, reaksiyon (havalandırma), çökeltme, boşaltma ve dinlenme. EPA fact sheet verisine göre tipik bir çevrim **3 ile 4 saat** sürer ve bu sürenin kabaca yarısı havalandırmaya, dörtte biri çökeltmeye, dörtte biri boşaltmaya ayrılır. Çökeltim aynı tankta yapıldığı için ayrı durultucuya ve geri devir pompasına gerek kalmaz; çevrim fazlarını ayarlayarak aynı tankta anaerobik, anoksik ve aerobik koşullar yaratılabildiği için azot ve fosfor giderimine çok uygundur.

Aşağıdaki tablo, başlıca varyasyonların tasarım parametrelerini bir arada karşılaştırıyor (Metcalf & Eddy, Tablo 5.11 esas alınmıştır; F/M paydası MLVSS).

TABLO 2.1

Proses tipi	Çamur yaşı SRT (gün)	F/M (kg $BOİ_5$/kg MLVSS·gün)	MLSS (mg/L)	HRT (saat)	Öne çıkan özellik
Konvansiyonel (piston)	5–15	0,2–0,4	1.500–3.000	4–8	Klasik, dengeli
Tam karışımlı	5–15	0,2–0,6	2.500–4.000	3–5	Şok yüke dayanıklı
Kademeli besleme	5–15	0,2–0,4	2.000–3.500	3–5	Dengeli oksijen talebi
Uzun havalandırma	20–30	0,05–0,15	3.000–6.000	18–36	Stabil çamur, nitrifikasyon
Oksidasyon hendeği	10–30	0,05–0,3	3.000–6.000	8–36	Basit, kısmi denitrifikasyon
Ardışık kesikli (SBR)	20–40	0,04–0,20	2.000–6.500	12–50	Tek tank, esnek çevrim

ŞEKİL 2.6



Çamur yaşı prosesi tanımlar: konvansiyonel sistemler kısa (5-15 gün), uzun havalandırma ve ardışık kesikli reaktörler uzun çamur yaşında çalışır. Uzun SRT daha stabil çamur ve daha iyi nitrifikasyon sağlar, bedeli daha büyük reaktördür.

Hangi varyasyonun seçileceği birkaç somut ölçüte bağlıdır. Küçük ve orta yerleşimlerde, işletme kolaylığı ve stabil çıkış öncelikliyse uzun havalandırma veya oksidasyon hendeği tercih edilir; arazinin kısıtlı ve pahalı olduğu büyük kentlerde kompaktlık öne çıkar ve konvansiyonel yüksek hızlı sistemler ya da ileride ele alınan membran ve granüler teknolojiler devreye girer. Debisi gün içinde çok dalgalanan veya endüstriyel şok yük riski taşıyan yerlerde tam karışımlı reaktörler ve ardışık kesikli reaktörler avantajlıdır. Azot ile fosfor giderimi zorunluysa, çevrim fazları kolayca ayarlanabildiği için ardışık kesikli reaktörler ve çok bölgeli sistemler öne çıkar. Yani tek bir "en iyi" proses yoktur; yalnızca belirli bir debi, arazi, bütçe ve deşarj hedefi için en uygun proses vardır.

> **UZMAN NOTU**
>
> Bu varyasyonların tamamı aynı Monod kinetiğine ve aynı SRT ile F/M ilişkisine uyar; birbirlerinden yalnızca bu parametreleri hangi değerde tuttuklarıyla ve geometriyle ayrılırlar. Bir işletmeci için asıl beceri, hangi tipin "doğru" olduğunu ezberlemek değil, eldeki tesisin çamur yaşını ve F/M'sini hedeflenen çıkış kalitesine göre ayarlayabilmektir.

2.8 Biyofilm (Sabit Film) Sistemleri

Aktif çamurda mikroorganizmalar suyun içinde serbestçe askıda yüzer. Biyolojik arıtmanın ikinci büyük ailesi ise tümüyle farklı bir fikre dayanır: mikroorganizmaları bir yüzeye yapıştırmak. **Biyofilm (sabit film) sistemlerinde** bakteriler katı bir taşıyıcının üzerinde ince, yapışkan bir tabaka (biyofilm) oluşturur; atıksu bu tabakanın üzerinden akarken içindeki kirlilik biyofilme difüze olur ve orada tüketilir. Bu yaklaşımın en büyük avantajı, mikroorganizmaların çökeltim ve geri devirle sistemde tutulmasına gerek kalmamasıdır; biyokütle zaten yüzeye tutunmuştur.

Damlatmalı filtre ve döner biyodisk

En eski biyofilm sistemi **damlatmalı filtredir**: atıksu, taş veya plastik dolgu malzemesiyle doldurulmuş bir kulenin üstünden püskürtülür ve aşağı doğru damlarken dolgu yüzeyindeki biyofilmle temas eder. Klasik taş dolgulu filtreler **1 ile 3 metre** derinlikte, modern plastik dolgulu kuleler ise **12 metreye** kadar yüksek olabilir. Metcalf & Eddy verilerine göre iyi tasarlanmış bir damlatmalı filtre **%80 ile %85** BOİ giderimi sağlar.

Döner biyolojik disk (RBC) ise bir dizi büyük plastik diskin, yatay bir mil üzerinde atıksuya yarı batık olarak yavaşça döndürülmesiyle çalışır. Diskler döndükçe biyofilm sırayla suya ve havaya girer; suda beslenir, havada oksijen alır. Basit ve az enerji harcayan bir sistemdir.

Bu klasik biyofilm sistemleri belirli tasarım yükleriyle çalışır. Damlatmalı filtrelerde organik yükleme, düşük hızlı taş dolgulu birimlerde metreküp başına günde **0,1 ile**

0,3 kg BOİ, yüksek hızlı plastik dolgulu kulelerde ise **1,2 ile 3 kg BOİ**'ye kadar çıkar; hidrolik yük ve geri devir, biyofilmin sürekli ıslak ve ince kalmasını sağlayacak biçimde ayarlanır. Döner biyodisklerde ise tasarım disk yüzey alanı başına yüke dayanır: ikincil (BOİ) giderim için metrekare başına günde yaklaşık **4 ile 10 gram çözünmüş BOİ** (toplam BOİ olarak 10 ile 17 gram), birlikte nitrifikasyon istendiğinde bu yük belirgin biçimde düşürülür. Her iki sistemde de biyofilm belli bir kalınlığı (yaklaşık 2 ile 3 mm) aştığında iç katmanlar oksijensiz kalıp kütle hâlinde koparak (sloughing) yenilenir; bu doğal yenilenme, biyofilm sistemlerinin kendi kendini düzenleyen yanıdır.

MBBR ve IFAS: biyofilmin modern biçimi

Biyofilm teknolojisinin güncel ve hızla yaygınlaşan biçimi **hareketli yatak biyofilm reaktörüdür (MBBR)**. Norveç'te 1990'ların başında geliştirilen bu sistemde, biyofilm su yoğunluğuna yakın, küçük plastik taşıyıcıların (biofilm carrier) korunmuş iç yüzeyinde büyür; taşıyıcılar havalandırmayla reaktörde sürekli dolaşır. Ticari taşıyıcıların korunmuş özgül yüzey alanı **500 ile 1.200 m^2/m^3** arasındadır; yani bir metreküp taşıyıcı, biyofilm için yüzlerce metrekare yüzey sunar. Bu yoğunluk, çok kompakt reaktörlere olanak tanır. MBBR bugün 50'den fazla ülkede binden fazla tesiste kullanılan olgun bir teknolojidir.

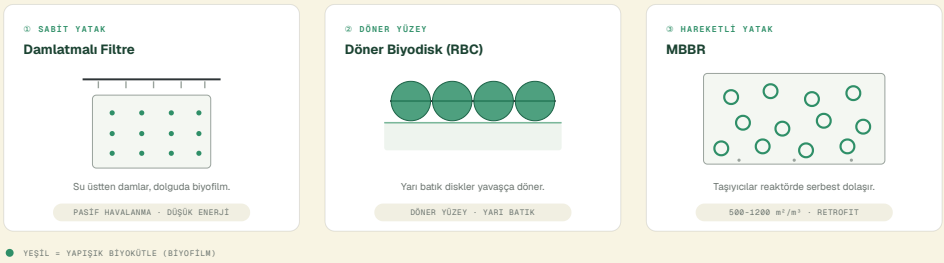
MBBR'ın yakın akrabası **IFAS (biyofilmle bütünleşik aktif çamur)**, aynı taşıyıcıları mevcut bir aktif çamur havuzunun içine ekler; böylece askıda çamur ile biyofilm bir arada çalışır. IFAS'ın asıl gücü **retrofit**, yani mevcut tesise yeni tank inşa etmeden kapasite ekleme yeteneğidir. Var olan beton havuza taşıyıcı eklemek, reaktördeki toplam biyokütleyi artırdığı için, aynı ayak izinde daha yüksek nitrifikasyon ve amonyak giderme kapasitesi sağlar. Bu özellik, kentleşmeyle yükü artan ama genişleyecek arazisi olmayan tesisler için IFAS'ı çekici kılar.

MBBR ve IFAS'ın tasarımı, aktif çamurdaki hacim mantığından farklı olarak yüzey alanı üzerine kurulur. Gerekli taşıyıcı miktarı, giderilecek günlük BOİ yükünün taşıyıcının birim yüzeyine düşen yükleme hızına (metrekare başına günde gram BOİ) bölünmesiyle bulunur; buradan gerekli toplam yüzey, sonra taşıyıcının özgül yüzey alanı ve tanktaki doldurma oranı üzerinden tank hacmi hesaplanır. Taşıyıcı doldurma oranı genellikle **%70'i geçmez**, çünkü taşıyıcıların reaktörde serbestçe dolaşabilmesi gerekir. Bu yüzey temelli yaklaşımın pratik üstünlüğü, mevcut bir aktif çamur havuzuna kademeli olarak taşıyıcı eklenerek kapasitenin ihtiyaç doğdukça artırılabilmesidir; bu, sabit bir betonarme hacme kilitlenmek yerine tesise esneklik kazandırır.

ŞEKİL 2.7

Biyofilm (Sabit Film) Sistemleri

Mikroorganizmalar suda yüzmez, bir yüzeye yapışık büyür: değişen tek şey biyofilmin tutunduğu yüzeyin geometrisidir.



Ortak üstünlük: yapışık biyokütle çökeltim ve geri devirle tutulmaya gerek duymaz, şok yüklere dayanıklıdır ve şişkin çamur sorunundan bağışıktır. MBBR/IFAS ayrıca mevcut aktif çamur havuzuna taşıyıcı eklenerek kapasite artırmayı (retrofit) mümkün kılar.

Biyofilm sistemlerinin ortak üstünlüğü sağlamlıktır: yapışık biyokütle, şok yüklere ve toksik dalgalanmalara aktif çamurdan daha dayanıklıdır ve çökelme sorunlarından (şişkin çamur) büyük ölçüde bağışıktır. Buna karşılık, biyofilm içindeki oksijen ve substrat difüzyonu tasarımı karmaşıklaştırır. Uygulamada birçok modern tesis, iki yaklaşımın en iyisini birleştiren hibrit sistemler (IFAS gibi) kullanır.

2.9 Besin Giderimi: Azot ve Fosfor

Buraya kadar anlatılan her şey, esasen organik maddeyi (BOİ) gidermeye odaklıydı. Ancak modern arıtmanın en zorlu ve en kritik görevi başka bir yerdedir: azot ve fosforun giderilmesi. Bu iki element bitki besinidir; alıcı ortama fazla verildiklerinde suları aşırı besler, alg patlamalarına ve ardından oksijen tükenmesine yol açar. **Ötrofikasyon** adı verilen bu süreç, göllerin ve körfezlerin can çekişmesinin baş sorumlusudur ve Türkiye'de su kirliliğinin[2] en görünür biçimlerinden biridir. Marmara Denizi'nde 2021'de yaşanan müsilaj krizi, kentsel atıksudaki besin yükünün bir iç denizi nasıl boğabileceğinin çarpıcı bir örneği oldu ve Marmara Denizi Çevre Yönetim Planı'nın[3] ileri arıtma hedeflerini gündeme taşıdı.

Ötrofikasyonun mekaniği acımasızdır. Azot ve fosfor bir su kütlesine aşırı girdiğinde önce yüzeyde alg ve siyanobakteri patlamaları olur; bu patlamalar ölüp tabana çökt

2. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/su-kirliligi-nedir-nedenleri-etkileri-ve-cozum-yollari
3. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/marmara-denizi-cevre-yonetim-plani

üğünde, ayrışmaları suyun çözünmüş oksijenini tüketir. Sonuç, dipte oksijensiz ölü bölgeler ve balık ölümleridir. Azot ile fosforun ikisi de bu döngüyü besler; genellikle tatlı sularda fosfor, deniz ve haliç sularında ise azot sınırlayıcı besindir, bu yüzden hangi besinin öncelikli giderileceği alıcı ortamın tipine göre belirlenir. Biyolojik besin gideriminin bütün amacı, bu zinciri kaynağında, yani deşarj noktasında kırmaktır.

Azot giderimi iki adımdır: nitrifikasyon ve denitrifikasyon

Biyolojik azot giderimi, azotun kimyasal formunu iki ardışık adımda değiştirir ve sonunda onu zararsız azot gazı olarak atmosfere geri verir. Atmosferin zaten **%78'i azot gazı** olduğu için, bu giderim yolu doğaya hiçbir kalıntı bırakmaz; bu da onu kimyasal yöntemlere göre zarif kılar.

Birinci adım, nitrifikasyon, aerobik koşulda gerçekleşir. Önceki bölümlerde ele alınan yavaş büyüyen ototrof bakteriler, amonyağı (NH_4^+) iki kademede önce nitrite (NO_2^-), sonra nitrata (NO_3^-) yükseltger. Bu adımın üç ağır bedeli vardır. Birincisi oksijendir: her gram amonyak azotunun nitrata tam oksidasyonu **4,57 g oksijen** ister. İkincisi alkalinitedir: her gram azot başına yaklaşık **7,14 g alkalinite ($CaCO_3$ cinsinden) tüketilir**; yeterli alkalinite yoksa pH düşer ve nitrifikasyon durur. Üçüncüsü zamandır: nitrifiye bakteriler yavaş büyüdüğü için uzun çamur yaşı şarttır.

Nitrifikasyonun iki kademesini iki ayrı bakteri grubu yürütür. Amonyak oksitleyen bakteriler (AOB, klasik olarak Nitrosomonas) amonyağı nitrite çevirir; nitrit oksitleyen bakteriler (NOB) ise nitriti nitrata. Amonyak azotunun tam oksidasyonu için gereken 4,57 g oksijenin yaklaşık **3,43 gramı birinci kademede, 1,14 gramı ikinci kademede** harcanır. Hücre sentezi hesaba katıldığında net oksijen ihtiyacı biraz düşer (yaklaşık 4,3 g O_2/g azot), ama bu yüksek bedel pratikte değişmez. Uzun süre ders kitaplarında NOB'nin tek temsilcisinin Nitrobacter olduğu düşünülürken, güncel moleküler çalışmalar gerçek tesislerde çoğunlukla Nitrospira'nın baskın olduğunu, hatta tek bir organizmanın amonyağı doğrudan nitrata çevirdiği comammox olgusunun bulunduğunu gösterdi. Bu ayrıntı akademik bir merak gibi görünse de pratik bir karşılığı vardır: nitrit birikmesi, yani ikinci kademenin aksaması, çoğu zaman oksijen yetersizliğinin veya toksik yükün erken bir uyarısıdır.

İkinci adım, denitrifikasyon, anoksik koşulda gerçekleşir. Fakültatif heterotrof bakteriler, oksijen olmadığında nitratı terminal elektron alıcısı olarak kullanıp azot gazına indirger ($NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$). Bu adım bir organik karbon kaynağı (elektron vericisi) gerektirir; bu karbon ya giriş atıksuyundan (dahili) ya da dışarıdan eklenen metanol gibi kaynaklardan (harici) gelir. Denitrifikasyonun güzel yanı, nitrifikasyonun bedellerinin bir kısmını geri ödemesidir: indirgenen her gram azot başına yaklaşık **3,57 g alkalinite geri kazandırır** ve **2,86 g oksijen** eşdeğeri elektron alıcısı sağlayarak havalandırma ihtiyacını azaltır.

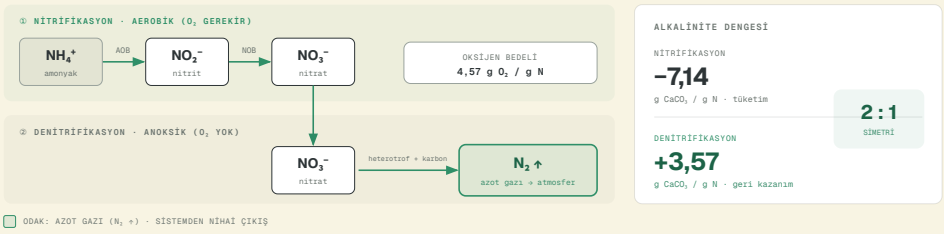
Buradaki **2'ye 1 alkalinite simetrisi** biyolojik azot gideriminin en zarif tasarım gerçeğidir: nitrifikasyon 7,14 g alkalinite tüketir, denitrifikasyon bunun tam yarısını (3,57 g) geri verir. Bu yüzden reaktörde nitrat üreten aerobik bölgeyle nitratı gideren anoksik bölgeyi akıllıca sıralamak, hem kimyasal alkalinite takviyesini hem de oksijen faturasını belirgin düşürür. Modern azot giderimli tesisler bu yüzden anoksik bölgeyi genellikle aerobik bölgeden **önce** koyar (ön-denitrifikasyon) ve nitratlı suyu başa geri devir ettirir.

Denitrifikasyonun pratikteki en kritik değişkeni, mevcut organik karbon miktarıdır. Nitratı azot gazına indirgemek için bakterilerin bir elektron vericisine, yani organik karbona ihtiyacı vardır; giriş atıksuyundaki karbon yetmezse dışarıdan (tipik olarak metanol) eklenir. Metanolle yürüyen bir sistemde, indirgenen azot başına pratikte yaklaşık **4,8 g KOİ** tüketilir; bu yüzden azot giderimli tesislerde giriş suyunun karbon/azot (C/N) oranı yakından izlenir, oran yetersizse denitrifikasyon tamamlanmaz ve ara ürün nitrit birikir. Karbon kaynağının türü hızı da belirler: asetat ve etanolle beslenen biyokütle, metanolle beslenenden çok daha hızlı denitrifiye eder. Modern tasarımlar bu yüzden mümkün olduğunca giriş atıksuyundaki kolay ayrışan karbonu ön-denitrifikasyon düzeniyle kullanmayı tercih eder: hem harici karbon maliyetinden kaçınır, hem de o karbonu havalandırmada yakmak yerine azot gidermek için değerlendirir.

ŞEKİL 2.8

Biyolojik Azot Giderimi: Nitrifikasyon + Denitrifikasyon

Amonyak iki adımda zararsız azot gazına dönüşür; nitrifikasyonda tüketilen alkalinitenin tam yarısı denitrifikasyonda geri kazanılır.



Nitrifikasyon 7,14 g alkalinite tüketir, denitrifikasyon bunun tam yarısını (3,57 g) geri verir: bu 2'ye 1 simetri, anoksik bölgeyi aerobik bölgeden önce koymanın (ön-denitrifikasyon) hem kimyasal hem enerji açısından neden mantıklı olduğunu açıklar.

Fosfor giderimi: biyolojinin şaşırtıcı hilesi

Fosfor, azottan farklı olarak gaz fazına sahip değildir; atmosfere gönderilemez, yalnızca katı (çamur) fazına aktarılarak giderilebilir. Bunun kimyasal yolu (demir veya alüminyum tuzlarıyla çöktürme) serinin üçüncü bölümünde ele alınacak. Ancak biyolojinin, hiç kimyasal kullanmadan fosforu gideren şaşırtıcı bir yolu vardır: **biyolojik aşırı fosfor giderimi (EBPR)**.

EBPR, "fosfat biriktiren organizmalar (PAO)" adı verilen özel bir bakteri grubunun, art arda gelen anaerobik ve aerobik koşullarda gösterdiği olağandışı davranışa dayanır. Mekanizma iki fazlıdır. **Anaerobik fazda** PAO'lar, ortamdaki uçucu yağ asitlerini hücre içine alıp depolar; bunun için gereken enerjiyi ise hücre içinde biriktirdikleri polifosfatı parçalayarak sağlarlar ve karşılığında fosfatı suya salarlar (P salımı). **Aerobik fazda** ise depoladıkları karbonu yakarak büyür ve bu enerjiyle sudan fosfatı ihtiyaçlarının çok üstünde, adeta "aç gözlülükle" geri alırlar (aşırı alım). Aerobik alım, anaerobik salımdan daha fazla olduğu için net bir fosfor giderimi oluşur.

Bu döngünün dâhiyane yanı, fosforu normal bir bakteriden kat kat fazla depolayan bir biyokütle üretmesidir: EBPR çamurunun fosfor içeriği **0,06 ile 0,15 g P/g biyokütle** aralığına çıkar, oysa sıradan bir bakteride bu oran yalnızca %1,5 ile %2 civarındadır. Fosforca zenginleşmiş bu çamur fazla çamur olarak atıldığında, fosfor da sistemden uzaklaşmış olur. EBPR'ın başarısı, girişte gerçek bir anaerobik bölge kurulmasına ve yeterli uçucu yağ asidi bulunmasına sıkı sıkıya bağlıdır.

> **UZMAN NOTU**
>
> Ders kitapları EBPR'ın model organizması olarak genellikle Candidatus Accumulibacter'ı anlatır. Ancak güncel moleküler çalışmalar, Danimarka'daki tam ölçekli tesislerde sahada asıl baskın fosfor biriktiren organizmanın çoğu zaman Tetrasphaera cinsi olduğunu göstermiştir. Benzer biçimde, klasik metinlerde nitriti nitrata çeviren bakteri hep Nitrobacter olarak anlatılırken, güncel çalışmalar gerçek tesislerde çoğunlukla Nitrospira'nın baskın olduğunu ortaya koymuştur. Laboratuvar modeli ile saha gerçeği arasındaki bu fark, biyolojik arıtmanın hâlâ aktif bir araştırma alanı olduğunu hatırlatır.

Biyolojik fosfor gideriminin kırılganlığı, fosfat biriktiren organizmaların (PAO) bir rakibinden kaynaklanır: **glikojen biriktiren organizmalar (GAO)**, aynı uçucu yağ asitlerini fosfor salmadan alır ve PAO'larla yarışır. Yüksek sıcaklık ve düşük pH GAO'ları kayırdığı için sıcak iklimlerde EBPR verimi düşebilir. Öte yandan doğa, azot ve fosfor giderimini birleştirmek için zarif bir çözüm de sunar: bazı PAO'lar aerobik faz yerine anoksik fazda, elektron alıcısı olarak nitratı kullanarak fosfor alabilir. **Denitrifiye eden PAO (DPAO)** adı verilen bu organizmalar, aynı bakterinin aynı anda hem denitrifikasyon hem fosfor giderimi yapmasını sağlar; bu da azot ve fosforu tek çamur döngüsünde birleştiren gelişmiş proses düzenlerinin mikrobiyolojik temelidir.

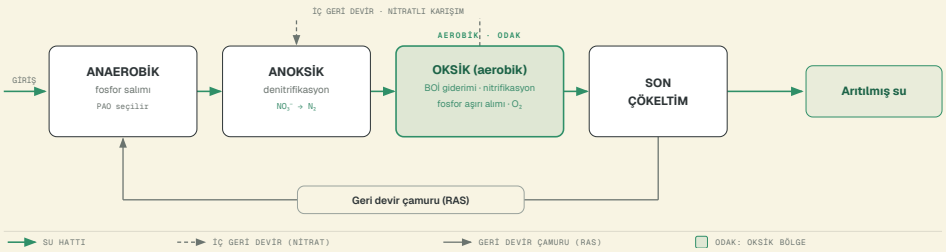
Hepsini birleştirmek: A²/O ve kombine prosesler

Modern bir besin giderimli tesis, azot ve fosfor gideriminin gereksinimlerini tek bir çamur döngüsünde bir araya getirir. Bunun en bilinen düzeni **A²/O prosesidir** (Anaerobik/Anoksik/Oksik): atıksu sırasıyla bir anaerobik bölgeden (fosfor salımı için), bir anoksik bölgeden (denitrifikasyon için) ve bir aerobik bölgeden (BOİ giderimi, nitrifikasyon ve fosfor aşırı alımı için) geçirilir; nitratlı karışım aerobik bölgeden anoksik bölgeye geri devir ettirilir. Böylece tek bir biyokütle, üç metabolik rejim arasında dolaştırılarak organik madde, azot ve fosforu aynı anda giderir. Bardenpho ve UCT gibi daha gelişmiş düzenler, bu mantığı ek bölge ve geri devirlerle daha da ileri götürür.

ŞEKİL 2.9

A²/O Prosesi: Azot ve Fosforu Tek Döngüde Gidermek

Tek bir çamur; anaerobik, anoksik ve oksik bölgeler arasında dolaştırılarak organik madde, azot ve fosforu aynı anda giderir.



Anaerobik bölge fosfat biriktiren organizmaları (PAO) seçer; anoksik bölge nitratı azota indirir; oksik bölge nitrifikasyonu ve fosforun aşırı alımını sağlar. Nitratlı karışım oksikten anoksiğe iç geri devirle döner, çöken çamur anaerobiğe RAS ile döner. Bardenpho ve UCT gibi düzenler bu mantığı daha da ileri götürür.

KİLİT MESAJ

Azot ve fosfor giderimi, biyolojik arıtmayı basit bir "kirlilik yakma" işleminden, üç metabolik rejimi (anaerobik, anoksik, aerobik) tek bir çamur döngüsünde ustaca sıralayan bir mühendislik koreografisine dönüştürür. Ötrofikasyonu önlemenin, yani göllerimizi ve denizlerimizi korumanın anahtarı bu koreografidedir.

2.10 Membran Biyoreaktör (MBR): Çökeltimi Ortadan Kaldırmak

Aktif çamurun tarihsel darboğazı hep aynı olmuştur: çamurun ne kadar iyi çöktüğü. Reaktörde ne kadar yüksek biyokütle tutulabileceğini, dolayısıyla tesisin ne kadar kompakt olabileceğini, son çökeltim havuzunun sınırı belirler. **Membran biyoreaktör (MBR)** bu darboğazı radikal bir hamleyle ortadan kaldırır: son çökeltim havuzunu tümüyle atıp, katı-sıvı ayrımını çökelmeyle değil, bir mikro veya ultrafiltrasyon membranıyla yapar.

Ayrım artık çamurun çökelme davranışına bağlı olmadığı için, MBR çok daha yüksek biyokütle derişiminde işletilebilir: MBR'lerde MLSS tipik olarak **8 ile 12 g/L**, yani konvansiyonel aktif çamurun **2 ile 3 katıdır**. Yüksek biyokütle, aynı arıtma kapasitesini çok daha küçük bir reaktörde sağlamak demektir; buna son çökeltim havuzunun tümüyle ortadan kalkması eklenince, MBR'nin ayak izi konvansiyonel bir tesisten belirgin biçimde küçük olur. Üstelik membran, askıda katıyı ve bakteriyi neredeyse tamamen tuttuğu için MBR çıkış suyu dezenfeksiyona yakın kalitededir ve doğrudan yeniden kullanıma (sulama, sanayi) uygundur.

Bu üstünlüklerin bir bedeli vardır ve o da enerjidir. Membranın tıkanmasını (fouling) önlemek için yüzeyinin sürekli hava kabarcıklarıyla süpürülmesi gerekir; bu "hava süpürme", MBR enerjisinin büyük bölümünü yutar. Frontiers dergisinde 2024'te yayımlanan bir derlemeye göre içi boş fiber MBR'lerde toplam gücün **%53'ü**, düz tabaka MBR'lerde ise **%68'i** yalnızca membran havalandırmasına gider. Modern batık MBR sistemlerinde özgül enerji tüketimi **0,3 ile 0,6 kWh/m³** bandına inmiştir, ancak bu değer yine de iyi işleyen konvansiyonel bir aktif çamur tesisinden yüksektir. Bu yüzden güncel MBR araştırmasının büyük kısmı, tıkanmayı ve enerjiyi düşürmeye, yapay zekâ destekli hava debisi kontrolüne odaklanır. Yine de düşen membran maliyetleri ve sıkılaşan çıkış standartları, MBR'yi dünyada en hızlı yaygınlaşan biyolojik arıtma teknolojilerinden biri hâline getirdi.

Bu özellikler MBR'yi belirli bağlamlarda tartışmasız üstün kılar: kentsel arazinin pahalı ve kısıtlı olduğu yerlerde küçük ayak izi, arıtılmış suyun sulama veya sanayide yeniden kullanılacağı yerlerde ise dezenfeksiyona yakın çıkış kalitesi. Su stresi artan Türkiye gibi bir ülkede arıtılmış suyun yeniden kullanımı[4] giderek stratejik bir konu hâline geliyor; TÜİK verilerine göre ülkemizde arıtılan atıksuyun şu an yalnızca yaklaşık **%1,3'ü** yeniden kullanılıyor ve bu oranı yükseltmek için MBR gibi yüksek kaliteli çıkış üreten teknolojiler öne çıkıyor. MBR'nin bedeli enerji ve membran yenileme maliyetidir; bu yüzden seçim her zaman arazi kısıtı, su yeniden kullanım hedefi ve enerji maliyeti arasındaki bir denge hesabıdır.

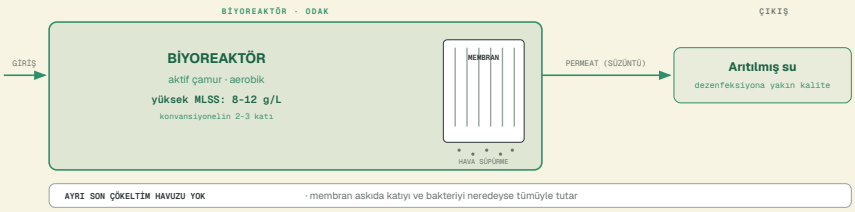
4. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/ulusal-su-kurulu-su-ayak-izi-2030

MBR'nin biyolojik işleyişi bu bölümün konusudur; ancak membranların gözenek boyutuna göre nasıl sınıflandığı ve ayrım teorisinin fiziği (mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon, ters ozmoz) serinin üçüncü bölümünde, ileri arıtma başlığı altında ele alınacaktır.

ŞEKİL 2.10

Membran Biyoreaktör (MBR): Çökeltim Havuzu Yok

Katı-sıvı ayrımı çökelmeyle değil, reaktöre batırılmış membranla yapılır: ayrı son çökeltim havuzu ortadan kalkar.



Yüksek biyokütle ve çökeltim havuzunun kalkması MBR'yi çok kompakt kılar ve çıkışı dezenfeksiyona yakın kaliteye getirir (su yeniden kullanımına uygun). Bedeli enerjidir: membran tıkanmasını önleyen hava süpürme, MBR enerjisinin yarıdan fazlasını yer.

2.11 Geleceğin Biyolojik Arıtması: Granüler Çamur, Anammox ve Karbon Dengesi

Biyolojik arıtma, yüzyıllık bir teknoloji olmasına rağmen hâlâ hızla evriliyor. Bu evrimi süren iki büyük baskı var: tesisleri daha küçük ve daha az enerjili yapma isteği, bir de arıtmanın kendi karbon ayak izini azaltma zorunluluğu. Yeşil Ajanda olarak, sürdürülebilirlik penceresinden bakıldığında bu başlığın sıradan bir "teknoloji vitrini" olmadığını, biyolojik arıtmanın geleceğini tayin edecek bir dönüşüm olduğunu vurguluyoruz.

Granüler aktif çamur (AGS): floğu granüle çevirmek

En dikkat çekici yeniliklerden biri **aerobik granüler çamurdur (AGS)**, ticari adıyla sıkça Nereda olarak bilinir. Burada biyokütle, gevşek floklar yerine yoğun, küresel, hızlı çöken **granüller** hâlinde büyür. Granülün mucizesi iç yapısındadır: dışı aerobik, ortası anoksik, çekirdeği anaerobik olan bu küçük küreler, tek bir reaktörde eşzamanlı olarak nitrifikasyon, denitrifikasyon ve fosfor giderimi yapabilir. Granüller floktan **10 ile 20 kat daha hızlı** çöker (konvansiyonel çamurda çökelme hızı yaklaşık 1

m/saat iken granüllerde 15 ile 20 m/saat), bu yüzden ayrı çökeltim havuzuna gerek kalmaz ve çamur hacim indeksi **30 ile 60 mL/g** gibi olağanüstü düşük değerlere iner.

Sonuçlar çarpıcıdır. Bağımsız bir 2023 vaka çalışmasının (Water Environment Research) ve üretici verilerinin ortak gösterdiğine göre AGS, konvansiyonel biyolojik besin giderimli aktif çamura kıyasla **%50 ile %75 daha az alan** ve tipik olarak **%20 ile %30 (elverişli koşullarda %50'ye kadar) daha az enerji** ister. Teknoloji artık deneysel değildir: 2005'ten bu yana 21 ülkede 100'ün üzerinde tam ölçekli tesis kurulmuş, kümülatif olarak 58 milyon kWh elektrik tasarrufu ve 41.100 ton karbondioksit salımının önlenmesi sağlanmıştır.

Anammox: azot giderimini alt üst eden bakteri

Klasik nitrifikasyon-denitrifikasyonun iki pahalı bileşeni vardır: bol oksijen ve organik karbon. **Anammox (anaerobik amonyum oksidasyonu)** temelli süreçler, bu iki bedeli birden düşürür. Kısmi nitritasyon-anammox (PN/A) yönteminde, amonyağın yalnızca yarısı nitrite yükseltgenir (yani daha az oksijen), ardından anammox bakterileri kalan amonyağı bu nitritle doğrudan birleştirip azot gazına çevirir (yani hiç organik karbon gerekmez). Sonuç, klasik sürece göre **%60 daha az oksijen ihtiyacı** ve sıfır harici karbon dozlamasıdır; işletme maliyeti uygun koşullarda **%85'e kadar** düşebilir.

Anammox, çürütücü süzüntü suyu gibi sıcak ve yüksek amonyaklı yan akımlarda artık olgun bir teknolojidir; dünyada 80'in üzerinde tam ölçekli tesiste kullanılır. Asıl büyük ödül olan ana akım (tesisin tüm debisinde) uygulaması ise henüz pilot ölçekte; başarılı olduğunda, tesisin gelen organik karbonunu azot gidermek için harcamak yerine biyogaz üretimine yönlendirmeyi, yani enerji-nötr arıtmayı mümkün kılacak. Bu yüzden anammox, "enerji-nötr atıksu arıtımının anahtarı" olarak görülüyor.

Gizli sera gazı: diazot monoksit (N_2O)

Belki de bu bölümün en önemli sürdürülebilirlik mesajı budur: biyolojik atıksu arıtması yalnızca kirlilik gidermez, aynı zamanda bir sera gazı kaynağıdır. Biyolojik azot gideriminin ara ürünü olan **diazot monoksit (N_2O)**, IPCC'nin altıncı değerlendirme raporuna göre karbondioksitten **273 kat** güçlü bir sera gazıdır. Bu potens öyle yüksektir ki, küçük N_2O kaçakları bile bir tesisin karbon ayak izinde orantısız yer tutar: çalışmalar N_2O'nun bir tesisin toplam karbon ayak izinin **%60 ile %83'ünü** oluşturabildiğini gösteriyor.

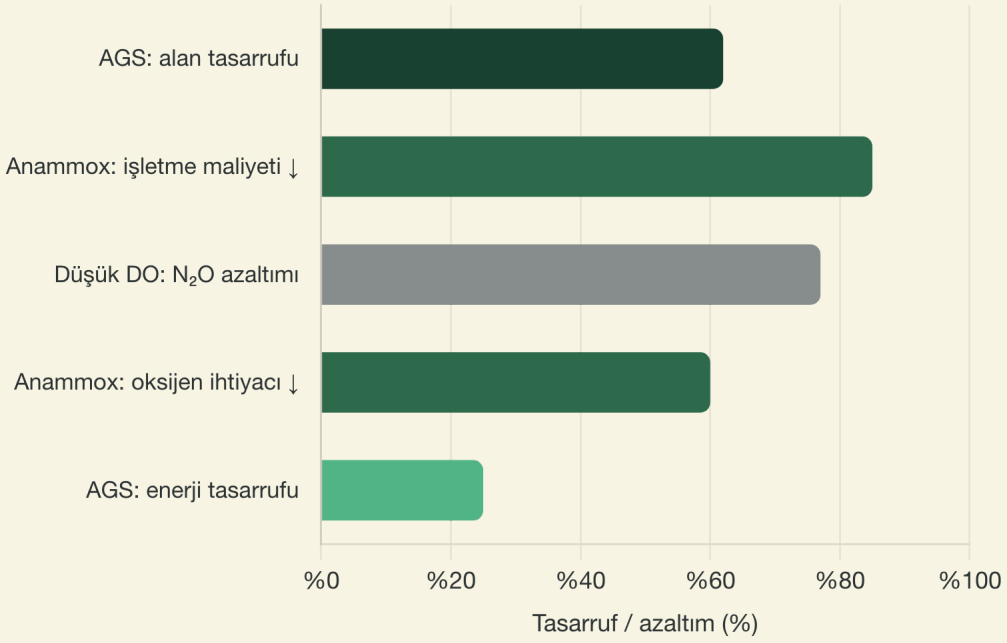
Bu, "atıksu arıtma tesisi her zaman çevre dostudur" basitliğini kıran can alıcı bir nüanstır ve kurumsal ESG raporlaması için doğrudan sonuç doğurur. N_2O emisyonunu en çok belirleyen etken karbon/azot oranıdır: karbonu düşük (seyrelmiş) atıksularda risk artar. İyi haber şudur ki, azaltım yolları arıtmanın diğer hedefleriyle çakışır. Çözünmüş oksijeni akıllıca yönetmek N_2O emisyonunu **%77'ye kadar** düşürürken havalandırma enerjisini de **%20** azaltabiliyor; anammox temelli süreçler ise

giderilen azotun **%0,08'inin altında** N_2O ile en temiz profillerden birini sunuyor. Yeşil Ajanda olarak, bir arıtma tesisinin gerçek çevresel performansını değerlendirirken yalnızca deşarj kalitesine değil, bu görünmez sera gazı boyutuna da bakılması gerektiğine dikkat çekiyoruz.

ŞEKİL 2.11

İleri Teknolojilerin Kazanımı (Konvansiyonele Göre)

Granüler çamur, anammox ve çözünmüş oksijen optimizasyonu ile tasarruf (%)



Değerler tipik üst-orta aralıklardır ve koşula göre değişir. Granüler çamurun (AGS) alan/enerji kazanımı Ekholm (2023) ve üretici verisiyle; anammox ve N_2O azaltımı ilgili hakemli çalışmalarla çapraz doğrulanmıştır.

UZMAN NOTU

Yeni AB Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi (2024/3019), 10.000 nüfus eşdeğeri ve üzeri tesisler için 2045'e kadar enerji nötrlüğünü bağlayıcı hâle getirdi. Bu, bir gerilim yaratıyor: tesisler bir yandan daha çok azot gidermeye (potansiyel olarak daha çok N_2O), bir yandan da karbon nötrlüğe zorlanıyor. Granüler çamur, anammox ve düşük N_2O'lu azot giderimi gibi teknolojilerin güncel araştırmayı domine etmesinin nedeni tam da bu gerilimi çözme ihtiyacıdır.

2.12 Türkiye'de Biyolojik Arıtma ve Deşarj Standartları

Buraya kadar anlatılan esaslar evrenseldir; ancak bir tesisin hangi arıtma seviyesine ulaşması gerektiğini ülkenin mevzuatı belirler. Türkiye'de kentsel atıksuların arıtma

yükümlülüklerini düzenleyen temel metin, Çevre Kanunu'na[5] dayanan Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'dir (KAAY)[6].

İkincil arıtma, mevzuatta doğrudan biyolojik arıtma demektir

KAAY'nin dördüncü maddesi ikincil arıtmayı, "kentsel atıksuların genellikle biyolojik arıtma veya diğer proseslerle arıtılması" olarak tanımlar; yani Türk mevzuatı ikincil arıtmayı doğrudan biyolojik arıtmayla özdeşleştirir. Bu bölümün konusu, tam da mevzuatın "ikincil arıtma" dediği şeydir. Yönetmeliğe göre **10.000 nüfus eşdeğerinden fazla** toplama alanlarından yapılan bütün deşarjlar için ikincil (biyolojik) arıtma zorunludur; tesisin alıcı ortama boşaltım yapabilmesi de çevre izni ve lisansı[7] kapsamındaki deşarj koşullarına bağlıdır.

İkincil arıtmanın karşılaması gereken deşarj sınırları KAAY'nin Ek-IV Tablo 1'inde (RG 8/12/2023-32393 ile güncellenmiş hâliyle) verilir: **$BOİ_5$ için 25 mg/L**, **KOİ için 125 mg/L**, askıda katı madde için **35 mg/L** (10.000 nüfus eşdeğeri üzeri tesislerde). Bu sayılar, bu bölümün en başında sözü edilen "birincil çökeltim çıkışı hâlâ 120-150 mg/L BOİ taşır" gerçeğiyle birlikte okunmalıdır: aradaki uçurumu kapatan, yani suyu deşarj edilebilir hâle getiren tek kademe biyolojik arıtmadır.

Hassas alanlar: besin giderimi ne zaman zorunlu olur

İkincil (biyolojik) arıtma her zaman yeterli değildir. Ötrofikasyona duyarlı su ortamları, KAAY kapsamında **hassas alan** olarak tanımlanır ve buralara yapılan deşarjlarda ikincil arıtmaya ek olarak azot ve fosfor giderimi (ileri arıtma) gerekir. Hassas alan deşarj sınırları Ek-IV Tablo 2'de belirlenmiştir:

TABLO 2.2

Parametre	10.000-100.000 N.E.	100.000 N.E. üzeri
Toplam Fosfor (TP)	2 mg/L	1 mg/L
Toplam Azot (TN)	15 mg/L	10 mg/L

Görüldüğü gibi tesis büyüdükçe (yani alıcı ortama binen yük arttıkça) sınırlar sıkılaşır. Ayrıca yönetmelik, bir hassas su havzasındaki tüm tesislerin toplamında **toplam fosforda en az %75 ve toplam azotta en az %75** giderim verimi gösterilmesini de bir alternatif olarak tanır. Bu tablolardaki azot ve fosfor değerleri, aslında bu bölümde anlatılan nitrifikasyon-denitrifikasyon ve biyolojik fosfor gideriminin sayısal hedeflerinden başka bir şey değildir.

5. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/cevre-kanunu-rehberi-2026-kapsamli-klavuz
6. Kaynak: mevzuat.gov.tr
7. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/cevre-izin-ve-lisans-belgesi-nedir

Türkiye'nin biyolojik arıtma tablosu: sayılar ne diyor

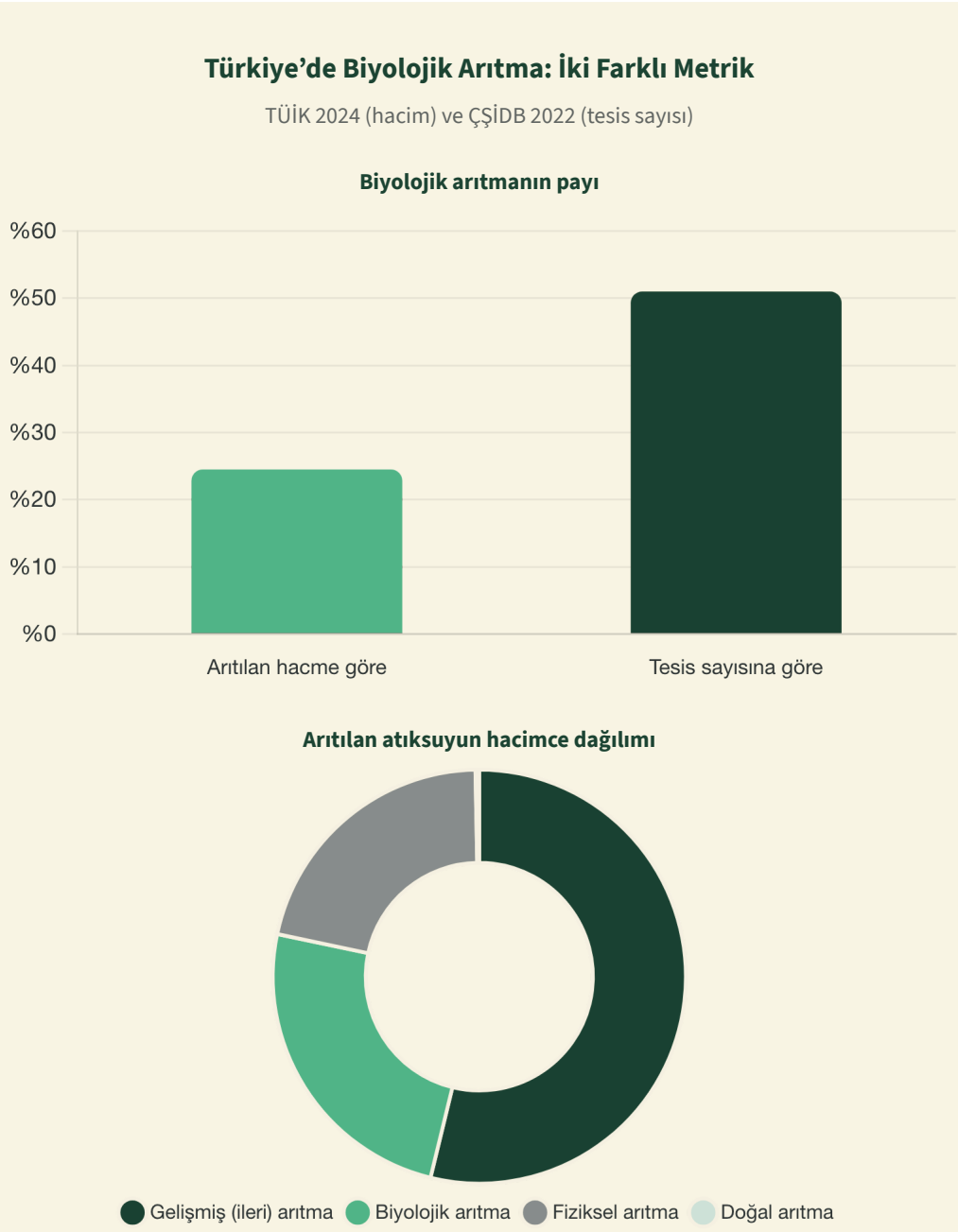
Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK[8]) 2024 verilerine göre, arıtılan kentsel atıksuyun **%53,8'i gelişmiş (ileri), %24,5'i biyolojik, %21,4'ü fiziksel ve %0,3'ü doğal** arıtmadan geçmektedir. İlk bakışta biyolojik arıtmanın payı düşük görünebilir; ancak burada iki metriği ayırmak gerekir. Arıtılan **hacme** göre biyolojik arıtma %24,5'te kalırken, tesis **sayısına** göre (2022 verisiyle, toplam 1.315 tesis) biyolojik arıtma **yaklaşık %51 ile açık ara en yaygın yöntemdir**. Bu tablonun anlamı şudur: az sayıdaki büyük ileri arıtma tesisi büyükşehirlerde yoğunlaşıp toplam hacmin çoğunu işlerken, çok sayıdaki küçük ve orta ölçekli yerleşimde standart çözüm biyolojik (ikincil) arıtmadır.

Türkiye'nin asıl açığı arıtma teknolojisinde değil, kapsamdadır. TÜİK 2024 verilerine göre kanalizasyon şebekesiyle hizmet verilen belediye nüfusu oranı **%92,8** iken, atıksu arıtma tesisiyle hizmet verilen nüfus oranı **%76,9**'dur; aradaki yaklaşık 16 puanlık fark, şebekeye bağlı olduğu hâlde arıtılmadan alıcı ortama verilen atıksuya işaret eder. Toplam atıksu arıtma tesisi sayısı 2002'de yalnızca 145 iken 2022'de **1.315'e** ulaşmış olsa da, kapsamı tam yüze taşımak ve mevcut tesisleri besin gideriyle modernleştirmek hâlâ büyük bir yatırım gündemidir. Biyolojik arıtmanın yaygınlaştırılması bu yüzden yalnızca bir kalite meselesi değil, aynı zamanda bir kapsam ve altyapı meselesidir.

Bu tablonun ardında bir denetim rejimi de vardır. Bir biyolojik tesisin deşarj limitlerine uyup uymadığı, çıkıştan alınan **24 saatlik kompozit numunelerle** izlenir; yönetmelik, tesis büyüklüğüne göre yıllık asgari numune sayısını belirler (örneğin 10.000 ile 49.999 nüfus eşdeğeri arası tesisler için yılda 12, 50.000 ve üzeri için 24 numune). Yani biyolojik arıtma yalnızca kurulması değil, sürekli izlenip kanıtlanması gereken bir yükümlülüktür.

8. Kaynak: tuik.gov.tr

ŞEKİL 2.12



Biyolojik arıtma tesis **sayısında baskındır (~%51)** ama arıtılan **hacimde %24,5'te** kalır: az sayıdaki büyük ileri arıtma tesisi büyükşehirlerde hacmin çoğunu işler, çok sayıdaki küçük yerleşimde ise biyolojik (ikincil) arıtma standart çözümdür.

AB ileri gidiyor, Türkiye ikincil arıtma eşiğinde

Avrupa Birliği, 2024'ün sonunda yürürlüğe giren yeni Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi (2024/3019[9]) ile çıtayı belirgin yükseltti: kapsam eşiği 1.000 nüfus eşdeğerine indirildi, ilaç ve kozmetik kalıntısı gibi mikrokirleticileri gideren **dördüncül (kuaterner) arıtma** büyük tesisler için 2045'e kadar zorunlu kılındı ve tesisler için **enerji nötrlüğü** hedefi

9. Kaynak: eur-lex.europa.eu

getirildi. Türkiye'nin yürürlükteki KAAY'si ise hâlâ eski çerçeveyi (ikincil arıtma artı hassas alanda besin giderimi) yansıtır; 2023 değişikliği kuaterner arıtmayı veya enerji nötrlüğünü içermez. Yeşil Ajanda olarak, ülkemizin önümüzdeki dönemde bu yeni AB çerçevesine uyum baskısıyla karşılaşacağını ve biyolojik arıtma altyapısının hem yaygınlaştırılması hem de enerji ve karbon boyutuyla modernleştirilmesi gerektiğini değerlendiriyoruz.

2.13 Sonuç: Arıtmanın Canlı Kalbi

Fiziksel arıtma bir eleme ve çökeltme meselesiyken, biyolojik arıtma bir ekosistem yönetimi meselesidir. Bu bölümde görüldüğü gibi, bir arıtma tesisinin asıl işini, kontrol altında tutulan milyarlarca mikroorganizma yapar; mühendisin görevi, bu canlı topluluğa doğru koşulları (yeterli çamur yaşı, doğru oksijen, uygun sıcaklık ve besin dengesi) sağlamaktır. Çamur yaşı hangi mikroorganizmaların sistemde tutunacağını seçer; oksijen tasarımı tesisin en büyük enerji kalemini belirler; son çökeltim ise tüm emeğin çıkış suyuna yansıyıp yansımayacağına karar verir.

Yeşil Ajanda olarak, biyolojik arıtmanın geleceğine bakarken üç noktanın belirleyici olacağını değerlendiriyoruz:

1. **Besin giderimi standart hâline gelecek.** Ötrofikasyon baskısı ve hassas alan mevzuatı, azot ve fosfor gideriminin bir "üst seçenek" olmaktan çıkıp kentsel arıtmanın varsayılan beklentisine dönüşmesini sağlıyor; Marmara deneyimi bunun aciliyetini gösterdi.
2. **Enerji ve karbon, arıtma kalitesi kadar önemli olacak.** Havalandırmanın enerji faturası ve biyolojik azot gideriminin gizli N_2O emisyonu, bir tesisin "iyi" sayılması için artık deşarj kalitesinin tek başına yetmeyeceği anlamına geliyor; enerji-nötr ve düşük karbonlu arıtma yükseliyor.
3. **Kompakt ve akıllı teknolojiler yaygınlaşacak.** Granüler çamur, membran biyoreaktörler, hareketli yatak sistemleri ve anammox, hem daralan araziye hem de enerji baskısına yanıt olarak konvansiyonel aktif çamurun yanında giderek daha çok yer bulacak.

Biyolojik arıtma, atıksu arıtımının canlı kalbidir; ama arıtılmış suyu içme suyu kalitesine yaklaştıran, patojenleri gideren ve geriye kalan çamuru güvenle bertaraf eden son kademeler henüz anlatılmadı. Serinin üçüncü ve son bölümünde ileri arıtma, dezenfeksiyon ve çamur yönetimini ele alacağız.

Sıkça Sorulan Sorular

Biyolojik arıtma ile ikincil arıtma aynı şey mi?

Pratikte evet. Türkiye'de Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği, ikincil arıtmayı doğrudan "biyolojik arıtma veya diğer proseslerle arıtma" olarak tanımlar. İkincil arıtma, atıksu arıtma zincirinde birincil (fiziksel) arıtmadan sonra gelen ve çözünmüş organik maddeyi gideren kademedir; bu işi de büyük ölçüde mikroorganizmalar, yani biyolojik arıtma yapar.

Çamur yaşı (SRT) neden bu kadar önemli?

Çünkü bir mikroorganizmanın sistemde tutunabilmesi için, atılma hızından daha hızlı büyümesi gerekir. Çamur yaşı, hangi mikroorganizmaların reaktörde kalacağını seçer. Kısa çamur yaşında yalnızca hızlı büyüyen bakteriler tutunur; yavaş büyüyen nitrifiye (azot gideren) bakterilerin tutulabilmesi için çamur yaşının yeterince uzun olması (tipik olarak 11 ile 14 gün) gerekir. Bu yüzden çamur yaşı, bir tesisin yalnızca organik madde mi yoksa azot da mı giderebileceğini belirleyen tek en kritik parametredir.

Aktif çamur ile biyofilm (damlatmalı filtre, MBBR) arasındaki fark nedir?

Aktif çamurda mikroorganizmalar suyun içinde serbestçe askıda yüzer ve son çökeltim havuzunda çökeltilip geri devir ettirilerek sistemde tutulur. Biyofilm sistemlerinde ise mikroorganizmalar katı bir yüzeye (taş, plastik dolgu ya da hareketli taşıyıcı) yapışık bir tabaka olarak büyür. Biyofilm sistemleri şok yüklere daha dayanıklıdır ve çökelme sorunlarından bağışıktır; aktif çamur ise genelde daha yüksek ve esnek arıtma kapasitesi sunar. IFAS gibi hibrit sistemler ikisini birleştirir.

Şişkin çamur (bulking) nedir ve neden olur?

Şişkin çamur, ipliksi (filament) bakterilerin aşırı çoğalıp çamurun gevşeyip kabararak bir türlü çökmemesi durumudur. Çıkış suyu berrak görünse bile çamur son çökeltimde tutulamaz ve katılar arıtılmış suyla kaçar. Başlıca nedenleri havalandırmada düşük çözünmüş oksijen, düşük besin/mikroorganizma oranı, azot veya fosfor eksikliği ve septik giriş suyudur. En yaygın çözüm, girişe yüksek besinli bir selektör bölgesi eklemektir.

Biyolojik arıtma azot ve fosforu nasıl giderir?

Azot iki adımda giderilir: önce aerobik koşulda amonyak nitrata çevrilir (nitrifikasyon), sonra anoksik koşulda nitrat zararsız azot gazına indirgenip atmosfere verilir (denitrifikasyon). Fosfor ise gaz fazına sahip olmadığı için ancak çamura aktarılarak giderilir; biyolojik yolu (EBPR), fosfat biriktiren özel bakterilerin art arda anaerobik ve aerobik koşullarda fosforu aşırı miktarda hücrelerine almasına dayanır. Fosforca zenginleşen bu çamur sistemden atıldığında fosfor da giderilmiş olur.

Atıksu arıtma tesisi sera gazı yayar mı?

Evet. Biyolojik azot gideriminin ara ürünü olan diazot monoksit (N_2O), karbondioksitten yaklaşık 273 kat güçlü bir sera gazıdır ve bir tesisin toplam karbon ayak izinin büyük bölümünü (bazı tesislerde %60 ile %83'ünü) oluşturabilir. Buna havalandırmanın tükettiği elektriğin dolaylı karbon salımı da eklenir. Bu yüzden modern arıtma yalnızca deşarj kalitesiyle değil, enerji verimliliği ve sera gazı emisyonuyla da değerlendirilir.

BÖLÜM SONU

Bölüm özeti

Bölümdeki Kilit Mesaj kutularının birebir derlemesi.

§2.2 Biyolojik arıtma, çözünmüş kirliliği çökebilir biyokütleye çeviren canlı bir ekosistemdir. Giren organik maddenin bir kısmı enerji için karbondioksite yükseltgenir, bir kısmı yeni hücrelere dönüşür; asıl giderim, bu fazla biyokütlenin sistemden atılmasıyla tamamlanır.

§2.3 Monod denklemi, bir reaktörün boyutunu belirleyen köprüdür: mikroorganizmaların büyüme hızını sudaki kirlilik derişimine bağlar. Nitrifiye bakterilerin heterotroflardan 7 ile 8 kat yavaş büyümesi, biyolojik azot gideriminin neden uzun çamur yaşı, ılık sıcaklık ve yeterli oksijen istediğini tek başına açıklar.

§2.4 Aktif çamur prosesinin sırrı, suyun bekleme süresi (HRT, saatler) ile mikroorganizmaların bekleme süresini (çamur yaşı, günler) geri devir sayesinde birbirinden ayırabilmesidir. Çamur yaşı hangi mikroorganizmaların sistemde tutunacağını seçer; bu yüzden bir tesisin ne yapabileceğini (yalnızca BOİ mi, yoksa azot da mı giderir) belirleyen tek en kritik parametredir.

§2.6 Bir aktif çamur tesisi çoğu zaman havalandırma havuzunda değil son çökeltim havuzunda kazanır ya da kaybeder. Mikroorganizmalar kirliliği ne kadar iyi tüketirse tüketsin, üretilen biyokütle iyi çökmezse arıtılmış suyla kaçar; bu yüzden çamurun çökelebilirliği (SVI) en az giderim verimi kadar önemlidir.

§2.9 Azot ve fosfor giderimi, biyolojik arıtmayı basit bir “kirlilik yakma” işleminden, üç metabolik rejimi (anaerobik, anoksik, aerobik) tek bir çamur döngüsünde ustaca sıralayan bir mühendislik koreografisine dönüştürür. Ötrofikasyonu önlemenin, yani göllerimizi ve denizlerimizi korumanın anahtarı bu koreografidedir.

BAŞVURU

Semboller ve birimler

Bölümün denklemlerindeki değişkenler; tanımlar denklem kartlarından birebir.

SEMBOL	TANIM VE BİRİM	İLK GEÇTİĞİ
f	$BOİ_5$ → nihai BOİ faktörü (~0,45-0,68)	(2.4)
F/M	besin/mikroorganizma oranı (kg $BOİ_5$/kg MLVSS·gün)	(2.3)
K_s	yarı doygunluk sabiti (mg/L)	(2.1)
$MLSS$	karışık sıvı askıda katı (mg/L)	(2.5)
μ	spesifik büyüme hızı (1/gün)	(2.1)
μ_{max}	maksimum spesifik büyüme hızı (1/gün)	(2.1)
N_0, N	giriş/çıkış TKN, azot (mg/L)	(2.4)
P_x	üretilen fazla biyokütle (kg/gün)	(2.4)
Q	giriş debisi (m^3/gün)	(2.3)
Q_a	fazla çamur debisi (m^3/gün)	(2.2)
R_{O_2}	oksijen ihtiyacı (kg O_2/gün)	(2.4)
S	sınırlayıcı substrat derişimi (mg/L)	(2.1)
S_0	giriş $BOİ_5$ derişimi (mg/L)	(2.3)
S_0, S	giriş/çıkış $BOİ_5$ (mg/L)	(2.4)
SRT	(θ_c) çamur yaşı (gün)	(2.2)
SVI	çamur hacim indeksi (mL/g)	(2.5)
V	reaktör hacmi (m^3)	(2.2)
V_{30}	30 dakikada çöken çamur hacmi (mL/L)	(2.5)
X	reaktör biyokütlesi, MLVSS (mg/L)	(2.2)
X_a	atılan çamur derişimi (mg/L)	(2.2)

BAŞVURU

Denklem dizini

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

(2.1) **Monod Denklemi · mikrobiyal büyüme hızı** s. 9

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S}$$

(2.2) **Çamur Yaşı (SRT) · en kritik tasarım parametresi** s. 15

$$SRT = \frac{\mathrm{V} \cdot \mathrm{X}}{\mathrm{Q_a} \cdot \mathrm{X_a}}$$

(2.3) **Besin/Mikroorganizma Oranı (F/M)** s. 16

$$F/M = \frac{\mathrm{Q} \cdot \mathrm{S_0}}{\mathrm{V} \cdot \mathrm{X}}$$

(2.4) **Oksijen İhtiyacı · karbonlu giderim + nitrifikasyon** s. 19

$$R_{O_2} = \frac{\mathrm{Q}\,(\mathrm{S_0} - \mathrm{S})}{f} - 1{,}42\,\mathrm{P_x} + 4{,}57\,\mathrm{Q}\,(\mathrm{N_0} - \mathrm{N})$$

(2.5) **Çamur Hacim İndeksi (SVI) · çökelme kalitesi** s. 22

$$SVI = \frac{\mathrm{V_{30}} \times 1000}{\mathrm{MLSS}}$$

Kaynaklar

- Metcalf & Eddy – *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (biyolojik arıtma, aktif çamur, kinetik ve oksijen tasarımının temel el kitabı; Dokuz Eylül Üniversitesi/Çevre Bakanlığı Türkçe derlemesi üzerinden). https://web.deu.edu.tr/atiksu/ana58/bolum05.pdf
- ABD Enerji Bakanlığı (DOE) Better Plants – *Introduction to Activated Sludge Biokinetics* (Larry Moore, WEF Fellow), 2020. https://bptraining.ornl.gov/wp-content/uploads/2021/09/04-Introduction-to-Activated-Sludge-Biokinetics.pdf
- University of Colorado Boulder – *Stoichiometry II: Nitrogen in Energy Metabolism and Cell Synthesis* (J. Silverstein, CVEN 5534). https://ceae.colorado.edu/~silverst/cven5534/STOICHIOMETRY%20II%20nitrogen.pdf
- ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) – *Nutrient Control Design Manual* (EPA/600/R-10/100), 2010. https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/nutrient-control-design-manual.pdf
- Water Environment Federation (WEF) – *Liquid Stream Fundamentals: Aeration Design* (WSEC-2017-FS-024), 2017. https://www.wef.org/globalassets/assets-wef/direct-download-library/public/03—resources/wsec-2017-fs-024-mrrdc-lsf-aeration-design_final.pdf
- ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) – *Sequencing Batch Reactor Systems Technology Fact Sheet*. https://www.epa.gov/
- H.H. Bengtson – *Biological Wastewater Treatment II: MBBR Processes* (CED Engineering C04-045). https://www.cedengineering.com/
- Frontiers in Microbiology – *A Critical Assessment of the Microorganisms Proposed to be Important to EBPR in Full-Scale Wastewater Treatment Systems*, 2017. https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2017.00703/full
- Frontiers in Bioengineering and Biotechnology – *N2O emission reduction in the biological nitrogen removal process for wastewater with low C/N ratios*, 2023. https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2023.1247711/full
- Ekholm, J. vd. – *Case study of aerobic granular sludge and activated sludge: energy usage, footprint, and nutrient removal*, Water Environment Research (WEF), 2023. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wer.10914
- Royal HaskoningDHV / Nereda – *Aerobic Granular Sludge Technology* (teknik doküman ve SSS). https://nereda.haskoning.com/en/resources/frequently-asked-questions
- ACS *Environmental Science & Technology – A 20-Year Journey of Partial Nitritation and Anammox (PN/A): From Sidestream toward Mainstream*, 2022. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.1c06107
- Springer *Carbon Neutrality – Realization approaches for constructing energy self-sufficient wastewater treatment plants: a review*, 2025. https://link.springer.com/article/10.1007/s43979-025-00133-y
- IWA *Water Science & Technology – Critical review on end-of-pipe technologies for nitrous oxide removal and GHG mitigation at WWTPs*, 2025. https://iwaponline.com/wst/article/92/5/732/109234/
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı – *Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (KAAY)* (RG 8/1/2006-26047; değişiklik RG 8/12/2023-32393). https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=9844&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı – *Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY)* (RG 31/12/2004-25687; değişiklik RG 17/12/2022-32046). https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=7221&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) – *Su ve Atıksu İstatistikleri 2024*. https://www.tuik.gov.tr/
- Avrupa Birliği – *Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi (Direktif (AB) 2024/3019)*, 2024. https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/urban-wastewater-treatment-from-2027.html

AKADEMİ SERİSİ

Atıksu Arıtımının Esasları: serideki ciltler

Her cilt bir önceki cildin terminolojisi ve sembolleri üzerine kurulur.

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 2: Biyolojik (İkincil) Arıtma* (Yeşil Ajanda Akademi Serisi, Sürüm 1.0). yesilajanda.com/atiksu-aritimi-esaslari-biyolojik-aritma

YEŞİL AJANDA

Çevre, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik

AKADEMİ SERİSİ

Atıksu Arıtımının Esasları · Bölüm 2 / 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-biyolojik-aritma/

Yayın tarihi: 28 Ağustos 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.