YEŞİL AJANDA

Çevre, İklim Değişikliği ve Sürdürülebilirlik

AKADEMİ SERİSİ



Atıksu Arıtımının Esasları

1 / 3

Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma

Atıksu arıtımının esasları: karakterizasyon (BOİ, KOİ, AKM), kütle dengesi, ızgara, kum tutucu ve birincil çökeltim teorisi; Türkiye deşarj standartları ve güncel verilerle teknik rehber.

1 Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma

2 Biyolojik (İkincil) Arıtma

3 İleri Arıtma, Dezenfeksiyon ve Çamur Yönetimi

1

Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma

BU BÖLÜMDE

1.1	Atıksu Nedir ve Nereden Gelir?	3
1.2	Atıksu Arıtımı Neden Kademeli Bir Süreçtir?	4
1.3	Atıksuyu Tanımak: Karakterizasyon Parametreleri	6
1.4	Debi, Kütle Dengesi ve Kirlilik Yükü: Tasarımın Aritmetiği	12
1.5	Ön Arıtma: Izgaralar, Kum Tutucular ve Yüzdürme	16
1.6	Birincil Çökeltim: Çökelme Teorisi ve Tasarım	22
1.7	Suyun Tesis İçindeki Yolculuğu: Fiziksel Hattın Bütünü	31
1.8	Fiziksel ve Birincil Arıtmada İzleme, İşletme ve Sık Sorunlar	32
1.9	Fiziksel Arıtmanın Sürdürülebilirlik Boyutu: Enerji ve Kaynak Geri Kazanımı	34
1.10	Türkiye'de Uygulama ve Deşarj Standartları	35
1.11	Sonuç: Görünmeyen Ama Vazgeçilmez İlk Halka	40

Dünyada üretilen evsel atıksuyun yalnızca **%56'sı** güvenli biçimde arıtılıyor. Birleşmiş Milletler İstatistik Bölümü'nün 2025 tarihli SDG raporuna[1] göre, 2024 yılında küresel ölçekte oluşan **332 milyar m³** hane halkı atıksuyunun neredeyse yarısı (her 100 litrenin 44'ü) hiçbir arıtmadan geçmeden ya da yetersiz arıtılarak nehirlere, göllere ve denizlere karışıyor. Türkiye'de tablo daha iyi ama boşluk hâlâ görünür: **TÜİK'e göre**[2] belediye nüfusunun **%92,8'i** kanalizasyon şebekesine bağlıyken, atıksu arıtma tesisiyle hizmet alan nüfus oranı **%76,9'da** kalıyor (2024). Aradaki yaklaşık **16 puanlık fark**, şebekeye ulaşan her yüz kişiden on altısının atıksuyunun arıtılmadan alıcı ortama verildiği anlamına geliyor.

Bu tablonun arkasında, çoğu zaman görünmeyen ama son derece hassas bir mühendislik disiplini var: atıksu arıtımı. Yeşil Ajanda olarak bu teknik seride, atıksu arıtımının esaslarını bir üniversite dersi titizliğinde, adım adım ele alıyoruz. Üç bölümlük serinin bu ilk bölümü **temelleri ve fiziksel/birincil arıtmayı** kapsıyor: atıksuyu ölçtüğümüz parametreler, debi ve kütle dengesi mantığı, ızgaralardan kum tutuculara kadar ön arıtma üniteleri ve birincil çökeltimin teorisi ile tasarımı. İkinci bölüm biyolojik (ikincil) arıtmaya, üçüncü bölüm ise ileri arıtma, dezenfeksiyon ve çamur yönetimine ayrılacak.

Peki atıksu arıtımı tam olarak nasıl çalışıyor, hangi kirleticileri neye göre ölçüyoruz ve bir arıtma tesisinin ilk kademeleri neden bu kadar kritik? Bu bölümde sırasıyla şunları bulacaksınız:

- ✓ Atıksu arıtımının dört kademeli mantığı ve her kademenin işlevi
- ✓ Karakterizasyon parametreleri (BOİ, KOİ, AKM, azot, fosfor) tanımları ve tipik değerleri
- ✓ Debi, kütle dengesi ve kirlilik yükü hesabının temelleri (örnek hesaplarla)
- ✓ Ön arıtma üniteleri: ızgara, kum tutucu, yağ-gres tutucu ve yüzdürme
- ✓ Birincil çökeltim: çökelme teorisi, yüzeysel yükleme hızı ve tasarım kriterleri
- ✓ Türkiye'de deşarj standartları ve ön arıtma yükümlülükleri

1.1 Atıksu Nedir ve Nereden Gelir?

Atıksu, kullanım sonucu kirlenerek özellikleri kısmen veya tamamen değişmiş sudur. Kaynağına göre başlıca üç türe ayrılır ve her türün karakteri, arıtma yaklaşımını doğrudan belirler.

1. Kaynak: unstats.un.org
2. Kaynak: data.tuik.gov.tr

- **Evsel (kentsel) atıksu:** Konutlardan, ticari ve kurumsal yapılardan gelen, mutfak, banyo ve tuvalet kullanımından kaynaklanan sudur. Bileşimi görece öngörülebilir ve biyolojik olarak arıtmaya elverişlidir; bu serinin temel referans atıksuyu budur.
- **Endüstriyel atıksu:** Üretim süreçlerinden kaynaklanır ve sektöre göre son derece değişkendir. Bu değişkenlik somuttur: bir **gıda/süt** fabrikasının atıksuyu çok yüksek organik yük (yüksek BOİ/KOİ) taşırken, bir **tekstil boyahanesinin** atıksuyu renk, yüksek pH ve zor ayrışan bileşikler; bir **metal kaplama** tesisininki ise ağır metaller ve düşük organik içerik barındırır. Bu nedenle endüstriyel atıksular çoğu zaman kanalizasyona verilmeden önce, kaynağında kendine özgü bir **ön arıtma** gerektirir, çünkü kentsel biyolojik arıtma tesisleri toksik veya aşırı yüklü akımlarla baş edemez ve şok yükler tüm biyolojik dengeyi bozabilir.
- **Yağmursuyu (yüzeysel akış):** Yağışla oluşan ve yüzeyleri (yolları, çatıları, sanayi alanlarını) yıkayarak kir, kum, yağ ve çeşitli kirleticiler taşıyan sudur. Özellikle yağışın ilk döneminde oluşan **"ilk yıkama" (*first flush*)** en kirli akıştır, çünkü kuru dönemde yüzeylerde biriken kirleticileri toplar; bu yüzden yağmursuyu her zaman "temiz" kabul edilemez.

Bu noktada kritik bir altyapı ayrımı devreye girer: **birleşik** ve **ayrık** kanalizasyon sistemleri. Birleşik sistemlerde evsel atıksu ve yağmursuyu aynı boruyla taşınır; bu, kuru havada düşük, yağışlı havada ise ani ve çok yüksek debiler anlamına gelir, arıtma tesisinin pik debi kapasitesini zorlayan ve kum yükünü artıran bir durumdur. Ayrık sistemlerde ise ikisi ayrı borularla toplanır; atıksu debisi daha kararlıdır. Sistem tipi, tesisin hidrolik tasarımını, kum tutucu boyutunu ve taşkın (bypass) düzenlemelerini doğrudan etkiler.

Atıksuyun kaynağı yalnızca bileşimini değil, alıcı ortamla ilişkisini de belirler. TÜİK verilerine göre Türkiye'de kanalizasyondan deşarj edilen atıksuyun **%48,5'i akarsulara, %37,9'u denizlere** verilmektedir (2024). Bu dağılım, kıyı kentlerinde arıtma kalitesinin deniz kirliliği[3] ve deniz ekosistemleri için taşıdığı önemi ve nehir havzalarında kümülatif su kirliliği[4] yükünün neden titizlikle yönetilmesi gerektiğini somutlaştırır.

1.2 Atıksu Arıtımı Neden Kademeli Bir Süreçtir?

Atıksu arıtımının bir mühendislik disiplini olarak doğuşu, 19. yüzyıl sonlarında kentleşmenin ve kolera gibi su kaynaklı salgınların halk sağlığını tehdit etmesiyle başladı; önce basit çökeltme, ardından biyolojik arıtma yöntemleri geliştirildi. Bugün gelinen noktada atıksu arıtımı yalnızca bir halk sağlığı önlemi değil, aynı zamanda su kaynaklarının korunması, ekosistem sağlığı ve döngüsel ekonomi açısından da stratejik bir

3. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/deniz-kirliligi-nedir-nedenleri-ve-etkileri
4. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/su-kirliligi-nedir-nedenleri-etkileri-ve-cozum-yollari

alandır. Yöntem ne kadar gelişirse gelişsin, temel mantık değişmedi: kirliliği en kolay giderilebilen fiziksel bileşenlerinden başlayarak kademeli olarak ayırmak.

Bu doğrultuda atıksu arıtımı, tek bir işlemle değil, birbirini tamamlayan **dört ardışık kademeyle** yürütülür: ön arıtma (*preliminary*), birincil arıtma (*primary*), ikincil arıtma (*secondary*) ve ileri/üçüncül arıtma (*tertiary/advanced*). Bu kademelenmenin temel mantığı oldukça basit: her kademe, bir sonrakinin gideremeyeceği ya da verimsiz gidereceği kirletici sınıfını uzaklaştırır. Kaba katılar mekanik olarak, çökebilen maddeler yerçekimiyle, çözünmüş organik madde biyolojik olarak, kalıntı kirleticiler ise kimyasal ve fiziksel ileri proseslerle ayrılır.

Ön arıtma, atıksudaki iri katıları, bez, plastik gibi yüzen maddeleri ve kum, çakıl gibi ağır inorganik parçacıkları giderir. Amacı arıtma değil, **koruma ve hazırlıktır**: pompaları aşınmadan, boruları tıkanmadan korur, alt kademelerin verimini artırır ve tesisin ömrünü uzatır. Kapsamına ızgaralama, öğütme, kum tutma, yağ-gres giderimi ve debi dengeleme girer.

Birincil arıtma, ham veya ön arıtılmış atıksuyu bir çökeltim havuzunda bekleterek askıda katı maddenin yerçekimiyle dibe çökmesini sağlar. İyi tasarlanmış konvansiyonel bir birincil çökeltim havuzu, evsel atıksuda **giriş askıda katı maddesinin (AKM) %50–65'ini, biyokimyasal oksijen ihtiyacının (BOİ) %25–35'ini** ve azot/fosforun yalnızca %5–10'unu giderir. Görüldüğü gibi birincil arıtma tek başına yeterli değildir (çözünmüş kirleticilere neredeyse hiç dokunmaz) ama sonraki biyolojik kademenin yükünü önemli ölçüde hafifletir.

İkincil arıtma, birincil çökeltimden sonra geriye kalan çözünmüş ve kolloidal organik maddeyi biyolojik yolla giderir; aktif çamur ve damlatmalı filtre gibi sistemler bu kademede devreye girer (serinin ikinci bölümünün konusu). ABD federal mevzuatı ikincil arıtmayı sayısal olarak tanımlar: **40 CFR § 133.102'ye[5] göre** 30 günlük ortalama $BOİ_5$ gideriminin en az **%85** olması, deşarj derişiminin **30 mg/L'yi** aşmaması ve pH'ın 6,0–9,0 aralığında tutulması gerekir. Bu tanım, "arıtılmış atıksu" ifadesinin dünya genelinde neye karşılık geldiğine dair ortak bir zemin sunar.

İleri/üçüncül arıtma ise ikincil arıtmanın tam gideremediği besin maddelerini (azot, fosfor), kalıntı organikleri, patojenleri ve mikrokirleticileri hedefler; sıkı deşarj standartlarına uyum ve yeniden kullanım için uygulanır (serinin üçüncü bölümü).

Bu zincirin küresel ölçekte ne kadar eksik işlediğini rakamlar açıkça göstermektedir. **UN-Water'a göre** 2022'de hane halkı atıksuyunun **%42'si** (yaklaşık **113 milyar m^3**) güvenli arıtılmadan çevreye deşarj edildi. Endüstriyel atıksuda tablo daha da ağır: veri bildiren ülkelerde endüstriyel atıksuyun yalnızca **%27'si** güvenli arıtılıyor. Dahası, güvenli arıtma oranında 2020'den bu yana anlamlı bir ilerleme kaydedilmedi; SDG

5. Kaynak: law.cornell.edu

6.3'ün 2030 hedefine (arıtılmamış atıksuyu yarıya indirmek) giden yolda mevcut hız yetersiz görülüyor. Bu durgunluk, arıtma altyapısının (en temel fiziksel kademelerden başlayarak) neden küresel bir öncelik olmaya devam ettiğini gösteriyor.

Bu kademeli yapının bugün neden daha da önem kazandığını, güncel düzenlemeler de doğruluyor. Avrupa Birliği'nin **12 Aralık 2024'te** yayımlanan ve 91/271/EEC'nin yerini **1 Ağustos 2027'den itibaren** alacak yeni Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi (Direktif (AB) 2024/3019[6]), **1.000 nüfus eşdeğeri** ve üzerindeki tüm yerleşimlerde 2035 sonuna kadar en az ikincil arıtmayı zorunlu kılıyor ve 10.000 NE üzeri büyük tesisler için 2045'e kadar enerji nötrlüğü hedefi getiriyor. Yani fiziksel arıtma, "tek başına yeterli olmayan ama vazgeçilmez ilk adım" konumunu koruyor.

> **UZMAN NOTU**
>
> Türkiye'de arıtılan atıksuyun **%21,4'ü** yalnızca fiziksel (birincil) arıtmadan geçiyor (TÜİK, 2024). Sayıca az olsalar da bu tesisler büyük kapasiteli olduğundan, işledikleri hacim toplam arıtılan suyun beşte birine ulaşıyor. Bu da fiziksel arıtmayı, ileri teknolojiler tartışılırken bile ülkemiz için güncel ve somut bir konu haline getiriyor.

KİLİT MESAJ

Arıtma kademeleri bir hiyerarşi değil, bir zincirdir; her halka bir sonrakini mümkün kılar. Fiziksel arıtma bu zincirin ilk ve en dayanıklı halkasıdır.

1.3 Atıksuyu Tanımak: Karakterizasyon Parametreleri

Bir atıksuyu arıtmadan önce onu ölçmek gerekir. Arıtma tesisi tasarımının tamamı (havuz hacimlerinden kimyasal dozlarına, enerji ihtiyacından deşarj uygunluğuna kadar) atıksuyun **karakterizasyonuna**, yani içindeki kirleticilerin türünü ve miktarını belirleyen bir dizi parametreye dayanır. Bu parametreleri tanımak, atıksu mühendisliğinin alfabesidir.

Organik Madde: BOİ, KOİ ve TOK

Atıksudaki organik kirliliğin üç temel göstergesi vardır ve üçü de aynı şeyi farklı açılardan ölçer.

Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (**$BOİ_5$** / ***BOD_5***), mikroorganizmaların atıksudaki biyolojik olarak ayrışabilen organik maddeyi parçalarken tükettiği oksijen miktarıdır. Standart ölçüm, 20°C'de kapalı bir şişede **5 günlük** inkübasyon sonunda çözünmüş oksijendeki azalmayı belirler; adındaki "5" bu süreyi ifade eder. BOİ, doğadaki

6. Kaynak: eur-lex.europa.eu

oksijen tüketimini birebir taklit ettiği için alıcı ortama etkiyi en gerçekçi yansıtan parametredir, ama sonucu almak günler alır.

Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ / *COD*), organik maddenin güçlü bir kimyasal oksitleyici (dikromat) ile parçalanması sırasında tüketilen oksijen eşdeğerini ölçer. Biyolojik olarak ayrışsın ya da ayrışmasın **neredeyse tüm** organik maddeyi kapsadığı için KOİ her zaman BOİ'den yüksektir; en büyük avantajı sonucun saatler içinde alınmasıdır.

Toplam organik karbon (TOK / *TOC*), organik karbonun yüksek sıcaklıkta CO_2'ye dönüştürülüp kızılötesi analizle ölçülmesine dayanır; yalnızca 5–10 dakikada sonuç verdiği için hızlı izleme uygulamalarında tercih edilir.

Bu üç parametre arasındaki ilişki, atıksuyun "arıtılabilirliği" hakkında kritik bir ipucu taşır. **KOİ/BOİ$_5$ oranı**, evsel atıksularda tipik olarak **1,5–2,0** arasındadır ve bu, atıksuyun biyolojik arıtmaya elverişli olduğunu gösterir. Oran 2,5–3'ü aştığında biyolojik olarak zor ayrışan maddelerin, 3'ün üzerine çıktığında ise endüstriyel kaynaklı ya da mikroorganizmaları baskılayan toksik bileşiklerin varlığından şüphelenilir. Tersten bakıldığında, **BOİ$_5$/KOİ oranının 0,5'in üzerinde** olması yüksek biyoarıtılabilirliğe, 0,3'ün altına inmesi ise zayıf arıtılabilirliğe veya inhibitör madde şüphesine işaret eder.

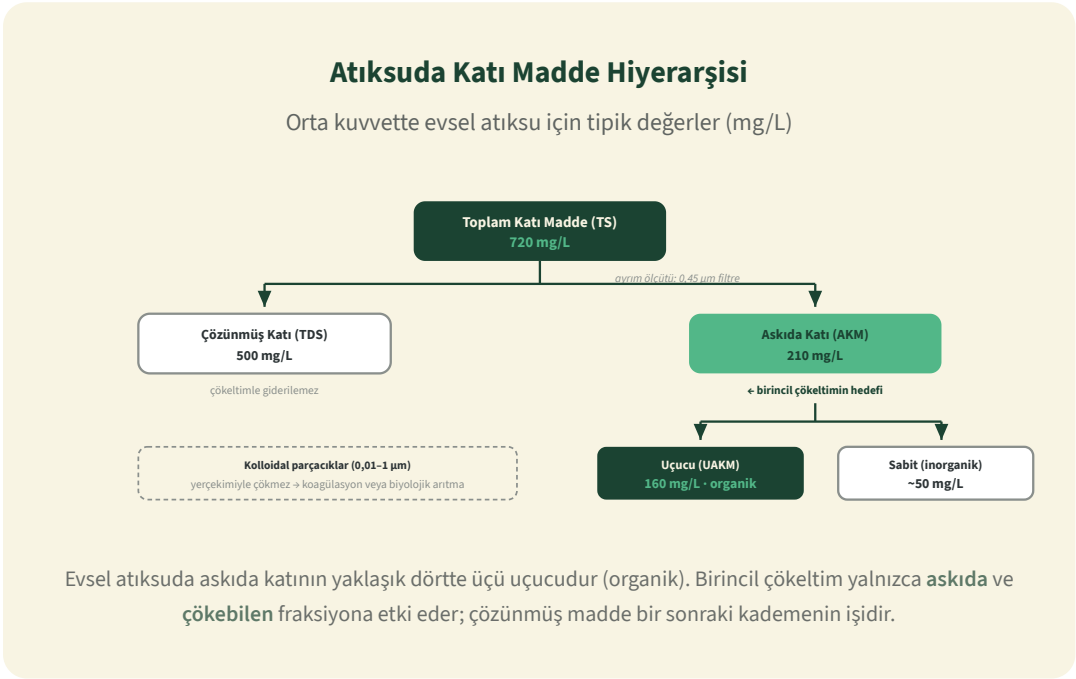
İleri düzey tasarım ve modelleme çalışmalarında KOİ, tek bir sayı olarak değil, **fraksiyonlarına** ayrılarak ele alınır. Toplam KOİ önce **biyoayrışabilir** ve **inert (ayrışmayan)** olmak üzere ikiye; her biri de **çözünmüş** ve **partiküler** olmak üzere yeniden ikiye ayrılır. Böylece dört temel fraksiyon ortaya çıkar: hızlı ayrışan çözünmüş KOİ, yavaş ayrışan partiküler KOİ, inert çözünmüş KOİ ve inert partiküler KOİ. Bu ayrım pratikte belirleyicidir: **çözünmüş inert** fraksiyon hiçbir arıtmayla giderilemez ve doğrudan çıkışa geçer (deşarjdaki kalıntı KOİ'nin ana kaynağıdır); **partiküler** fraksiyonlar ise çökeltimle uzaklaştırılabilir. Aktif çamur sistemlerinin matematiksel modellerinin (örneğin IWA'nın ASM serisi) temelinde tam da bu fraksiyonlama yatar, ki bu, serinin ikinci bölümünde biyolojik kinetiği ele alırken tekrar karşımıza çıkacak.

Katı Maddeler: AKM ve UAKM

Atıksudaki katılar bir hiyerarşi oluşturur. En üstte **toplam katı madde (TS)** vardır; bu, filtrasyona göre **çözünmüş (TDS)** ve **askıda (AKM)** olmak üzere ikiye ayrılır. **Askıda katı madde (AKM / *TSS*)**, 0,45 µm gözenekli bir filtreden geçirildiğinde tutulan tüm parçacık maddeyi kapsar ve birincil çökeltimin doğrudan hedefidir. **Uçucu askıda katı madde (UAKM / *VSS*)** ise AKM'nin 550°C'de yanan, yani organik olan fraksiyonunu temsil eder; bu yönüyle atıksudaki biyokütlenin dolaylı bir göstergesidir. Evsel atıksuda AKM'nin yaklaşık dörtte üçü uçucudur (örneğin orta kuvvette 210 mg/L AKM'nin ~160 mg/L'si UAKM'dir).

Askıda katıların boyutu 0,01 µm'lik kolloidal parçacıklardan 100 µm'lik organik döküntülere kadar geniş bir aralığa yayılır. Bu boyut dağılımı belirleyicidir: iri ve ağır parçacıklar çökeltimle kolayca ayrılırken, **kolloidal** parçacıklar yerçekimiyle pratik sürelerde çökmez; bunların giderilmesi ya kimyasal koagülasyonla (yük nötralizasyonu) ya da biyolojik yolla mümkündür. Askıda katıların çökebilen bölümü, sahada basit bir aletle (**Imhoff konisi**) ölçülür: 1 litre atıksu koni içinde 1 saat bekletilir ve dibe çöken hacim mL/L cinsinden okunur. Evsel atıksuda çökebilen katı tipik olarak **5–20 mL/L** aralığındadır ve birincil çökeltimden ne kadar verim beklenebileceğinin hızlı bir göstergesidir.

ŞEKİL 1.1



Evsel atıksuda askıda katının yaklaşık dörtte üçü uçucudur (organik). Birincil çökeltim yalnızca **askıda** ve **çökebilen** fraksiyona etki eder; çözünmüş madde bir sonraki kademenin işidir.

Besin Maddeleri: Azot ve Fosfor

Azot ve fosfor, aşırı miktarda alıcı ortama verildiğinde **ötrofikasyona** (su kütlelerinde aşırı yosun üremesi ve oksijen tükenmesine) yol açtığı için titizlikle izlenir. Azot atıksuda birkaç formda bulunur: **toplam Kjeldahl azotu (TKN)**, organik azot ile amonyum azotunun (NH_4-N) toplamıdır; nitrat (NO_3-N) ve nitrit bu ölçüme dahil değildir. **Toplam azot (TN)** ise tüm formları kapsar. Ham evsel atıksuda azotun büyük kısmı organik ve amonyum formundadır; nitrat neredeyse yok denecek kadar azdır. **Toplam fosfor (TP)** organik ve inorganik (fosfat) fosforu birlikte ifade eder. Bu parametrelerin biyolojik ve kimyasal yollarla giderimi serinin sonraki bölümlerinin konusu olacak; bu bölümde önemli olan, ham atıksudaki tipik düzeylerini tanımaktır.

Diğer Temel Parametreler: pH, Alkalinite, Yağ-Gres

pH, biyolojik arıtmanın sağlığı için belirleyicidir: ham evsel atıksu genellikle nötre yakın, **6,5–8,5** aralığındadır; nitrifikasyon için pH'ın 6,5'in, metan üretimi için 7,2'nin

ir ve mg/L $CaCO_3$ cinsinden ifade edilir; özellikle nitrifikasyon sırasında tüketildiği için biyolojik arıtmada kritik bir rezervdir. **Yağ ve gres**, bitkisel, hayvansal veya petrol kökenli hidrofobik bileşiklerdir; biyolojik ayrışmaya dirençli oldukları ve kanalizasyonda tıkanmaya yol açtıkları için ön arıtmada özel olarak giderilirler.

Birkaç destekleyici parametre de tabloyu tamamlar. **Sıcaklık**, biyolojik reaksiyon hızlarını doğrudan etkiler (sıcaklık düştükçe mikrobiyal aktivite yavaşlar) ve ayrıca çözünmüş oksijen doygunluğunu belirler; bu yönüyle özellikle kış aylarında biyolojik arıtma performansının belirleyicilerinden biridir. **İletkenlik**, sudaki çözünmüş iyonların toplam miktarının hızlı bir göstergesidir ve beklenmedik bir yükseliş, endüstriyel veya tuzlu su karışımına işaret edebilir. **Klorür** ise evsel atıksuda tipik olarak 30–90 mg/L düzeyindedir ve deniz suyu sızması ya da endüstriyel deşarj gibi dış katkıların izlenmesinde kullanışlı bir belirteçtir. Bu parametreler tek başlarına arıtma hedefi olmasa da, atıksuyun kaynağı ve davranışı hakkında değerli ipuçları taşır.

Mikrobiyal Yük ve Yeni Nesil Kirleticiler

Atıksu, kimyasal parametrelerin yanı sıra yoğun bir **mikrobiyal yük** de taşır: bakteriler, virüsler, protozoa ve parazit yumurtaları. Bunların tamamını tek tek saymak pratik olmadığından, dışkı kaynaklı kirliliğin göstergesi olarak **indikatör organizmalar** (özellikle toplam ve fekal koliform, *E. coli*) izlenir. Patojen giderimi esas olarak dezenfeksiyon kademesinin (serinin üçüncü bölümü) konusudur; ancak birincil çökeltim, patojenlerin bir bölümünü askıda katılara tutunmuş halde çamura aktararak dolaylı bir azaltım sağlar.

Son yıllarda karakterizasyonun kapsamı **yeni nesil kirleticilerle** genişledi. **Mikroplastikler** ve **PFAS** (per- ve polifloroalkil maddeler), giderek daha yaygın izlenen parametreler haline geldi. İlginç biçimde, fiziksel ve birincil arıtma bu konuda beklenenden etkili: çalışmalar, arıtma tesisi zincirinin mikroplastiklerin ortalama **%88'ini** giderdiğini ve giderilen kısmın büyük bölümünün çamurda biriktiğini gösteriyor. Bu da atıksu arıtımının, kirliliği yok etmekten çok bir ortamdan (su) diğerine (çamur) taşıdığını ve dolayısıyla çamur yönetiminin (serinin üçüncü bölümü) neden bu kadar kritik olduğunu hatırlatıyor.

Tipik Değerler: Zayıf, Orta ve Kuvvetli Atıksu

Evsel atıksu, seyrelme derecesine göre "zayıf", "orta" ve "kuvvetli" olarak sınıflandırılır, ki bu sınıflandırma büyük ölçüde kişi başına düşen su tüketimine bağlıdır: bol su kullanılan yerlerde atıksu seyrelir (zayıf), az su kullanılan yerlerde derişir (kuvvetli). Atıksu mühendisliğinin başvuru kaynağı kabul edilen **Metcalf & Eddy** ekolünün klasikleşmiş tablosu, ham evsel atıksu için şu temsili değerleri verir:

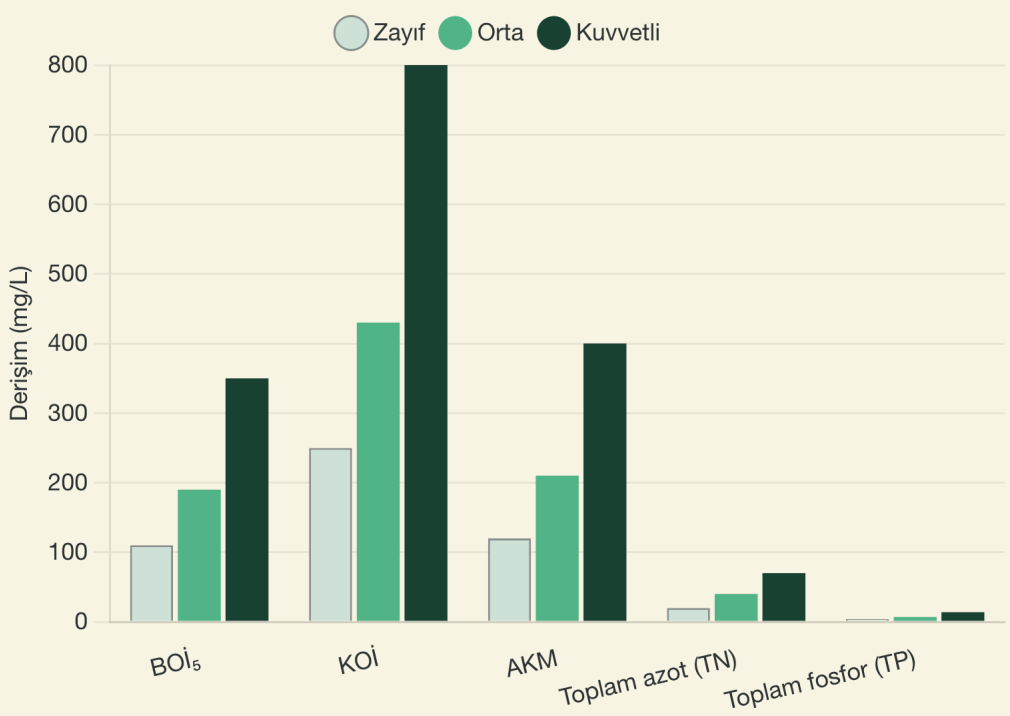
TABLO 1.1

Parametre	Birim	Zayıf	Orta	Kuvvetli
Toplam askıda katı (AKM)	mg/L	120	210	400
— Uçucu AKM (UAKM)	mg/L	95	160	315
$BOİ_5$	mg/L	110	190	350
KOİ	mg/L	250	430	800
TOK	mg/L	80	140	260
Toplam azot (TN)	mg/L	20	40	70
— Amonyum (NH_4-N)	mg/L	12	25	45
Toplam fosfor (TP)	mg/L	4	7	14
Yağ-gres	mg/L	50	90	100

Kaynak: Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering* (temsili değerler; kaynaklar arasında özellikle toplam fosfor için farklı aralıklar bildirilmektedir).

Bu değerler bir “ortalama atıksu” resmi çizer: orta kuvvetteki bir evsel atıksuda $BOİ_5$ yaklaşık **190 mg/L**, KOİ **430 mg/L**, AKM ise **210 mg/L** dolayındadır. Tasarımcı, kendi tesisinin giriş suyunu bu referans çerçevesinde değerlendirir ve sapmaları (örneğin beklenenden yüksek KOİ/BOİ oranı) endüstriyel katkı işareti olarak okur.

ŞEKİL 1.2



Sınıflandırma büyük ölçüde **su tüketimine** bağlıdır: bol su kullanılan yerlerde atıksu seyrelir (zayıf), az su kullanılan yerlerde derişir (kuvvetli). Grafikte azot ve fosforun organik yüke kıyasla ne kadar küçük ölçekte kaldığı da görülüyor, ama giderimleri en zor olanlar onlardır.

Ancak bu tabloya bir "sabit gerçek" gibi değil, bir başlangıç referansı gibi bakmak gerekir. Gerçek atıksu, mevsime (yaz turizmiyle nüfusu artan kıyı kentleri), günün saatine, yerel su tüketim alışkanlıklarına ve endüstriyel katkıya göre belirgin biçimde dalgalanır. Bu yüzden ciddi tasarımlar tek bir tabloya değil, o yerleşimin **kendi ölçülmüş verilerine** dayanır; tablo yalnızca bir başlangıç tahmini ve tutarlılık kontrolü sağlar. Nitekim kaynaklar arasında bazı parametrelerde (özellikle toplam fosforda) kayda değer farklar bulunması da bu değişkenliğin bir yansımasıdır, bu nedenle kritik tasarım kararlarında yerel numune sonuçları esas alınmalıdır.

UZMAN NOTU

Tablodaki değerlerin derişim (mg/L) cinsinden olduğuna dikkat edilmelidir. Aynı nüfus, az su tükettiğinde daha *derişik* ama daha *az hacimli* atıksu üretir; bol su tükettiğinde tam tersi. Bu nedenle tesis tasarımında derişim kadar, birazdan ele alacağımız **kütle yükü** (kg/gün) da belirleyicidir, çünkü arıtılması gereken şey litredeki miligram değil, günde giren toplam kirletici kütlesidir.

KİLİT MESAJ

Karakterizasyon, arıtmanın pusulasıdır. BOİ, KOİ, AKM, azot ve fosforun ne olduğunu ve tipik düzeylerini bilmeden ne havuz boyutlandırılabilir ne de deşarj uygunluğu değerlendirilebilir.

1.4 Debi, Kütle Dengesi ve Kirlilik Yükü: Tasarımın Aritmetiği

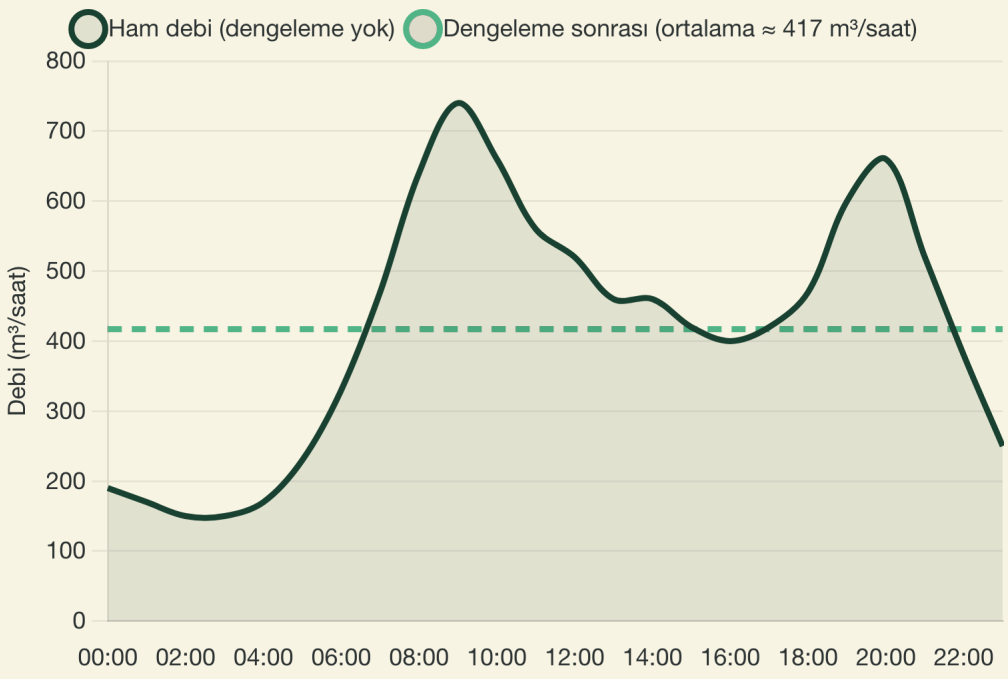
Karakterizasyon "ne kadar kirli" sorusunu yanıtlar; **debi ve kütle dengesi** ise "günde ne kadar kirletici geliyor" sorusunu. Bir arıtma tesisi, litredeki derişime göre değil, birim zamanda işlemek zorunda olduğu toplam kirletici kütlesine göre tasarlanır. Bu nedenle atıksu mühendisliğinin en temel işlemi, derişimi debiyle birleştirerek **kütle yükünü** hesaplamaktır.

Debi ve Debinin Değişkenliği

Debi (Q), birim zamanda tesise giren atıksu hacmidir (m^3/gün veya m^3/s). Evsel atıksu debisi büyük ölçüde su tüketimini izler: **TÜİK'e göre** Türkiye'de kişi başına günlük ortalama atıksu deşarjı **210 litredir** (2024), İstanbul'da 291 litreye çıkarken İzmir'de 186 litreye iner. Uluslararası mühendislik pratiğinde ise 1 nüfus eşdeğeri için sıklıkla **200 L/gün** referans alınır.

Debi gün içinde sabit değildir. Sabah ve akşam saatlerinde ortalamanın yaklaşık **iki katına** çıkar, gece saatlerinde **yarısına** kadar iner. Üstelik bu değişkenlik tesis ölçeğine de bağlıdır: küçük yerleşimlerde (nüfus ~10^3) saatlik zirve debinin ortalamaya oranı **4,0'a** ulaşırken, büyük sistemlerde (nüfus ~10^6) bu oran **1,7'ye** kadar düşer, çünkü çok sayıda kaynağın dalgalanması istatistiksel olarak birbirini söndürür. İşte bu yüzden **debi dengeleme havuzları** kullanılır: günlük dalgalanmayı sönümleyip alt kademelere neredeyse sabit bir debi sunarak biyolojik prosesleri şok yüklerden korurlar.

ŞEKİL 1.3



Ham debi sabah ve akşam ortalamanın **~1,8 katına** çıkar, gece **üçte birine** iner. Dengeleme havuzu bu dalgalanmayı sönümleyerek alt kademelere kararlı bir debi sunar ve biyolojik prosesleri şok yüklerden korur.

Debiyi artıran bir başka önemli etken, **sızma ve kaçak sudur** (*infiltration/inflow*). Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu yerlerde çatlak boru ve ek yerlerinden şebekeye sızan yeraltı suyu (infiltrasyon) ile yağmurda bilinçli/bilinçsiz bağlantılardan giren yüzey suyu (inflow), özellikle eski kanalizasyon sistemlerinde debiyi kayda değer ölçüde şişirir. Bu "fazladan su" atıksuyu seyreltir (derişimi düşürür) ama hidrolik yükü artırır; yani tesis, aslında arıtması gerekmeyen temiz suyu pompalamak ve işlemek zorunda kalır. Bu yüzden sızma-kaçak kontrolü, hem tasarım hem işletme aşamasında dikkate alınan bir parametredir.

Tüm bu değişkenlik, tesiste tek bir "debi" yerine bir **tasarım debisi ailesinin** kullanılmasını gerektirir. Her ünite, kendi işlevine en uygun debi senaryosuna göre boyutlandırılır:

TABLO 1.2

Tasarım debisi	Boyutlandırdığı üniteler
Zirve saatlik debi	Pompalar, kanallar, kum tutucu, çökeltim havuzu, dezenfeksiyon
Maksimum günlük debi	Dengeleme havuzu, klor temas tankı, çamur pompalama
Maksimum aylık yük	Havalandırma havuzu, kimyasal depolama
15 günlük maksimum yük	Anaerobik/aerobik çürütücüler

Bu yaklaşım, aynı tesisin farklı bölümlerinin neden farklı "en kötü durum" senaryolarına göre tasarlandığını açıklar: bir çökeltim havuzu anlık pik debiye dayanmalıyken, bir çürütücü uzun dönemli ortalama yüke göre boyutlandırılır.

Kişi başına düşen kirletici yükleri de tasarımın temel girdileridir. Metcalf & Eddy referanslarına dayanan tipik değerler, gelişmiş ülkelerde kişi başına günde yaklaşık **60–62 g BOİ$_5$, 88 g AKM, 11–12 g TKN ve 2–2,5 g toplam fosfor** düzeyindedir; bir Türkiye kenti için ölçülen değerler (BOİ$_5$ ~47 g, KOİ ~85 g, AKM ~35 g) bu aralıkla uyumludur. Bu katsayılar, nüfustan hareketle bir tesisin toplam kütle yükünü tahmin etmenin pratik yoludur.

Kütle Yükü Hesabı

Kütle yükünün temel formülü sadedir (not: mg/L ile g/m^3 sayısal olarak eşittir); en sık hesaplanan yükler BOİ, KOİ, AKM ve TKN yükleridir:

DENKLEM 1.1 · KÜTLE YÜKÜ · TASARIMIN TEMEL HESABI

$$\text{Yük} = \frac{\text{Derişim} \times \text{Debi}}{1.000} \qquad (1.1)$$

Örnek: 200 mg/L BOİ$_5$ × 1 m^3/s × 86.400 s/gün ÷ 1.000 = **17.280 kg BOİ$_5$/gün**

BURADA
Yük kütle yükü (kg/gün)
Derişim (g/m^3 = mg/L)
Debi (m^3/gün)

Bu **17,3 tonluk** günlük organik yük, tesisin havalandırma havuzunun hacminden oksijen ihtiyacına, çamur üretiminden enerji tüketimine kadar her şeyin başlangıç noktasıdır.

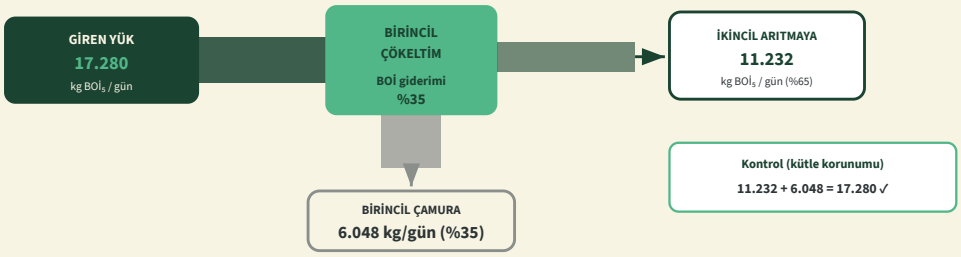
Kütle yükü hesabı, **kütlenin korunumu** ilkesinin özel bir uygulamasıdır. Herhangi bir arıtma ünitesinin çevresine hayali bir sınır çizildiğinde, temel denge şu biçimi alır: **Giren kütle = Çıkan kütle + Sistemde biriken (veya tüketilen/üretilen) kütle.** Bu

basit muhasebe, arıtma mühendisliğinin her noktasında kullanılır. Örneğin birincil çökeltim havuzumuza günde 17.280 kg $BOİ_5$ giriyorsa ve havuzun BOİ giderim verimi %35 ise, çamura geçen (sistemde tutulan) yük 0,35 × 17.280 = **6.048 kg/gün**, çıkıştan biyolojik kademeye devam eden yük ise 17.280 − 6.048 = **11.232 kg/gün** olur. Aynı mantık AKM için uygulandığında birincil çamurun kütlesi, azot-fosfor için uygulandığında ise besin yükünün nasıl dağıldığı bulunur. Böylece tek bir kütle dengesi tablosu, tüm tesisin madde akışını uçtan uca izlenebilir kılar.

ŞEKİL 1.4

Kütle Dengesi: Birincil Çökeltimde $BOİ_5$ Yükü Nereye Gider?

Giren kütle = Çıkan kütle + Sistemde tutulan kütle



Örnek: giriş $BOİ_5$ 200 mg/L, debi 1 m^3/s. Fiziksel arıtma kirliliği **yok etmez**, bir fazdan (su) diğerine (çamur) taşır. Çamura giden bu yük, tesisin çamur hattının ve biyogaz potansiyelinin başlangıcıdır.

Nüfus Eşdeğeri

Farklı kaynakların (evler, oteller, fabrikalar) kirletme potansiyelini ortak bir birimde ifade edebilmek için **nüfus eşdeğeri (NE / *p.e.*)** kullanılır. **Avrupa Birliği Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi'nin (91/271/EEC) Madde 2(6) tanımına göre** 1 nüfus eşdeğeri, "günde **60 gram** beş günlük biyokimyasal oksijen ihtiyacı ($BOİ_5$) oluşturan biyoayrışabilir organik yüke" karşılık gelir. Böylece, örneğin günde 600 kg $BOİ_5$ yükü üreten bir sanayi tesisinin kirletme potansiyeli 10.000 NE olarak ifade edilebilir ve nüfus temelli standartlarla kıyaslanabilir hale gelir.

Bu değerin bölgesel varyasyonları vardır: Almanya kökenli literatürde 54 g/gün, ABD tasarım pratiğinde ise (öğütücü kullanımı ve yüksek tüketim nedeniyle) 80 g/gün değerleri de kullanılır. Türkiye'nin **Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği** ise eşdeğer nüfusu, ham atıksuyun günlük **45 gr $BOİ_5$/kişi·gün** yükü esasına göre tanımlar, yani AB'nin 60 g'lık değerinden farklı bir taban kullanır. Bu, ülkemiz kapsamında hesap yaparken dikkat edilmesi gereken önemli bir ayrımdır.

Nüfus eşdeğerinin pratikteki gücü, farklı büyüklükleri ortak bir dile çevirmesidir. **Örnek:** Günde ortalama **2.400 m^3** atıksu üreten ve giriş $BOİ_5$ derişimi **300 mg/L** olan

bir gıda fabrikasının nüfus eşdeğerini, Türkiye mevzuatının esasıyla bulalım. Önce günlük $BOİ_5$ yükü hesaplanır: 300 g/m³ × 2.400 m³/gün ÷ 1.000 = **720 kg $BOİ_5$/gün**. Bu yük, Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'nin 45 gr/kişi·gün esasına bölündüğünde: 720.000 g ÷ 45 g/kişi ≈ **16.000 NE**. Yani bu tek fabrika, kirletme potansiyeli açısından 16 bin kişilik bir yerleşime denktir, ve KAAY kapsamında 10.000 NE üzeri sınıfa girerek ileri (besin giderimli) arıtma yükümlülüğü doğurur. (Aynı yük, AB'nin 60 g esasıyla hesaplansaydı 12.000 NE bulunurdu; taban değerin sonucu nasıl değiştirdiğine dikkat edin.)

Debi Dengeleme Havuzu Mantığı

Debi dengeleme havuzunun hacmi, gün içindeki birikimli debi eğrisiyle birikimli ortalama debi arasındaki en büyük farka göre boyutlandırılır. Genellikle ilk yaklaşım, dengeleme hacmini **tasarım günlük debisinin yaklaşık %10–25'i** olarak öngörür. Yukarıdaki 10.000 m³/gün'lük yerleşimde bu, kabaca 1.000–2.500 m³'lük bir dengeleme hacmine karşılık gelir. Dengeleme yalnızca debiyi değil, **kütle yükünü** de düzeltir: karıştırılmış bir dengeleme havuzu, giriş BOİ derişiminin gün içindeki tepe değerlerini törpüleyerek biyolojik kademeye giren yükü sabitler ve şok yüklerin önüne geçer.

> **UZMAN NOTU**
>
> Debi tasarım faktörleri farklı üniteler için farklı seçilir. Zirve saatlik debi; pompa, kanal, kum tutucu ve çökeltim havuzu boyutlandırmasında; maksimum günlük debi dengeleme havuzu ve klor temas tankında; 15 günlük maksimum yük ise çürütücü boyutlandırmasında esas alınır. Yani tek bir "debi" değil, amaca göre seçilmiş bir debi ailesi kullanılır.

KİLİT MESAJ

Derişim atıksuyun ne kadar kirli olduğunu, kütle yükü ise tesisin ne kadar iş yapması gerektiğini söyler. Tasarım kararları neredeyse her zaman kütle yüküne dayanır.

1.5 Ön Arıtma: Izgaralar, Kum Tutucular ve Yüzdürme

Atıksu tesise girdiğinde karşılaştığı ilk kademe ön arıtmadır. Bu kademenin hiçbir ünitesi çözünmüş kirliliği azaltmaz; görevleri, alt kademeleri ve ekipmanı **fiziksel hasardan korumaktır**. Yine de ön arıtma ihmal edilirse tüm tesis felç olur: tıkanan pompalar, aşınan çarklar, kumla dolan havuzlar bunun bedelidir.

Ön arıtma ünitelerinin sıralaması rastgele değildir, bir mantığa dayanır: önce en iri maddeler (ızgarayla), sonra ağır kum (kum tutucuyla), en sonra yüzen yağ giderilir. Bu sıralama, her ünitenin bir sonrakini koruması ilkesine dayanır, örneğin ızgara olmadan kum tutucunun mekanizması iri maddelerle tıkanır, kum tutucu olmadan

ise kum pompaları ve alt üniteleri aşındırır. Ön arıtma çoğu zaman debi ölçüm yapısıyla birlikte tasarlanır; böylece tesise giren yük daha ilk adımda kayıt altına alınır.

Izgaralar

Izgara (*bar screen*), atıksudaki iri katıları (bez, plastik, dal, ambalaj) tutan, birbirine paralel çubuklardan oluşan ilk bariyerdir. Çubuk açıklığına göre **kaba** (25–50 mm) ve **ince** (yaklaşık 10–25 mm) olarak ayrılır; büyük tesislerde ikisi ardışık kullanılır. Tasarımda kritik parametre **hızdır**: ızgaradan geçiş hızı, katıların çubuklara yapışmasını önleyecek kadar yüksek, ama tutulan maddenin tekrar sürüklenmesine yol açmayacak kadar düşük olmalıdır. Türk mühendislik pratiğinde ızgara kanalındaki hızın maksimum debide **1,0 m/s'yi** aşmaması, minimum debide **0,3 m/s'nin** altına düşmemesi önerilir.

Elle ve mekanik temizlenen ızgaralar için tipik tasarım değerleri şöyledir:

TABLO 1.3

Parametre	Elle temizlemeli	Mekanik temizlemeli
Izgarada hız (m/s)	0,3–0,6	0,6–1,0
Çubuk genişliği (mm)	4–8	8–10
Çubuklar arası açıklık (mm)	25–75	10–50
Yatayla açı (derece)	45–60	75–85
İzin verilen yük kaybı (mm)	150	150

Kaynak: Metcalf & Eddy temelli T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı "Fiziksel Arıtma" teknik dokümanı.

Hareketli ince eleklerin ek bir yararı da vardır: askıda katı madde ve $BOİ_5$'te **%20–25** dolayında bir ön giderim sağlarlar. Izgara boyunca oluşan yük kaybı, temiz ızgara için çubuk şekline bağlı katsayılar kullanılarak Kirschmer denklemiyle hesaplanır:

DENKLEM 1.2 · KİRSCHMER DENKLEMİ · IZGARADA YÜK KAYBI

$$h_L = \beta \left(\frac{w}{b}\right)^{4/3} h_v \sin\theta \qquad (1.2)$$

BURADA

- h_L yük kaybı (m)
- h_v hız yüksekliği, $v^2/2g$ (m)
- β çubuk şekil katsayısı (2,42 – 0,76)
- θ çubukların yatayla açısı
- w çubuk genişliği (m)
- b çubuklar arası açıklık (m)

Çubuk şekli aerodinamikleştikçe (β küçüldükçe) yük kaybı azalır: keskin dikdörtgen β=2,42, akışkan hatlı çubuk β=0,76.

Formülün pratik dersi nettir: çubuk şekli aerodinamikleştikçe (β küçüldükçe) yük kaybı belirgin biçimde azalır, bu yüzden modern ızgaralarda çubuklar akış yönünde inceltilir. Tıkanma ilerledikçe yük kaybı artar; kirli/kısmen tıkalı ızgarada **150 mm'ye**, tamamen tıkanma yaklaşırken **800 mm'ye** kadar çıkabilir ki bu değer temizleme mekanizmasının devreye girme eşiğini belirler.

Çubuklu ızgaraların ötesinde, daha ince ayrım için **elekler** (statik, döner tamburlu veya basamaklı) ve çok ince (0,02–3 mm) açıklıklı **mikroelekler** kullanılır; bunlar özellikle membran biyoreaktör (MBR) gibi hassas alt kademelerin önünde koruma amacıyla tercih edilir. Bir başka klasik ünite, iri katıları ayırmak yerine **öğüterek** küçülten **öğütücülerdir** (*comminutor/grinder*); bunlar tutulan malzemenin uzaklaştırılıp bertaraf edilmesi zahmetini ortadan kaldırır, ancak öğütülen liflerin alt kademelerde yeniden topaklanabilmesi nedeniyle günümüzde yerlerini büyük ölçüde ızgara + eleme kombinasyonuna bırakmıştır.

Kum Tutucular

Kum tutucu (*grit chamber*), atıksudaki kum, çakıl, cüruf gibi ağır inorganik parçacıkları çökelterek ayırır; amaç, bu aşındırıcı maddelerin pompaları yıpratmasını ve havuzlarda birikmesini önlemektir. İşleyişin özü seçici bir hız kontrolüdür: **yaklaşık 0,2–0,3 m/s'lik** yatay hızda ağır inorganik kum çöker, ama daha hafif organik madde askıda kalıp sistemde ilerler. Bu hız penceresinin teorik dayanağı, organik maddenin yeniden askıya kalkmasını önleyen sürükleme hızını veren Camp-Shields yaklaşımıdır.

Üç temel kum tutucu tipi vardır ve seçim genellikle tesis ölçeğine göre yapılır:

- **Yatay akışlı** (nüfus < 5.000): sabit hızlı, basit; tipik bekleme süresi ~60 saniye.
- **Vorteks (dairesel)** (5.000–10.000): merkezî dönme (girdap) ile kumu tabana yönlendirir. Bekleme süresi yalnızca ~30 saniyedir ve tutma verimi parçacık boyutuna güçlü biçimde bağlıdır: 0,30 mm üstü parçacıklarda ~%95, 0,24 mm üstünde ~%85, 0,15 mm üstünde ~%65. Bu verim eğrisi, kum tutucuların neden belirli bir

parçacık boyutu eşiğine göre tanımlandığını (ince parçacıklarda verimin hızla düştüğünü) somut olarak gösterir.

- **Havalandırmalı** (nüfus > 10.000): yandan verilen hava spiral (helis) bir akış yaratır; ağır kum tabana düşerken hava, organik maddeyi yıkayıp askıda tutar. Böylece daha temiz (düşük organik içerikli) bir kum elde edilir. Difüzörler tabanın 0,45–0,60 m üzerine yerleştirilir.

Havalandırmalı ve yatay akışlı tiplerin temel tasarım değerleri şöyledir:

TABLO 1.4

Parametre	Yatay akışlı	Havalandırmalı
Bekleme süresi (pik debi)	45–90 s	2,5–5 dk
Kontrol hızı / geometri	0,24–0,40 m/s	En:derinlik 1:1–5:1
Uzunluk:genişlik oranı	—	3:1–5:1 (tipik 4:1)
Verilecek hava	—	0,19–0,46 m^3/dk·m
Tutulan kum	—	0,004–0,2 $m^3/10^3 m^3$

Kaynak: WEF MOP 8 ve Metcalf & Eddy, akt. T.C. Çevre Bakanlığı "Fiziksel Arıtma" dokümanı. Havalandırmalı kum tutucunun avantajı, hava debisini ayarlayarak kum-organik ayrımını optimize edebilmesidir; dezavantajı ise ek enerji tüketimi ve H_2S sıyrılması kaynaklı koku riskidir.

Tutulan kum ve ızgara atıkları da bir bertaraf sorunudur: ızgarada tutulan katılar (paçavra, plastik) susuzlaştırılıp düzenli depolamaya gönderilir; toplanan kum ise genellikle yıkanarak organik içeriğinden arındırılır ve ardından bertaraf edilir. Havalandırmalı kum tutucuların bir üstünlüğü de tam burada ortaya çıkar: daha temiz (düşük organik) bir kum ürettikleri için koku ve bertaraf sorununu azaltırlar.

Kum tutucular tipik olarak **0,15–0,2 mm** ve üzeri, özgül ağırlığı 2,65 dolayındaki inorganik parçacıkları hedefler. Tutulan kum miktarı tesisten tesise büyük ölçüde değişir; kanalizasyon sisteminin tipine ve yaşına bağlı olarak işlenen bin m^3 atıksu başına yaklaşık **0,003–0,07 m^3** kum arasında seyreder. Gerçek tesis verileri bu değişkenliği açıkça gösterir:

TABLO 1.5

Tesis	Debi (m^3/gün)	Kum ($m^3/10^3 m^3$)
East Hartford, CT	15.100	0,017
Norfolk, VA	75.700	0,034
Milwaukee, WI	454.000	0,003
Chicago, IL	1.260.000	0,003

Kaynak: Metcalf & Eddy, akt. T.C. Çevre Bakanlığı "Fiziksel Arıtma" dokümanı. Birleşik (yağmursuyu + atıksu) sistemlerde kum yükü, ayrık sistemlere göre belirgin biçimde yüksektir; bu nedenle kum depolama hacmi birleşik sistemlerde milyon galon başına ~30 ft^3, ayrık sistemlerde ~10 ft^3 olarak öngörülür.

Yağ-Gres Tutucu ve Yüzdürme (DAF)

Yoğunluğu sudan düşük olan yağ ve gres, çökelme yerine **yüzdürme** ile ayrılır. Basit yağ tutuculara malzeme yüzeyde toplanıp sıyrılırken, daha ileri uygulamalarda **çözünmüş hava ile yüzdürme (DAF / *Dissolved Air Flotation*)** kullanılır. DAF'ın prensibi zariftir: atıksu (veya geri devrettirilen bir kısmı) basınç altında hava ile doyurulur; basınç atmosfere düşürüldüğünde çözünmüş hava **mikron boyutlu kabarcıklar** halinde açığa çıkar, bu kabarcıklar askıdaki yağ ve katı parçacıklara yapışarak onları yüzeye taşır ve yüzeydeki köpük sıyrılır.

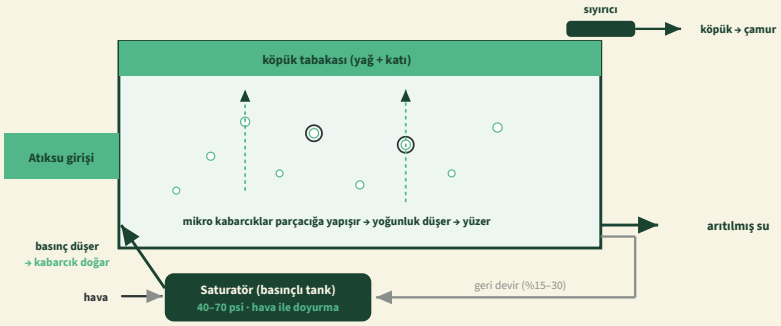
Yağ-gres ayrımının basit hali, yerçekimine dayalı **API ayırıcılarıdır** (American Petroleum Institute standardı). Bunlar da aslında Stokes yasasının bir uygulamasıdır, ama bu kez amaç çökeltmek değil, sudan hafif olan yağ damlacıklarının **yukarı doğru** yüzmesini sağlamaktır. API 421 standardı, tipik olarak 150 mikron ve üzeri serbest yağ damlacıklarını ayıracak biçimde, uzunluk:genişlik oranı en az 5:1 ve ünite içi hız 0,015 m/s'yi aşmayacak şekilde tasarlanır. Emülsiye (suya karışmış) yağlar bu yöntemle ayrılamaz; onlar için kimyasal kırma veya DAF gerekir.

DAF sistemlerinde tipik tasarım değerleri (ağırlıklı olarak endüstriyel uygulama verilerinden derlenmiştir); hava/katı (A/S) oranı **0,005–0,06 kg/kg**, geri devir oranı ileri akışın **%15–30'u**, saturatör basıncı **40–70 psi (≈276–483 kPa)** dolayındadır. **A/S oranı** DAF tasarımının kalbidir: yüzdürülecek her kilogram katı için gereken hava miktarını belirler ve çok düşükse katılar yüzemez, çok yüksekse enerji israf edilir. Sistemin çalışması için genellikle arıtılmış suyun bir kısmı geri devrettirilip basınç altında hava ile doyurulur; bu basınçlı akış ana akışla karıştığında basınç düşer ve mikro kabarcıklar açığa çıkar. DAF, endüstriyel atıksularda KOİ'yi **%90'a** kadar azaltabildiği için rafineri, gıda ve kâğıt sektörlerinde yaygındır; günümüzde konteynerize, önceden monte edilmiş paket üniteler olarak da hızla yaygınlaşmaktadır.

ŞEKİL 1.5

Çözünmüş Hava ile Yüzdürme (DAF) — Çalışma Prensibi

Çökeltmenin tersi: yağ ve hafif katılar mikro kabarcıklarla yüzeye taşınır



Tasarımın kalbi **hava/katı (A/S) oranıdır** (tipik 0,005–0,06 kg/kg): çok düşükse katılar yüzemez, çok yüksekse enerji israf edilir.

KİLİT MESAJ

Ön arıtma görünmez kahramandır, hiçbir kirlilik parametresini kayda değer ölçüde düşürmez, ama onsuz hiçbir alt kademe sağlıklı çalışamaz.

1.6 Birincil Çökeltim: Çökelme Teorisi ve Tasarım



Ön arıtmadan geçen atıksu, ilk gerçek arıtma kademesi olan **birincil çökeltime** ulaşır. Burada atıksu, akışın büyük ölçüde durulduğu geniş bir havuzda bekletilir ve askıda katı maddenin yerçekimiyle dibe çökmesi sağlanır. Basit görünen bu işlemin ardında, atıksu mühendisliğinin en zarif teorik yapılarından biri yatar.

Çökelmenin Dört Tipi

Parçacıkların bir sıvı içinde nasıl çöktüğü, derişimlerine ve birbirleriyle etkileşimlerine göre **dört farklı rejimde** gerçekleşir. Bu dört tipi ayırt etmek, hangi ünitenin nasıl davranacağını anlamanın anahtarıdır.

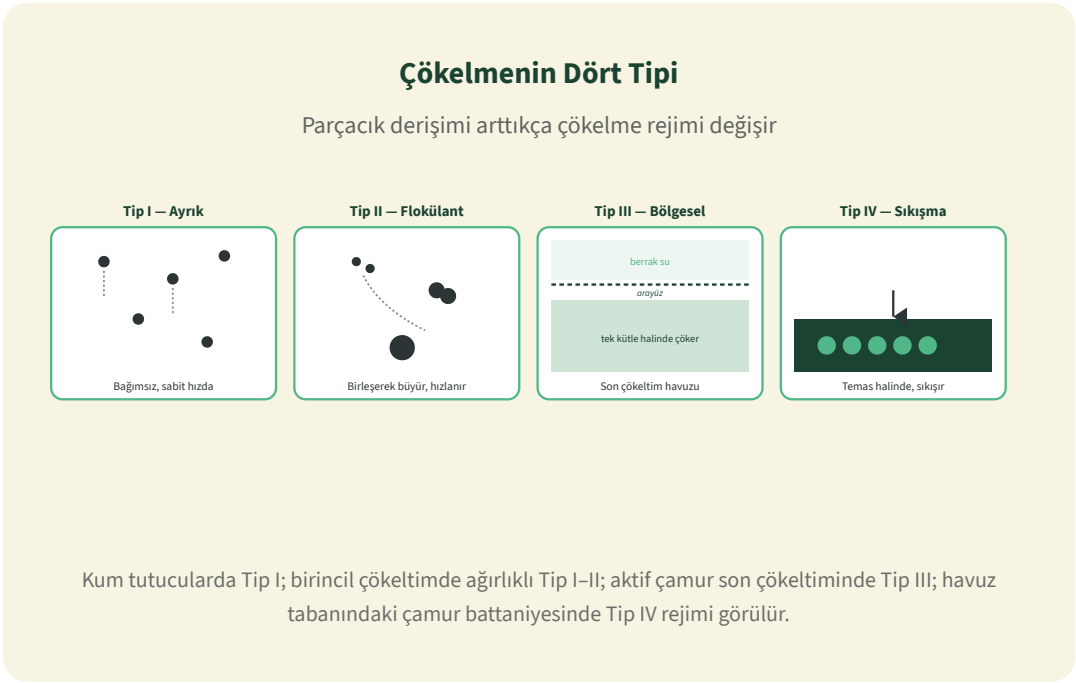
- **Tip I — Ayrık (*discrete*) çökelme:** Parçacıklar birbirinden bağımsız, sabit bir hızla çöker; komşu parçacıklarla etkileşmezler. Seyreltik süspansiyonlarda ve özellikle **kum tutucularda** görülür. Klasik Newton ve Stokes yasalarıyla analiz edilir.
- **Tip II — Flokülant çökelme:** Parçacıklar çökerken birbirleriyle birleşip (koalesans) daha iri floklar oluşturur; kütle büyüdükçe çökelme hızı artar. **Birincil çökeltim havuzlarının üst bölgelerinde** ve kimyasal koagülasyon sonrasında tipiktir.
- **Tip III — Bölgesel/engellenmiş (*zone/hindered*) çökelme:** Parçacık derişimi o kadar yüksektir ki kütle tek bir birim gibi çöker; üstte berrak su, altta çöken flok kütlesi ve ikisi arasında belirgin bir **arayüz** oluşur. Aktif çamurun **son çökeltim**

havuzlarında (yüksek biyokütle derişiminde) görülür, ki bu, ikinci bölümün konusudur.

- **Tip IV — Sıkışma (*compression*) çökelmesi:** Parçacıklar fiilen birbirine temas halindedir; alttakiler üsttekilerin ağırlığını taşır ve çökelme yalnızca yapının sıkışmasıyla ilerler. Havuz tabanındaki **çamur battaniyesinde** ve çamur yoğunlaştırıcılarda gerçekleşir.

Birincil çökeltimde ağırlıklı olarak Tip I ve Tip II rejimleri iş başındadır.

ŞEKİL 1.6



Kum tutucularda Tip I; birincil çökeltimde ağırlıklı Tip I–II; aktif çamur son çökeltiminde Tip III; havuz tabanındaki çamur battaniyesinde Tip IV rejimi görülür.

Stokes Yasası ve Yüzeysel Yükleme Hızı

Tek bir ayrık parçacığın durgun sıvıda çökme hızı, laminer koşullarda **Stokes yasasıyla** verilir:

DENKLEM 1.3 · STOKES YASASI · AYRIK PARÇACIĞIN ÇÖKME HIZI

$$v_s = \frac{g\,(\rho_p - \rho_w)\,d_p^{\,2}}{18\,\mu} \tag{1.3}$$

BURADA

- v_s çökme hızı (m/s)
- d_p parçacık çapı (m)
- g yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²)
- μ suyun dinamik viskozitesi (Pa·s)
- ρ_p parçacık yoğunluğu (kg/m³)
- ρ_w su yoğunluğu (kg/m³)

*Çökme hızı, parçacık çapının **karesiyle** orantılıdır: çap iki katına çıkınca hız dörde katlanır.*

Formülün en çarpıcı sonucu, çökelme hızının parçacık çapının **karesiyle** orantılı olmasıdır: çapı iki katına çıkan parçacık dört kat hızlı çöker. Kimyasal koagülasyonla

parçacıkları iriltmenin (flok oluşturmanın) neden bu kadar etkili olduğu buradan anlaşılır.

Kum tutucu tasarımının neden 0,15–0,2 mm eşiğine dayandığını Stokes yasasıyla görelim:

ÖRNEK 1.1 Stokes uygulaması

Kum tanesinin çökme hızı

VERİLENLER $d_p = 0{,}2$ mm $\rho_p = 2.650$ kg/m³ $\rho_w = 999$ kg/m³ $\mu = 1{,}14\times10^{-3}$ Pa·s (15°C)

$$v_s = \frac{g(\rho_p - \rho_w)\,d_p^{\,2}}{18\,\mu} = \frac{9{,}81 \times 1.651 \times (2\times10^{-4})^2}{18 \times 1{,}14\times10^{-3}}$$

SONUÇ $v_s \approx 0{,}032$ m/s ≈ **1,9 metre/dakika**

YORUM *0,1 mm'lik bir tane için hız dörtte birine (~0,008 m/s) iner. Kum tutucular bu yüzden ~1 m/dk mertebesindeki çökme hızlarına göre tasarlanır: 0,2 mm'lik ağır kum saniyeler içinde çökerken, hafif organik madde askıda kalır.*

(Not: 0,2 mm sınırında akış tam laminer olmadığından Stokes sonucu bir yaklaşımdır; daha iri taneler için Newton bölgesi denklemleri kullanılır.)

Bu basit hesap, kum tutucu tasarımının neden hıza bu kadar duyarlı olduğunu da gösterir. Yatay akış hızı çok yükselirse ağır kum bile çökemeden sürüklenir; çok düşerse organik madde de kumla birlikte çöker ve tutulan kum "kirlenir", bertarafı zorlaşır. Camp-Shields yaklaşımı, çökmüş organik tanelerin yeniden askıya kalkacağı kritik sürükleme hızını verir ve tasarımcı işletme hızını bu sınırın hemen altında tutar. Sıcaklık da sessiz bir değişkendir: soğuk suda dinamik viskozite (μ) arttığından çökme hızı düşer, çünkü Stokes denkleminde μ paydadadır. Bu yüzden kış aylarında aynı tane daha yavaş çöker ve gerçek tasarımlarda çökme hızı, en olumsuz koşula (en düşük sıcaklık, en yüksek debi) göre bir emniyet payıyla seçilir. Uygulamada bu hassasiyet, kum tutucudan sonra bir **kum yıkayıcı** (*grit classifier*) konularak da yönetilir: yıkayıcı, kuma karışan organik maddeyi geri yıkayarak yalnızca görece temiz kumun bertarafa gitmesini sağlar ve koku sorununu azaltır.

Çökeltim havuzu tasarımının kalbinde ise **yüzeysel yükleme hızı** (*surface overflow rate*, SOR veya v_0) kavramı vardır. Hazen (1904) ve Camp (1946) tarafından geliştirilen ideal çökeltim teorisine göre, düzgün ve türbülanssız akışlı ideal bir tankta yüzeysel yükleme hızı, debinin havuzun yüzey alanına oranıdır:

DENKLEM 1.4 · YÜZEYSEL YÜKLEME HIZI · ÇÖKELTİM TASARIMININ İMZA DENKLEMİ

$$v_0 = \frac{Q}{A} \tag{1.4}$$

BURADA v_0 yüzeysel yükleme hızı (m³/m²·gün) A havuzun yüzey alanı (m²) Q debi (m³/gün)

*Kritik sonuç: v_0 tank **derinliğinden bağımsızdır**. Bir çökeltim havuzunun performansı hacmine değil, yüzey alanına bağlıdır.*

Bu denklemin şaşırtıcı ve son derece pratik sonucu şudur: **yüzeysel yükleme hızı, tankın derinliğinden bağımsızdır.** Çünkü hacim (alan × derinlik) bekleme süresine bölündüğünde derinlik terimi sadeleşir. Teorik olarak, çökelme hızı $v_s \geq v_0$ olan tüm parçacıklar **tam olarak** giderilir; $v_s < v_0$ olanlar ise **v_s/v_0** oranında kısmen tutulur. Örneğin yüzeysel yükleme hızı 40 m³/m²·gün (≈ 0,46 mm/s) olan bir havuzda, çökelme hızı 0,23 mm/s olan bir parçacık yalnızca 0,23/0,46 ≈ **%50** oranında giderilir; daha hızlı çöken parçacıklar ise tümüyle tutulur. Bu nedenle bir çökeltim havuzunun performansı, hacminden çok **yüzey alanına** bağlıdır, tasarımcının en çok üzerinde durduğu parametre budur.

ŞEKİL 1.7

İdeal Çökeltim Teorisi: $v_0 = Q / A$

Bir parçacığın giderilip giderilmeyeceğini yüzey alanı belirler, derinlik değil



Hazen (1904) ve Camp (1946) ideal çökeltim teorisi. Hacim/derinlik yerine **yüzey alanı** belirleyicidir; bir çökeltim havuzunu "büyütmek", çoğu zaman yüzey alanını artırmak demektir.

Teoriden Ölçüme: Çökelme Kolonu Testi

İdeal teori, ayrık (Tip I) parçacıklar için temiz bir çözüm sunar; ancak birincil çökeltimde baskın olan **flokülant (Tip II)** çökelmede parçacıklar çökerken büyüdüğü için

çökelme hızı sabit değildir ve tek bir formülle hesaplanamaz. Bu durumda mühendis teoriye değil, **deneye** başvurur. **Çökelme kolonu testinde**, temsili bir atıksu numunesi, gerçek havuz derinliğine yakın (birkaç metre) şeffaf bir kolona konur; farklı derinliklerdeki musluklardan belirli zaman aralıklarıyla numune alınarak askıda katı derişimi ölçülür. Elde edilen veriler, "belirli bir bekleme süresi ve yüzeysel yükleme hızında ne kadar giderim elde edilir" sorusunu yanıtlayan eş-giderim eğrileri (*iso-removal curves*) haline getirilir. Böylece tasarımcı, o özgün atıksu için gerçekçi bir yüzeysel yükleme hızı ve bekleme süresi kombinasyonu seçebilir. Bu yöntem, teorik idealliğin (Hazen-Camp) sahadaki karmaşık gerçeklikle nasıl uzlaştırıldığının iyi bir örneğidir.

Birincil Çökeltim Havuzu Tasarım Kriterleri

İdeal teori, pratik tasarım değerlerine dönüştürülür. Farklı mühendislik rehberleri, birincil çökeltim için birbirine yakın aralıklar önerir:

TABLO 1.6

Parametre	Ortalama debi	Pik debi
Yüzeysel yükleme hızı ($m^3/m^2 \cdot gün$)	32–49	81–122
Hidrolik bekleme süresi (saat)	1,5–2,5	—
Savak yükü ($m^3/m \cdot gün$)	124–248	(üst sınır ~496)
Yan su derinliği (m)	3,0–4,5	—

Kaynak: WEF *Liquid Stream Fundamentals* (2017), Metcalf & Eddy ve T.C. Çevre Bakanlığı "Fiziksel Arıtma" dokümanı temelli.

Birkaç tasarım inceliği kayda değer. Bekleme süresi **2,5 saati** aştığında havuzda oksijensiz (septik) koşullar oluşup koku ve performans sorunlarına yol açabilir. Savak yükünün havuz performansına etkisi görece azdır, ama dip çamurunun sürüklenmemesi için sınırlanır. Havuzlar dairesel veya dikdörtgen olabilir ve her geometrinin kendi boyut aralıkları vardır:

TABLO 1.7

Parametre	Dikdörtgen tank	Dairesel tank
Derinlik (m)	3,0–4,5 (tipik 3,7)	3,0–4,5 (tipik 3,7)
Uzunluk / çap (m)	15–90 (tipik 24–40)	3–60 (tipik 12–45)
Genişlik (m)	3–24 (tipik 5–10)	—
Sıyırıcı hızı	0,6–1,2 m/dk	0,02–0,05 dev/dk

Kaynak: T.C. Çevre Bakanlığı "Fiziksel Arıtma" dokümanı (Metcalf & Eddy temelli). Dikdörtgen tanklarda kısa devreyi önlemek için uzunluk:genişlik oranı **3:1 ile 5:1** arasında tutulur; dairesel tanklarda ise merkez besleme haznesi çapı, tank çapının %15–25'i kadar seçilir.

İki geometrinin de kendi avantajları vardır. **Dikdörtgen tanklar** ortak duvar kullanarak alanı verimli değerlendirir ve büyük tesislerde yan yana dizilmeye uygundur; **dairesel tanklar** ise akışın merkezden çevreye radyal dağılması sayesinde daha kararlı bir akış rejimi ve genellikle daha etkili sıyırma sağlar. Seçim; arazi geometrisi, tesis ölçeği ve mekanik ekipman tercihiyle şekillenir. Her iki tipte de tasarımın amacı aynıdır: türbülansı en aza indirip suyun havuz boyunca düzgün ve yavaş ilerlemesini sağlamak, böylece ideal çökeltim teorisinin varsaydığı sakin koşullara mümkün olduğunca yaklaşmak.

Bu ilkeleri somut bir örnekte birleştirelim:

ÖRNEK 1.2 birincil çökeltim boyutlandırma

Bir havuzu adım adım boyutlandıralım

VERİLENLER Q = 10.000 m³/gün q = 40 m³/m²·gün (tasarım yükleme) derinlik h = 3,7 m

1	Yüzey alanı	$A = Q/q = 10.000/40 =$ **250 m²**
2	Çap (dairesel)	$D = \sqrt{(4A/\pi)} \approx$ **17,8 m**
3	Bekleme süresi	$\tau = V/Q = (250\times3{,}7)/10.000 \approx$ **2,2 saat**

SONUÇ

Kontrol: τ ≈ 2,2 saat, önerilen 1,5–2,5 aralığında ✓ · savak yükü ≈ 179 m³/m·gün, 124–248 aralığında ✓

YORUM *Çökeltim tasarımı, birbirini denetleyen birkaç kriterin (yüzeysel yükleme, bekleme süresi, savak yükü) aynı anda sağlanmasından ibarettir.*

Gerçek bir projede bu hesap tek seferde bitmez; iteratif bir süreçtir. Tasarımcı önce bir yüzeysel yükleme hızı seçer, ardından bekleme süresi, savak yükü ve derinlik kriterlerini kontrol eder; biri aralık dışına çıkarsa parametreleri revize edip yeniden hesaplar. Ayrıca tek büyük havuz yerine genellikle en az iki paralel havuz tasarlanır: biri bakıma alındığında diğeri devrede kalır ve tesis durmaz. Pik debi senaryosu da ayrıca denetlenir, çünkü yağışlı havada debi katlanabilir ve ortalama debiye göre yeterli görünen bir havuz, pik anında yüzeysel yükleme sınırını aşabilir. Bu nedenle nihai boyut, ortalama ve pik koşulların her ikisini de sağlayan, üzerine makul bir

emniyet payı eklenmiş değerdir. Örnekteki temiz sonuçlar, sahadaki bu çok kriterli dengelemenin sadeleştirilmiş bir kesitidir.

Alanı Küçültmek: Eğik Plakalı (Lamella) Çökeltim

Yüzeysel yükleme hızının yüzey alanına bağlı olması, akıllı bir tasarım fikrini doğurur: **etkin çökelme alanını, havuzun taban alanını büyütmeden artırmak.** Eğik plakalı (lamella) veya eğik borulu çökelticiler tam da bunu yapar. Havuzun içine belirli bir açıyla (tipik olarak 55–60°) yerleştirilen paralel plakalar, her biri ek bir çökelme yüzeyi sunar; parçacıklar kısa bir mesafe düşerek plakaya ulaşır ve plaka boyunca kayarak tabana iner. Böylece aynı taban alanında **çok daha yüksek etkin çökelme yüzeyi** elde edilir ve tasarım debisi birkaç kat artırılabilir. Bu teknoloji, yer kısıtı olan tesislerde ve pik debileri karşılamada değerlidir; balastlı flokülasyonla birleştiğinde çökeltim hızını daha da yukarı taşır.

Giderim Verimi ve Kimyasal Destekli Birincil Arıtma

Bir arıtma ünitesinin başarısı **giderim verimiyle** ölçülür ve tanımı sadedir:

DENKLEM 1.5 · GİDERİM VERİMİ · BİR ÜNİTENİN BAŞARISI

$$\eta = \frac{C_{giriş} - C_{çıkış}}{C_{giriş}} \times 100 \qquad (1.5)$$

BURADA η giderim verimi (%) — $C_{çıkış}$ çıkış derişimi (mg/L) — $C_{giriş}$ giriş derişimi (mg/L)

Deşarj standartlarındaki "asgari giderim verimi" şartının (ör. KAAY'da BOİ için %70–90) temeli budur.

Bu basit oran, hem tek bir üniteyi hem de tüm tesisi değerlendirmenin ortak ölçüsüdür ve deşarj standartlarındaki "asgari giderim verimi" şartlarının temelidir. Konvansiyonel bir birincil çökeltim havuzunun tipik giderim verimi, kaynaklar arasında tutarlı bir aralıkta toplanır: **AKM'de %50–65, $BOİ_5$'te %25–40.** Bu iki verim arasındaki fark öğreticidir: birincil çökeltim, *çökebilen* (partiküler) maddeyi etkili biçimde giderdiği için AKM'de yüksek verime ulaşır; ancak BOİ'nin önemli bir kısmı *çözünmüş* organik maddeden geldiğinden (ve çözünmüş madde çökmediğinden) BOİ giderimi sınırlı kalır. İşte bu sınır, biyolojik (ikincil) arıtmanın neden zorunlu olduğunu tek başına açıklar.

Giderim verimini etkileyen başlıca işletme faktörleri şunlardır: **hidrolik kısa devre** (etkin bekleme süresini düşürür), **aşırı debi dalgalanmaları** (yerleşmiş çamuru yeniden askıya kaldırabilir), **sıcaklık** (soğuk suda yoğunluk akımları ve daha yüksek viskozite çökelmeyi zorlaştırır) ve **yüksek geri devir oranları**. Bu nedenle iyi bir

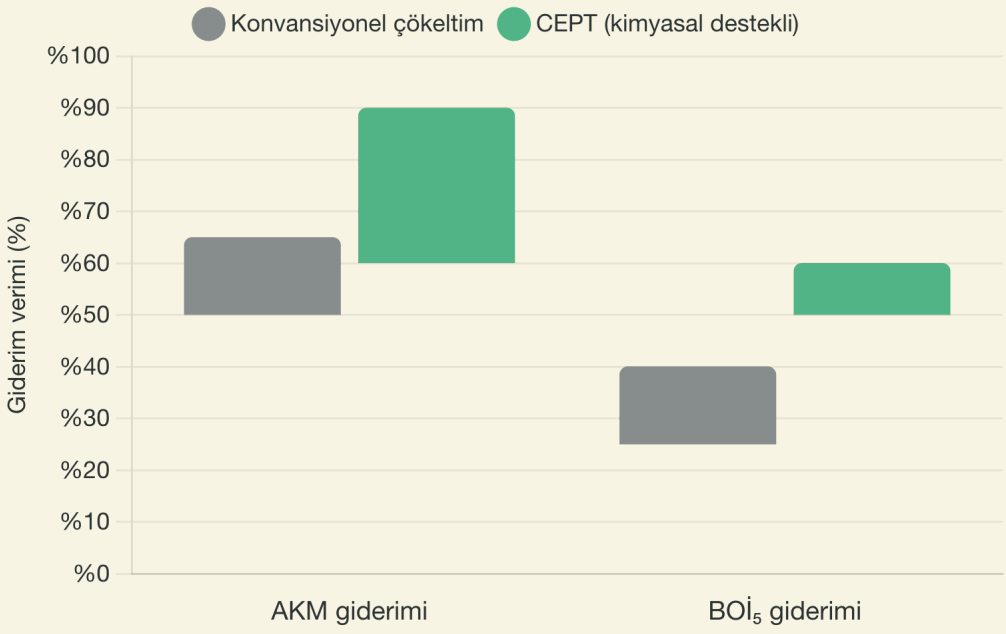
tasarım kadar iyi bir işletme de verimin belirleyicisidir. Verimi artırmanın en güçlü yolu ise, gördüğümüz gibi, kimyasal destektir.

Bu verim, kimyasal katkıyla belirgin biçimde artırılabilir. **Kimyasal destekli birincil arıtma (CEPT / *Chemically Enhanced Primary Treatment*)**, çökeltimden önce koagülan ve flokülan ekleyerek ince parçacıkları iri, hızlı çöken floklara dönüştürür. **WEF'e göre** CEPT ile AKM giderimi **%60–90'a**, BOİ giderimi **%50–60'a** çıkabilir. CEPT bugün yalnızca bir verim artırma tekniği değil, aynı zamanda bir **kaynak geri kazanım stratejisi** olarak da ilgi görüyor: organik yükün daha büyük bölümünü birincil çamura yönlendirerek (karbon yönlendirme), anaerobik çürütmeyle daha fazla biyogaz (dolayısıyla enerji) üretilmesine olanak tanıyor. Bu yaklaşım, birincil arıtmayı "sadece katı ayıran" bir kademeden, tesisin enerji dengesine katkı sunan bir bileşene dönüştürüyor.

ŞEKİL 1.8

Konvansiyonel Çökeltim vs. Kimyasal Destekli Birincil Arıtma (CEPT)

Giderim verimi aralıkları (%) — koagülan/flokülan ilavesinin etkisi



CEPT yalnızca verimi artırmaz; organik yükün daha büyük bölümünü **birincil çamura yönlendirerek** (karbon yönlendirme) anaerobik çürütmeyle daha fazla biyogaz üretilmesini de sağlar. Çubuklar, kaynaklarda bildirilen tipik **aralıkları** gösterir.

Güncel bir başka gelişme de birincil arıtmanın **mikroplastik** tutmadaki rolüdür: çalışmalar, arıtma tesisi zincirinin (birincil + ikincil) mikroplastiklerin ortalama **%88'ini** giderdiğini ve giderilen kısmın büyük bölümünün çamurda biriktiğini gösteriyor.

Küçük Ölçekte Birincil Arıtma: Septik ve Imhoff Tankları

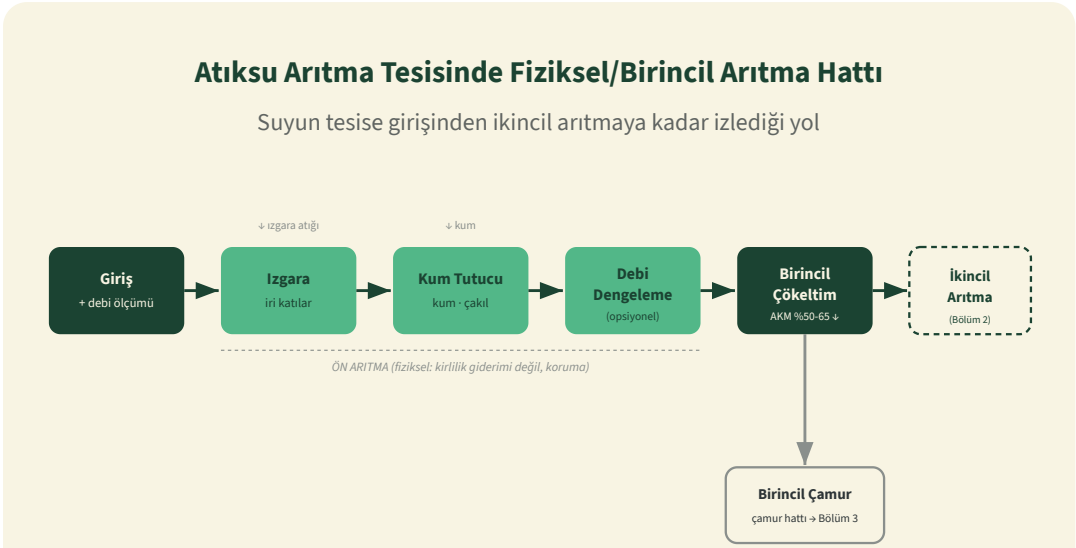
Büyük çökeltim havuzları merkezî tesislere özgüdür; kanalizasyon şebekesinin ulaşmadığı yerlerde ise birincil arıtma daha basit yapılarla gerçekleştirilir. **Septik tank**, evsel atıksuyu bekleterek katıların dibe çökmesini ve yağların yüzmesini sağlayan, tabanda biriken çamurun kısmen anaerobik olarak ayrıştığı kapalı bir hazneden ibarettir; çıkış suyu genellikle bir sızdırma alanına verilir. **Imhoff tankı** ise septik tankın geliştirilmiş bir biçimidir: çökeltme bölmesi ile çamur çürütme bölmesi dikey olarak ayrılmıştır, böylece çürüyen çamurdan çıkan gaz kabarcıkları çöken katıları rahatsız etmez. Bu çözümler, küçük yerleşimlerde ve merkeziyetsiz sistemlerde birincil arıtmanın pratik yüzüdür. Nitekim güncel eğilimler de bu yöne işaret ediyor: konteynerize, önceden monte edilmiş paket arıtma üniteleri, kanalizasyon altyapısı bulunmayan bölgeler için hızla yaygınlaşıyor ve merkeziyetsiz atıksu arıtma pazarı yıllık yaklaşık %8 büyüyor.

Birincil Çamur: Kirliliğin Yeni Adresi

Birincil çökeltimin doğal çıktısı, havuz tabanında biriken **birincil çamurdur**. Atıksudan uzaklaştırılan askıda katı madde ve organik yük, aslında yok edilmemiş; yalnızca sıvı fazdan yoğun bir katı faza aktarılmıştır. Bu nedenle birincil çökeltim, aynı zamanda tesisin **çamur hattının** başlangıcıdır. Birincil çamur, taze haliyle biyolojik çamura kıyasla daha yüksek organik içeriğe ve daha iyi susuzlaşma özelliğine sahiptir; bu da onu **anaerobik çürütmeyle enerji (biyogaz) geri kazanımı** için değerli bir kaynak yapar. CEPT ile karbonu bilinçli olarak birincil çamura yönlendirmenin cazibesi de buradan gelir.

Birincil çamur havuz tabanından düzenli aralıklarla çekilir; çekme sıklığı, septik koşulların oluşmasını önleyecek kadar sık olmalıdır. Taze birincil çamurun katı madde içeriği tipik olarak yalnızca yüzde birkaç düzeyindedir; yani büyük ölçüde su içeren bu çamurun hacmi, çamur hattındaki yoğunlaştırma ve susuzlaştırma adımlarıyla kademeli olarak azaltılır. Bu çamurun ölçeği azımsanmayacak boyuttadır: **TÜİK verilerine göre** Türkiye'deki arıtma tesislerinden 2022'de yaklaşık **348.000 ton** (kuru madde bazında) arıtma çamuru üretilmiştir. Bu çamurun yoğunlaştırılması, stabilizasyonu, susuzlaştırılması ve nihai bertarafı başlı başına bir mühendislik alanıdır ve serinin **üçüncü bölümünde** ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Şimdilik akılda tutulması gereken ilke şudur: fiziksel arıtma bir kirletici üretmez, ama kirliliğin adresini değiştirir, ve bu yeni adres dikkatli bir yönetim gerektirir.

ŞEKİL 1.9



Yeşil Ajanda · Fiziksel ve birincil arıtma, kirliliği gidermekten çok sonraki kademeleri mümkün kılar; birincil çökeltimden ayrılan çamur, tesisin çamur hattının başlangıcıdır.

UZMAN NOTU

"Yüksek hızlı" çökeltim teknolojileri (balastlı flokülasyon), koagülan ve ince kum/balast ilavesiyle lamella plakalarını birleştirerek tasarım yüzeysel yükleme hızını **3–5 kat** artırabiliyor: konvansiyonel 33–49 m^3/m^2·gün yerine 160 m^3/m^2·gün ve üzeri. Bu sayede aynı arıtma, çok daha küçük bir alanda yapılabiliyor, özellikle yağmurlu havalarda oluşan geçici pik debileri havuz büyütmeden karşılamak için değerli.

KİLİT MESAJ

Birincil çökeltimin sırrı derinlikte değil, yüzey alanındadır. v_0 = Q/A denklemi, tüm çökeltim tasarımının özetidir; kimyasal destek (CEPT) ise bu fiziksel kademenin sınırlarını enerji geri kazanımıyla birleştirerek genişletir.

1.7 Suyun Tesis İçindeki Yolculuğu: Fiziksel Hattın Bütünü

Buraya kadar üniteleri tek tek inceledik; şimdi bir damla atıksuyun bu hattı baştan sona nasıl kat ettiğini birleştirelim. Bu bütünsel bakış, her ünitenin diğerine nasıl bağlandığını görmeyi sağlar.

1. **Giriş ve debi ölçümü:** Kanalizasyondan gelen atıksu, tesise bir giriş yapısı ve debi ölçüm noktasından (Parshall savağı) girer. Buradaki ölçüm, tüm alt ünitelerin yükleme hesabının temelidir.

2. **Izgaralar:** İlk bariyer, iri katıları ve yüzen maddeleri tutar; pompaları ve alt üniteleri korur, yol boyunca AKM ve BOİ'de küçük bir ön giderim sağlar.
3. **Kum tutucu:** Ağır inorganik kum, kontrollü hızda çökelerek ayrılır; böylece aşındırıcı madde pompalardan ve çamur hattından uzak tutulur.
4. **Debi dengeleme (varsa):** Gün içindeki debi ve yük dalgalanmaları sönümlenir; alt kademelere kararlı bir akış sunulur.
5. **Birincil çökeltim:** Askıda katı maddenin yarıdan fazlası ve BOİ'nin dörtte biri kadarı yerçekimiyle çökelerek birincil çamur olarak ayrılır. Yağ ve köpük yüzeyden sıyrılır.
6. **Çıkış:** Bu noktada atıksu, kaba ve çökebilen kirliliğinden büyük ölçüde arınmış ama hâlâ yüksek çözünmüş organik yük taşır durumdadır, yani biyolojik (ikincil) arıtmaya hazırdır.

Bu yolculuğun sonunda tipik bir evsel atıksu, giriş AKM'sinin yarısından fazlasını ve BOİ'sinin dörtte birini geride bırakır; ama gerçek arıtma, yani çözünmüş organik maddenin ve besin maddelerinin giderimi henüz başlamamıştır. Fiziksel hattın görevi, tam da bu asıl arıtmayı **mümkün ve verimli kılmaktır**.

1.8 Fiziksel ve Birincil Arıtmada İzleme, İşletme ve Sık Sorunlar

Bir arıtma ünitesinin doğru tasarlanmış olması, iyi çalışacağının garantisi değildir; performans, işletme ve izlemeyle ayakta tutulur. Fiziksel ve birincil arıtma kademeleri bu açıdan hem en dayanıklı hem de en çok ihmale uğrayan bölümlerdir.

Debi Ölçümü ve İzleme

Her arıtma tesisinin başında güvenilir bir **debi ölçümü** bulunmalıdır; çünkü daha önce gördüğümüz üzere hem kütle yükü hem de tüm yükleme kriterleri debiye dayanır. Açık kanallarda en yaygın yöntem, kanala yerleştirilen ve akış yüksekliğiyle debi arasında bilinen bir bağıntı kuran **Parshall savağı** (***flume***) ya da benzeri kalibre edilmiş yapılardır. Debi ölçümü ayrıca deşarj izin belgesi kapsamında raporlama için de zorunludur. Tesis girişinde tipik olarak izlenen parametreler debi, pH, sıcaklık, BOİ/KOİ, AKM ve (endüstriyel katkı olan yerlerde) iletkenlik ve ağır metallerdir.

Modern tesislerde bu izleme büyük ölçüde otomatikleşmiştir. **SCADA** (denetleyici kontrol ve veri toplama) sistemleri, çevrim içi sensörlerden (pH, çözünmüş oksijen, bulanıklık, debi) gelen verileri sürekli kaydeder, ekipmanı uzaktan kontrol eder ve eşik aşımlarında alarm üretir. Türkiye'de belirli ölçeğin üzerindeki tesisler ayrıca çıkış sularını **sürekli atıksu izleme sistemleriyle** izleyip verilerini merkezî otoriteye aktarmakla yükümlüdür. Böylece deşarj uygunluğu yalnızca periyodik numunelerle değil,

kesintisiz olarak denetlenebilir hale gelir. Ancak otomasyon, doğru yerleştirilmiş ve düzenli kalibre edilmiş sensörler olmadan yanıltıcı olabilir; bu da izlemenin hâlâ bir mühendislik disiplini gerektirdiğini hatırlatır.

Birincil çökeltimde izlenen kritik bir başka büyüklük de **çamur battaniyesi seviyesidir**: havuz tabanında biriken çamur katmanının kalınlığı, çoğunlukla ultrasonik seviye sensörleriyle sürekli ölçülür. Bu seviye çok yükselirse çamur savağa taşarak çıkış suyunun askıda katı madde derişimini yükseltir ve birincil arıtmanın kazandırdığı verim bir anda kaybedilir. Tersine, çamur gereğinden sık çekilirse aşırı sulu bir çamur elde edilir; bu da çamur hattındaki yoğunlaştırma ve susuzlaştırma ünitelerine gereksiz hidrolik yük bindirir. Doğru çekme sıklığı, bu iki riskin arasındaki dengeyi kuran bir işletme kararıdır.

Fiziksel Arıtmada Sık Karşılaşılan Sorunlar

- **Hidrolik kısa devre:** Havuza giren suyun bir kısmının, tasarlanan bekleme süresini tamamlamadan doğrudan çıkışa ulaşmasıdır. Kötü giriş/çıkış yapısı, rüzgâr veya yoğunluk (sıcaklık) akımları buna yol açar ve etkin bekleme süresini teorik değerin altına düşürerek giderim verimini azaltır. Giriş perdeleri ve iyi tasarlanmış savak düzenlemeleri bunu sınırlar.
- **Septiklik ve koku:** Birincil havuzda çamurun çok uzun bekletilmesi (veya bekleme süresinin 2,5 saati aşması) oksijensiz koşullar yaratır; sonuçta hidrojen sülfür (H_2S) kaynaklı koku ve korozyon ortaya çıkar. Çözüm, çamurun düzenli ve yeterli sıklıkta çekilmesidir.
- **Köpük ve yüzen madde (*scum*):** Yağ, gres ve yüzen katılar havuz yüzeyinde toplanır; yüzey sıyırıcılarıyla düzenli alınmazsa deşarja kaçar. Dairesel birincil tanklarda köpük üretimi gerçekte milyon galon başına yaklaşık 1 ft^3 mertebesindedir.
- **Kum kaçağı ve çamur çürütücü aşınması:** Kum tutucu yetersiz çalışırsa kum, birincil havuzlara ve oradan çamur hattına geçerek çürütücülerde birikir, hacim kaybına ve mekanik aşınmaya yol açar. Kum tutucunun performansı bu nedenle sadece kendi ünitesini değil, tüm çamur hattını ilgilendirir.
- **Izgarada paçavra topaklanması (*rag balls*) ve tıkanma:** İnce liflerin birbirine dolanarak topaklar oluşturması pompaları ve alt üniteleri kilitleyebilir; iki kademeli ızgara ve düzenli temizleme bunu önler.

Enerji ve Bakım Boyutu

Fiziksel arıtma, biyolojik kademeye kıyasla düşük enerji tüketir; başlıca enerji kalemleri terfi pompaları, kum tutucu havalandırması ve sıyırıcı motorlarıdır. Buna karşılık **bakım yoğunluğu** yüksektir: hareketli mekanik ekipman (ızgara tarakları, sıyırıcılar, kum klasörleri) sürekli aşınmaya maruz kalır ve düzenli, planlı bakım

gerektirir. Bu ekipmanların birinde yaşanan arıza, tüm hattı durdurabileceği için genellikle yedekli (paralel) üniteler tasarlanır; böylece bir ünite bakımdayken diğeri devreye girer. Fiziksel arıtmada gerçek maliyet çoğu zaman enerjide değil, bu mekanik bakımda ve tutulan katı/kum/köpüğün bertarafındadır. Türkiye'de **11 Kasım 2023 tarihli** Atıksu Arıtma Tesisi Enerji Teşviki Yönetmeliği, arıtılmış suyunu yeniden kullanan ve ileri arıtma uygulayan tesislere elektrik maliyetinin bir bölümünü geri ödeyerek enerji verimliliğini teşvik etmektedir.

KİLİT MESAJ

İyi tasarım gerekli ama yeterli değildir. Kısa devre, septiklik, köpük ve kum kaçağı gibi sorunlar, doğru boyutlandırılmış bir üniteyi bile verimsiz kılabilir; fiziksel arıtmanın başarısı büyük ölçüde disiplinli işletmeye bağlıdır.

1.9 Fiziksel Arıtmanın Sürdürülebilirlik Boyutu: Enerji ve Kaynak Geri Kazanımı

Atıksu arıtımı uzun süre "kirliliği gideren bir maliyet kalemi" olarak görüldü; bugün ise giderek **kaynak geri kazanım tesisi** olarak yeniden tanımlanıyor. Bu dönüşümde fiziksel ve birincil arıtmanın rolü, ilk bakışta görünenden büyük.

Anahtar kavram **karbon yönlendirmedir** (*carbon redirection*). Daha önce değindiğimiz kimyasal destekli birincil arıtma (CEPT), organik yükün daha büyük bölümünü birincil çamura aktararak biyolojik kademeye giden karbon miktarını azaltır. Bunun iki yönlü faydası vardır: bir yandan enerji-yoğun havalandırma ihtiyacı düşer, öte yandan organik açıdan zengin birincil çamur, **anaerobik çürütmeyle biyogaza** (yani yenilenebilir enerjiye) dönüştürülür. Güncel araştırmalar bu dengeyi optimize etmeye odaklanıyor: termal hidroliz ön işlemiyle zenginleştirilmiş çürütme ve çamurdan doğrudan elektrik üreten entegre sistemler (örneğin katı oksit yakıt hücresi entegrasyonunun yıllık enerji üretimini yaklaşık %18 artırdığı bildiriliyor) bu arayışın ürünleri.

Bu yönelim artık yalnızca bir tercih değil, giderek bir **yükümlülük**. Avrupa Birliği'nin yeni Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi (2024/3019), 10.000 nüfus eşdeğeri ve üzerindeki tesisler için **2045'e kadar enerji nötrlüğü** hedefi getiriyor; enerjinin en fazla %30'unun dışarıdan satın alınmasına izin veriyor. Yani birincil çamurdan enerji geri kazanımı, "opsiyonel bir iyileştirme" olmaktan çıkıp düzenleyici bir zorunluluğa dönüşüyor.

Türkiye açısından da tablo benzer bir yöne işaret ediyor. **TÜİK verilerine göre** 2022'de ülkedeki arıtma tesislerinden yaklaşık **348.000 ton** (kuru madde) çamur üretildi, bu, hem bir bertaraf yükü hem de değerlendirilmeyi bekleyen bir enerji kaynağı. Aynı şekilde arıtılmış suyun yeniden kullanımı da öne çıkıyor: Bakanlık,

mevcutta %5,3 olan yeniden kullanım oranını 2028'e kadar %11'e çıkarmayı hedefliyor ve **11 Kasım 2023 tarihli** Enerji Teşviki Yönetmeliği ile ileri arıtma ve yeniden kullanımı elektrik maliyeti geri ödemesiyle destekliyor, ki bu, uzun vadeli su güvenliği[7] açısından giderek daha kritik bir kaldıraç haline geliyor. Fiziksel arıtma bu döngünün başlangıç noktası: sudan ayrılan her kilogram katı ve organik madde, aynı zamanda geri kazanılabilir bir kaynağın ilk adımıdır.

KİLİT MESAJ

Fiziksel arıtma yalnızca bir "ön temizlik" değil, tesisin enerji ve kaynak dengesinin ilk kaldıracıdır; birincil çamur, doğru yönetildiğinde bir atık değil, bir enerji kaynağıdır.

1.10 Türkiye'de Uygulama ve Deşarj Standartları



Buraya kadar ele alınan esaslar evrenseldir; ancak bir arıtma tesisinin *neyi, hangi düzeye kadar* arıtacağını ülkenin mevzuatı belirler. Türkiye'de atıksu deşarjı, çerçevesini büyük ölçüde Çevre Kanunu[8]'ndan alan iki temel düzenlemeyle yönetilir: **Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY)** ve **Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (KAAY)**.

7. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/su-guvenligi-finansman-modelleri
8. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/cevre-kanunu-rehberi-2026-kapsamli-klavuz

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY)

Resmî Gazete'de 31.12.2004 tarih ve 25687 sayı[9] ile yayımlanan SKKY, yeraltı ve yüzeysel su kaynaklarının korunmasına ilişkin hukuki ve teknik esasları belirleyen çerçeve düzenlemedir. Yönetmelik, kıta içi yüzeysel suları kalitelerine göre dört sınıfa ayırır: **Sınıf I** (yüksek kaliteli), **Sınıf II** (az kirlenmiş), **Sınıf III** (kirlenmiş) ve **Sınıf IV** (çok kirlenmiş) su. Deşarj standartları, alıcı ortamın bu sınıfına ve kirletici sektöre göre tablolar halinde düzenlenir.

Evsel nitelikli atıksuların deşarjında hangi standardın uygulanacağı, çoğu zaman sanıldığı gibi tek bir tabloya değil, **eşdeğer nüfusa göre ikiye ayrılan bir rejime** bağlıdır. SKKY'nin **17.12.2022 değişikliğiyle güncellenen 32. maddesi**, standart değerlerin "eşdeğer nüfus dikkate alınarak" hem SKKY'nin Tablo 21'inde hem de **Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'nde** verildiğini belirtir.

Kritik ayrıntı ise Geçici 5. maddededir: SKKY Tablo 21'in 2.000 eşdeğer nüfusun üzerini kapsayan bölümleri (Tablo 21.2, 21.3 ve 21.4) **31 Aralık 2017 tarihine kadar** uygulanmış, bu tarihten sonra yerlerini **Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği hükümlerine** bırakmıştır. Pratikte tablo şöyle okunmalıdır:

- **2.000 NE altındaki yerleşimler:** SKKY'nin 32. maddesi uyarınca, yerleşimin çevresel özellikleri dikkate alınarak İl Müdürlüğünce uygun görülen arıtma; sızdırmalı ferdi fosseptik veya sızdırmasız merkezi fosseptik gibi bertaraf yöntemleri uygulanır. Otel, tatil sitesi gibi yerleşimden kopuk ve 2.000 kişinin altındaki tesisler de bu kapsamdadır.
- **2.000 NE ve üzerindeki yerleşimler:** Doğrudan **Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'nin** deşarj standartları geçerlidir (aşağıdaki Ek-IV tabloları).

Bu ayrım sahada sık karıştırılır: 2.000 NE üzerindeki bir tesis için hâlâ SKKY Tablo 21'in eski kademeli değerlerine göre tasarım yapmak, güncel mevzuata uygun olmaz.

SKKY'nin **17.12.2022 tarih ve 32046 sayılı** son önemli değişikliği, atıksu yönetimine döngüsel ekonomi ilkelerini taşıması bakımından dikkat çekicidir: arıtılmış atıksu, gri su ve yağmur suyunun yeniden kullanım imkânlarının değerlendirilmesi ve arıtma çamuru yönetim planı hazırlanması bu değişiklikle gündeme gelmiştir.

Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (KAAY)

Resmî Gazete'de 08.01.2006 tarih ve 26047 sayı[10] ile yayımlanan KAAY, kanalizasyon sistemlerine boşaltılan kentsel atıksuların toplanması, arıtılması ve deşarjını düzenler ve büyük ölçüde AB'nin 91/271/EEC sayılı direktifinden uyarlanmıştır.

9. Kaynak: mevzuat.gov.tr
10. Kaynak: resmigazete.gov.tr

Yönetmelik, arıtma seviyesini nüfus eşdeğerine ve alıcı ortamın hassasiyetine göre kademelendirir: 2.000 NE üzeri yerleşimlerde ikincil arıtma, hassas alanlara deşarjda ise 10.000 NE üzeri için ileri (besin giderimli) arıtma zorunludur.

KAAY'ın **Ek-IV'ünde** tanımlanan ikincil arıtma çıkış standartları, tesis tasarımının hedef değerlerini belirler:

TABLO 1.8

Parametre	Konsantrasyon sınırı	Asgari giderim verimi
$BOİ_5$	25 mg/L	%70–90
KOİ	125 mg/L	%75
AKM (NE > 10.000)	35 mg/L	%90
AKM (NE 2.000–10.000)	60 mg/L	%70

Hassas alanlara deşarjda ise besin (nutrient) parametreleri devreye girer: toplam fosfor 10.000–100.000 NE için **2 mg/L**, 100.000 NE üzeri için **1 mg/L**; toplam azot ise sırasıyla **15 mg/L** ve **10 mg/L** ile sınırlanır. Bu değerler AB direktifindeki standartlarla birebir örtüşür, Türkiye mevzuatının uyum sürecinin somut bir göstergesi.

Ön Arıtma Yükümlülüğü ve Kurumsal Çerçeve

Türkiye'de kanalizasyon şebekesi bulunan yerlerde atıksuyun şebekeye bağlanması esastır. Ancak **endüstriyel atıksular**, belirlenen bağlantı kalite ölçütlerini aşıyorsa, kanalizasyona verilmeden önce **ön arıtmadan** geçirilmek zorundadır. Endüstriyel tesisler için bu yükümlülük, hava ve su kirliliğini bütünleşik ele alan Endüstriyel Emisyonlar Direktifi[11] gibi daha geniş çevresel düzenleme çerçeveleriyle de kesişir. Bu yükümlülük, hem kanalizasyon altyapısını hem de kentsel arıtma tesisinin biyolojik dengesini korur; ölçütleri aşan kaynaklar ancak atıksu altyapı yönetiminin izniyle ve ön arıtma tesisi kurma şartıyla bağlanabilir.

Uygulamada bu denetimi büyükşehirlerde su ve kanalizasyon idareleri (İSKİ, ASKİ, BUSKİ gibi) yürütür; bu idareler kendi deşarj yönetmelikleriyle SKKY çerçevesini yerelde somutlaştırır, **deşarj izin belgesi**[12] düzenler ve ön arıtma tesislerini denetler. Merkezî otorite ise **Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'dır**; alıcı ortam standartlarının belirlenmesi ve mevzuatın yürütülmesi Bakanlığın sorumluluğundadır. Büyükşehir olmayan yerlerde kentsel atıksu arıtma tesisi kurma ve işletme yükümlülüğü, KAAY'ın nüfus eşiklerine göre belediyelere aittir.

11. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/endustriyel-emisyonlar-direktifi-kapsamli-inceleme
12. Yeşil Ajanda'da: yesilajanda.com/cevre-izin-ve-lisans-belgesi-nedir

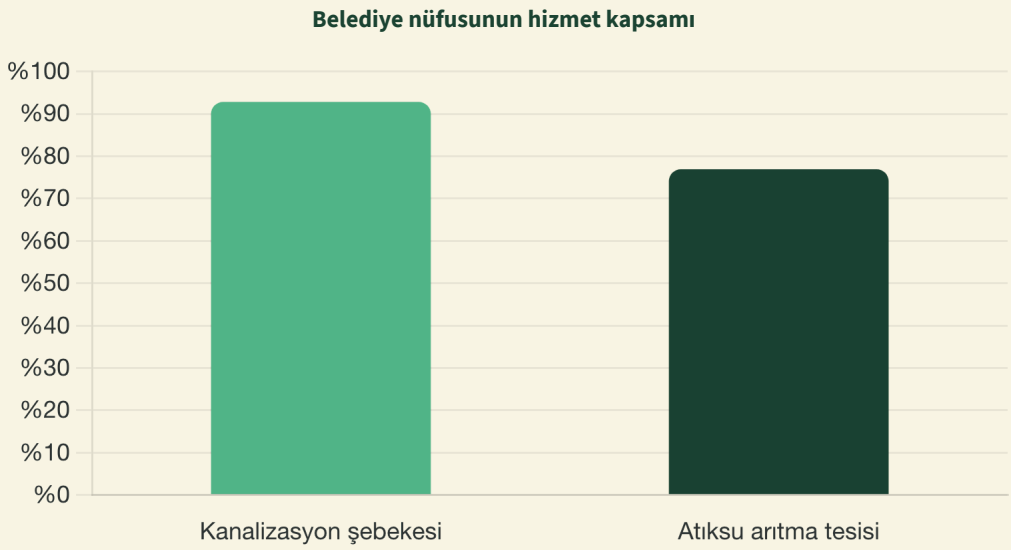
Türkiye'nin bu alandaki altyapı gelişimi hızlı olmuştur: **TÜİK'e göre** atıksu arıtma tesisi sayısı 2002'de yalnızca 145 iken, 2022 sonunda **1.315'e** ulaşmıştır. Arıtılan atıksuyun arıtma türüne göre dağılımı da tablonun neresinde olduğumuzu gösterir: **2024'te** arıtılan suyun **%53,8'i** gelişmiş (ileri) arıtmadan, **%24,5'i** biyolojik arıtmadan ve **%21,4'ü** yalnızca fiziksel (birincil) arıtmadan geçmiştir. Yani ülke genelinde arıtılan her beş birim sudan biri hâlâ sadece fiziksel arıtma görmektedir, bu da fiziksel arıtmanın güncelliğini koruyan, somut bir gerçektir.

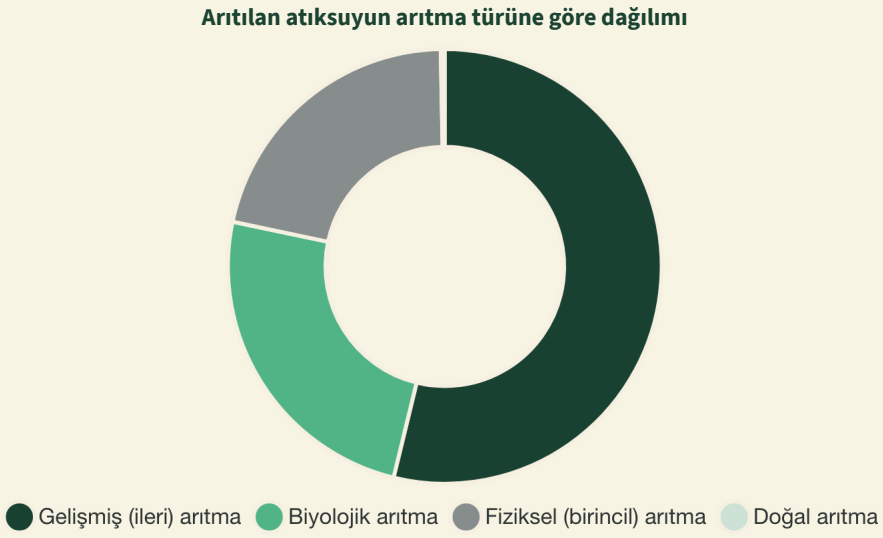
Bununla birlikte kritik boşluk kapasitede değil **kapsamdadır**: kanalizasyon şebekesi kapsamı (%92,8) ile arıtma tesisi kapsamı (%76,9) arasındaki fark, şebekeye bağlı olduğu halde arıtılmadan deşarj edilen bir atıksu payına işaret eder. Üstelik bu deşarjın **%48,5'i akarsulara, %37,9'u denizlere** verilmektedir; yani arıtma açığının doğrudan muhatabı, ülkenin tatlı su kaynakları ve kıyı ekosistemleridir. Arıtılan atıksuyun yeniden kullanım oranı ise **2024 itibarıyla %5,3** düzeyindedir ve Bakanlık bu oranı 2028'e kadar %11'e çıkarmayı hedeflemektedir, döngüsel su ekonomisinde kat edilecek yolun bir göstergesi.

ŞEKİL 1.10

Türkiye'de Atıksu Arıtımı: Kapsam Açığı ve Arıtma Türü Dağılımı

TÜİK, Su ve Atıksu İstatistikleri (2024)





Kritik boşluk kapasitede değil, **kapsamda**: kanalizasyon şebekesi (%92,8) ile arıtma tesisi (%76,9) kapsamı arasındaki **~16 puanlık fark**, şebekeye bağlı olduğu hâlde arıtılmadan deşarj edilen atıksuya işaret eder. Arıtılan suyun **%21,4'ü** ise hâlâ yalnızca fiziksel (birincil) arıtmadan geçiyor.

UZMAN NOTU

AB'de 91/271/EEC'nin yerini alan yeni direktif (2024/3019), kapsamı 1.000 NE'ye kadar küçük yerleşimlere genişletiyor, mikrokirleticiler için "kuaterner arıtma" ve büyük tesislerde enerji nötrlüğü gibi yeni zorunluluklar getiriyor. Türkiye AB üyesi olmadığından bu revizyon doğrudan bağlayıcı değil; ancak müktesebat uyum sürecinde ulusal mevzuatın referans noktası olmaya devam etmesi bekleniyor.

KİLİT MESAJ

Evrensel arıtma esasları, Türkiye'de SKKY ve KAAY'ın sayısal deşarj standartlarıyla somutlaşır. Bir tesisin "yeterli arıttığı", ancak bu tablolardaki sınır değerleri sağladığında söylenebilir.

1.11 Sonuç: Görünmeyen Ama Vazgeçilmez İlk Halka

Atıksu arıtımının fiziksel ve birincil kademeleri, çoğu zaman ileri teknolojilerin gölgesinde kalır; oysa bu bölümde gördüğümüz üzere, tüm arıtma zincirinin sağlığı bu ilk halkalara bağlıdır. Atıksuyu doğru karakterize etmeden ne bir havuz boyutlandırılabilir ne de deşarj uygunluğu değerlendirilebilir. Kütle dengesi olmadan tesisin gerçek yükü bilinemez. Izgara ve kum tutucu olmadan hiçbir pompa uzun ömürlü olamaz. Ve birincil çökeltim olmadan biyolojik kademe, taşıyamayacağı bir yükün altına girer.

Yeşil Ajanda olarak bu ilk bölümde üç temel noktaya dikkat çekiyoruz:

1. **Ölçmeden arıtma olmaz.** Karakterizasyon parametreleri (BOİ, KOİ, AKM, azot, fosfor) atıksu mühendisliğinin ortak dilidir; tasarımın her adımı bu değerlere dayanır.
2. **Fiziksel arıtma kirliliği yok etmez, taşır.** Giderilen kirletici, birincil çamura aktarılır; bu da çamur yönetimini arıtmanın ayrılmaz bir parçası kılar.
3. **Türkiye'de boşluk kapasitede değil, kapsamda.** Kanalizasyon ile arıtma kapsamı arasındaki fark ve düşük yeniden kullanım oranı, önümüzdeki dönemin öncelik alanlarını işaret ediyor.

Serinin ikinci bölümünde, birincil arıtmanın çözünmüş organik maddeye neden yetersiz kaldığı sorusundan yola çıkarak **biyolojik (ikincil) arıtmayı** ele alacağız: mikrobiyal kinetiğin temelleri, aktif çamur sistemleri ve tasarım parametreleri (F/M, çamur yaşı, MLSS), biyofilm sistemleri ve azot-fosfor giderimi. Fiziksel arıtmanın bıraktığı yerden, mikroorganizmaların devreye girdiği noktadan devam edeceğiz.

Sıkça Sorulan Sorular

Birincil arıtma ile ikincil arıtma arasındaki fark nedir?

Birincil arıtma **fiziksel** bir süreçtir: askıda katı maddeyi yerçekimiyle çökelterek giderir ve BOİ'nin yalnızca %25–40'ını uzaklaştırır. İkincil arıtma ise **biyolojik** bir süreçtir: mikroorganizmalar aracılığıyla çözünmüş organik maddeyi giderir ve çıkış BOİ'sini genellikle 25 mg/L düzeyine indirir. Birincil arıtma çözünmüş kirleticilere neredeyse hiç dokunmaz; bu yüzden tek başına deşarj standartlarını karşılamaya yetmez, ama ikincil kademenin yükünü hafifleterek onu mümkün kılar.

BOİ ve KOİ arasındaki fark nedir?

Her ikisi de organik kirliliği "oksijen ihtiyacı" cinsinden ölçer, ama farklı yöntemlerle. $BOİ_5$, mikroorganizmaların **biyolojik olarak ayrıştırabildiği** organik maddeyi 5 günde ölçer. KOİ ise güçlü bir kimyasal oksitleyiciyle **neredeyse tüm** organik maddeyi saatler içinde ölçer. KOİ her zaman BOİ'den büyüktür; ikisi arasındaki oran (KOİ/BOİ) atıksuyun biyolojik arıtmaya ne kadar elverişli olduğunu gösterir, evsel atıksuda tipik olarak 1,5–2,0'dır.

Yüzeysel yükleme hızı neden çökeltim tasarımının en önemli parametresidir?

Çünkü ideal çökeltim teorisine göre bir parçacığın giderilip giderilmeyeceğini belirleyen şey, havuzun **yüzey alanına** düşen debidir ($v_0 = Q/A$), derinliği değil. Çökelme hızı v_0'dan büyük olan tüm parçacıklar tam olarak tutulur. Bu nedenle bir çökeltim havuzunu büyütmek demek, çoğu zaman derinliğini değil **yüzey alanını** artırmak demektir.

Nüfus eşdeğeri (NE) tam olarak neyi ifade eder?

Nüfus eşdeğeri, bir kirlilik kaynağının potansiyelini "kaç kişiye denk" olduğu üzerinden ifade eden bir standart birimdir. AB tanımına göre 1 NE, günde 60 gram $BOİ_5$ oluşturan yüke karşılık gelir; Türkiye'nin Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği ise bu tabanı 45 gr $BOİ_5$/kişi·gün olarak belirler. Böylece bir fabrikanın veya otelin kirletme yükü, nüfus temelli mevzuat eşikleriyle (örneğin 2.000 veya 10.000 NE sınırlarıyla) doğrudan kıyaslanabilir hale gelir.

Türkiye'de evsel atıksu için deşarj sınırları nelerdir?

Belirleyici olan **eşdeğer nüfustur**. 2.000 NE ve üzerindeki yerleşimlerde **Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (KAAY)** geçerlidir: ikincil arıtma çıkışı için $BOİ_5$ **25 mg/L**, KOİ **125 mg/L**, AKM **35 mg/L** (NE > 10.000); hassas alanlara deşarjda ayrıca toplam fosfor (2 veya 1 mg/L) ve toplam azot (15 veya 10 mg/L) limitleri uygulanır. 2.000 NE altındaki yerleşimlerde ise Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nin (SKKY) 32. maddesi uyarınca İl Müdürlüğünce uygun görülen arıtma veya fosseptik gibi bertaraf yöntemleri esas alınır. Not: SKKY Tablo 21'in 2.000 NE üzerini kapsayan bölümleri 31 Aralık 2017'den sonra yürürlükten kalkmış, yerini KAAY'a bırakmıştır.

Ön arıtma ile birincil arıtma aynı şey midir?

Hayır. **Ön arıtma** (ızgara, kum tutucu, yağ-gres giderimi) iri katıları ve kumu uzaklaştırarak ekipmanı korur; bir arıtma kademesi değil, hazırlık kademesidir. **Birincil arıtma** ise çökeltim yoluyla askıda katı maddeyi ve bir miktar organik yükü fiilen gideren ilk gerçek arıtma kademesidir.

Kum tutucu neden gereklidir?

Atıksudaki kum, çakıl ve benzeri ağır inorganik parçacıklar aşındırıcıdır; giderilmezlerse pompaları ve mekanik ekipmanı yıpratır, çökeltim havuzlarında ve özellikle çamur çürütücülerinde birikerek hacim kaybına yol açar. Kum tutucu, bu maddeleri kontrollü bir hızda (yaklaşık 0,2–0,3 m/s) çökelterek organik maddeden ayırır ve tüm alt kademeleri korur.

Nüfus eşdeğeri ile gerçek nüfus aynı şey midir?

Hayır. Gerçek nüfus, bir yerleşimde yaşayan insan sayısıdır; nüfus eşdeğeri (NE) ise kirletme yükünün "kaç kişiye denk" olduğunu ifade eden bir hesap birimidir. Bir yerleşimin nüfus eşdeğeri, sanayi ve ticari katkılar nedeniyle gerçek nüfusundan belirgin biçimde yüksek olabilir. Mevzuattaki arıtma yükümlülükleri (örneğin 2.000 veya 10.000 NE eşikleri) gerçek nüfusa değil, nüfus eşdeğerine göre uygulanır.

Kimyasal destekli birincil arıtma (CEPT) nedir, ne işe yarar?

CEPT, birincil çökeltimden önce koagülan ve flokülan ekleyerek ince parçacıkları hızlı çöken iri floklara dönüştüren bir yöntemdir. Böylece AKM giderimi %60–90'a, BOİ giderimi %50–60'a çıkabilir. CEPT hem daha küçük havuzlarda daha yüksek verim sağlar hem de organik yükü birincil çamura yönlendirerek anaerobik çürütmeyle enerji (biyogaz) geri kazanımını artırır.

Birincil çökeltimden çıkan çamur nereye gider?

Havuz tabanında biriken birincil çamur, tesisin çamur hattına aktarılır; burada sırasıyla yoğunlaştırma, stabilizasyon (çoğunlukla anaerobik çürütme), susuzlaştırma ve nihai bertaraf/değerlendirme işlemlerinden geçer. Anaerobik çürütme sırasında üretilen biyogaz, tesisin enerji ihtiyacının bir bölümünü karşılayabilir. Çamur yönetiminin tüm ayrıntıları serinin üçüncü bölümünün konusudur.

Yüzeysel yükleme hızı ile bekleme süresi arasındaki ilişki nedir?

İkisi bağlantılıdır ama aynı şey değildir. Yüzeysel yükleme hızı (Q/A) yalnızca havuzun **yüzey alanına** bağlıdır ve bir parçacığın giderilip giderilmeyeceğini belirler. Bekleme süresi (V/Q) ise havuzun **hacmine** bağlıdır ve suyun havuzda ne kadar kaldığını gösterir. Aynı yüzeysel yükleme hızına sahip iki havuz, farklı derinliklerde farklı bekleme sürelerine sahip olabilir. Tasarımda her ikisi de ayrı ayrı önerilen aralıklarda tutulur.

Küçük bir köy veya tesis için de aynı arıtma kademeleri gerekir mi?

Temel ilkeler aynı kalır, ama uygulama ölçeğe göre basitleşir. Kanalizasyon şebekesi olmayan küçük yerleşimlerde büyük çökeltim havuzları yerine septik tank veya Imhoff tankı gibi kompakt birincil arıtma çözümleri; giderek artan biçimde de önceden monte edilmiş paket arıtma üniteleri kullanılır. Fiziksel arıtmanın mantığı değişmez; yalnızca ünitelerin boyutu ve karmaşıklığı ihtiyaca göre ayarlanır.

Birincil arıtma tek başına yeterli midir?

Hayır. Birincil arıtma, çökebilen katıları ve bir miktar organik yükü giderir; ancak çözünmüş organik maddeye, besin maddelerine (azot, fosfor) ve patojenlere neredeyse hiç etki etmez. Bu nedenle birincil arıtma çıkışı, hemen hemen hiçbir durumda deşarj standartlarını tek başına sağlamaz. Modern mevzuat (hem AB direktifi hem Türkiye'deki Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği) belirli nüfus eşiklerinin üzerinde en az ikincil (biyolojik) arıtmayı zorunlu kılar. Birincil arıtma, bu asıl arıtmayı hazırlayan vazgeçilmez ama yeterli olmayan bir ilk adımdır.

BÖLÜM SONU

Bölüm özeti

Bölümdeki Kilit Mesaj kutularının birebir derlemesi.

§1.2 Arıtma kademeleri bir hiyerarşi değil, bir zincirdir; her halka bir sonrakini mümkün kılar. Fiziksel arıtma bu zincirin ilk ve en dayanıklı halkasıdır.

§1.3 Karakterizasyon, arıtmanın pusulasıdır. BOİ, KOİ, AKM, azot ve fosforun ne olduğunu ve tipik düzeylerini bilmeden ne havuz boyutlandırılabilir ne de deşarj uygunluğu değerlendirilebilir.

§1.4 Derişim atıksuyun ne kadar kirli olduğunu, kütle yükü ise tesisin ne kadar iş yapması gerektiğini söyler. Tasarım kararları neredeyse her zaman kütle yüküne dayanır.

§1.5 Ön arıtma görünmez kahramandır, hiçbir kirlilik parametresini kayda değer ölçüde düşürmez, ama onsuz hiçbir alt kademe sağlıklı çalışamaz.

§1.6 Birincil çökeltimin sırrı derinlikte değil, yüzey alanındadır. $v_0 = Q/A$ denklemi, tüm çökeltim tasarımının özetidir; kimyasal destek (CEPT) ise bu fiziksel kademenin sınırlarını enerji geri kazanımıyla birleştirerek genişletir.

§1.8 İyi tasarım gerekli ama yeterli değildir. Kısa devre, septiklik, köpük ve kum kaçağı gibi sorunlar, doğru boyutlandırılmış bir üniteyi bile verimsiz kılabilir; fiziksel arıtmanın başarısı büyük ölçüde disiplinli işletmeye bağlıdır.

§1.9 Fiziksel arıtma yalnızca bir "ön temizlik" değil, tesisin enerji ve kaynak dengesinin ilk kaldıracıdır; birincil çamur, doğru yönetildiğinde bir atık değil, bir enerji kaynağıdır.

§1.10 Evrensel arıtma esasları, Türkiye'de SKKY ve KAAY'ın sayısal deşarj standartlarıyla somutlaşır. Bir tesisin "yeterli arıttığı", ancak bu tablolardaki sınır değerleri sağladığında söylenebilir.

BAŞVURU

Semboller ve birimler

Bölümün denklemlerindeki değişkenler; tanımlar denklem kartlarından birebir.

SEMBOL	TANIM VE BİRİM	İLK GEÇTİĞİ
A	havuzun yüzey alanı (m^2)	(1.4)
b	çubuklar arası açıklık (m)	(1.2)
β	çubuk şekil katsayısı (2,42 – 0,76)	(1.2)
$C_{giriş}$	giriş derişimi (mg/L)	(1.5)
$C_{çıkış}$	çıkış derişimi (mg/L)	(1.5)
$Debi$	(m^3/gün)	(1.1)
$Derişim$	(g/m^3 = mg/L)	(1.1)
d_p	parçacık çapı (m)	(1.3)
g	yerçekimi ivmesi (9,81 m/s^2)	(1.3)
h_L	yük kaybı (m)	(1.2)
h_v	hız yüksekliği, $v^2/2g$ (m)	(1.2)
μ	suyun dinamik viskozitesi (Pa·s)	(1.3)
Q	debi (m^3/gün)	(1.4)
ρ_p	parçacık yoğunluğu (kg/m^3)	(1.3)
ρ_w	su yoğunluğu (kg/m^3)	(1.3)
θ	çubukların yatayla açısı	(1.2)
v_0	yüzeysel yükleme hızı (m^3/m^2·gün)	(1.4)
v_s	çökme hızı (m/s)	(1.3)
w	çubuk genişliği (m)	(1.2)
$Yük$	kütle yükü (kg/gün)	(1.1)
η	giderim verimi (%)	(1.5)

BAŞVURU

Denklem dizini

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

(1.1) **Kütle Yükü · tasarımın temel hesabı** s. 14

$$\text{Yük} = \frac{\text{Derişim} \times \text{Debi}}{1.000}$$

(1.2) **Kirschmer Denklemi · ızgarada yük kaybı** s. 18

$$h_L = \beta \left(\frac{w}{b}\right)^{4/3} h_v \sin\theta$$

(1.3) **Stokes Yasası · ayrık parçacığın çökme hızı** s. 23

$$v_s = \frac{g\,(\rho_p - \rho_w)\,d_p^{\,2}}{18\,\mu}$$

(1.4) **Yüzeysel Yükleme Hızı · çökeltim tasarımının imza denklemi** s. 25

$$v_0 = \frac{Q}{A}$$

(1.5) **Giderim Verimi · bir ünitenin başarısı** s. 28

$$\eta = \frac{C_{\text{giriş}} - C_{\text{çıkış}}}{C_{\text{giriş}}} \times 100$$

Kaynaklar

- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D. (Metcalf & Eddy) – *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (McGraw-Hill)
- Water Environment Federation (WEF) – *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, MOP No. 8
- Water Environment Federation (WEF) – *Liquid Stream Fundamentals: Sedimentation* (WSEC-2017-FS-022, 2017)
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı – "Fiziksel Arıtma" teknik dokümanı
- U.S. EPA – *40 CFR § 133.102, Secondary Treatment*
- U.S. EPA – Operator Webinar Series, "Primary Clarifiers" (L. Moore, 2023)
- J. Paul Guyer / CEDengineering – "An Introduction to Preliminary/Primary Wastewater Treatment"
- N. Voutchkov – "Introduction to Wastewater Clarifier Design" (SunCam, 2017)
- University of Colorado Boulder – CVEN 5534 Ders Notu (Wastewater Characteristics)
- Avrupa Birliği Konseyi – *Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifi 91/271/EEC* (Madde 2(6)) ve revizyon *Direktif (AB) 2024/3019*
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (RG 31.12.2004/25687; değişiklikler 13.02.2008/26786 ve 17.12.2022/32046)
- Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (RG 08.01.2006/26047; değişiklik 08.12.2023/32393)
- TÜİK – *Su ve Atıksu İstatistikleri, 2024*
- UN-Water / UN Statistics Division – *SDG Report 2025, Goal 6* ve *Progress on Wastewater Treatment – 2024 Update*
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı – Çevresel Göstergeler (Atıksu Arıtma Tesisleri)

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 1: Karakterizasyon ve Fiziksel Arıtma* (Yeşil Ajanda Akademi Serisi, Sürüm 1.0). yesilajanda.com/atiksu-aritimi-esaslari-temeller-ve-fiziksel-aritma

YEŞİL AJANDA

AKADEMİ SERİSİ

Atıksu Arıtımının Esasları · Bölüm 1 / 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-temeller-ve-fiziksel-aritma/

Yayın tarihi: 27 Temmuz 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.