

İTÜ Dergisi/d**mühendislik**

Cilt:1 Sayı:1 Ağustos 2002

Aktif çamur sistemlerinde oksijen gereksiniminin biyokimyasal esasları ve modellenmesi

Derin ORHON*, Özlem KARAHAN-GÜL, Nazik ARTAN

İTÜ İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 80626 Maslak, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, aktif çamur sistemlerinde oksijen tüketimi, değişik biyokimyasal dönüşümleri yansıtan temel süreçler yardımı ile belirlenip modellenmiştir. Modellemede, substrat kullanımı ve biyokütle oluşumu esas alınmıştır. Oksijen tüketimini belirten ifadelerde substrat ve biyokütlenin tanımı için kullanılan değişik parametre çiftleri kullanılmıştır. Kullanılan modellerin kinetiği ve stokiyometrisi matris formatında her parametre çifti için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Oksijen tüketimi için geçerli olan değişik ifadeler bu modellere göre türetilmiş ve bu yaklaşımla literatürde verilen benzer tanımların biyokimyasal temelleri ortaya konmuştur. İncelemede, Türkiye'de aktif çamur tesislerin tasarımında oksijen gereksiniminin hesaplanması için yönetmeliklerde kullanılması önerilen ifadeler de ele alınmış ve bu ifadelerdeki katsayıların geçerliliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif çamur, biyokütle, modelleme, oksijen gereksinimi, substrat.

Biochemical basis and modeling of oxygen requirement in activated sludge systems

Abstract

In this study, oxygen requirement in activated sludge is evaluated and modelled in terms of fundamental processes reflecting different biochemical transformations. Modern modeling concepts define substrate utilisation and endogenous decay as major processes requiring final electron acceptor. In aerobic systems, dissolved oxygen acts as, and therefore, is consumed as the final electron acceptor. Substrate and biomass may be defined in terms of different parameters. Chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand (BOD₅) are the traditional substrate parameters. COD also serves to define biomass along with the more traditional volatile suspended solids (VSS) parameter. Model alternatives covering basic biochemical processes in activated sludge are defined in a matrix format for different substrate and biomass parameters, each associated with a different stoichiometry. These modeling alternatives are used to derive different oxygen requirement expressions, all compatible among themselves, for each substrate/biomass couple. The biochemical bases of the coefficients in these expressions are set in terms of fundamental model constants. As a practical implication of the conceptual evaluation approach, this study also covers a critical appraisal of formulations proposed in the regulations implemented by the authorities in Turkey, for the evaluation of the oxygen requirements in activated sludge design.

Keywords: Activated sludge, biomass, modeling, oxygen requirement, substrate.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Derin Orhon, dorhon@ins.itu.edu.tr. Tel: (212) 285 38 55.

Makale metni 16.07.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 29.07.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.12.2002 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Aktif çamur sistemlerinde arıtma olayının temel unsurlarından biri havalandırmadır. Havalandırma yolu ile reaksiyon ortamına sürekli çözülmüş oksijen sağlanır. Yetersiz havalandırma yapıldığında çözülmüş oksijen konsantrasyonunun azalması ve hatta tükenmesi söz konusudur. Bu durumda tüm arıtma düzeni çöker. Dolayısıyla, aktif çamurdaki çoğalma ortamının gerek duyduğu oksijen miktarının doğru hesaplanması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, oksijen gereksiniminin hesaplanmasına yönelik değişik ifadeler geliştirilmiştir (Orhon ve Artan, 1994; Eckenfelder ve Grau, 1992). Bu ifadelerin bazıları aktif çamur sistemlerinin tasarımı için düzenlenen yönetmeliklerde yer almıştır (ATV, 1991). Çok yakın bir geçmişe kadar, oksijen gereksinimini tanımlanmasına ampirik yaklaşımlar hakim olmuştur. Bu yaklaşımlar mühendislik sağ duyusu ile çoğu kez kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla, doğru sonuçlara yönelmiştir. Ancak, son dönemlerde aktif çamur düzenindeki gelişmeler ve organik karbonun yanında azot ve fosfor giderimine çalıştırılan sistemlerin ortaya çıkması oksijen gereksiniminin daha titiz ve doğru bir bakış açısı ile tanımlanmasını zorunlu kılmıştır.

Oksijen, aerobik koşullarda çalıştırılan aktif çamur ortamında, çoğalan biyokütlenin metabolik fonksiyonları bünyesinde, enerji sağlayan reaksiyonların temel unsurlarından biridir ve bu reaksiyonlarda son elektron alıcısı olarak kullanılmaktadır. Bu çerçevede, metabolik fonksiyonlar için gerekli oksijen miktarının doğru hesaplanabilmesi, öncelikle bu fonksiyonları mekanizma olarak tanımlayan fiziksel modellerin mümkün olduğunca gerçekçi bir temelde belirlenmesine bağlıdır. Bu da, gerçek biyokimyasal dönüşümleri modelde yansıtacak süreçlerin ve bu süreçleri tanımlayacak, bunların içinde yer alacak model bileşenlerinin mümkün olan en doğru biçimde belirlenmesi anlamına gelmektedir. Aktif çamur sistemlerini modelleme çabaları 1960'lı yıllarda başladıkları dönemden bu yana çok gelişmiştir. Organik karbon giderimi için ilk modeller sadece, sübstrat, biyokütle ve çözülmüş oksijen bileşenlerini ve çoğalma ve içsel solunum proseslerini tanımlar iken (Alonzo ve McCarty, 1971), günümüzde aynı

amaç için çok bileşenli ve süreçli modeller kullanılmaktadır (Orhon ve Artan, 1994).

Oksijen gereksiniminin doğru belirlenebilmesi için, modelleme yanında, modelde kullanılan sübstrat ve biyokütle gibi temel model bileşenlerini tanımlayan kimyasal oksijen ihtiyacı, KOİ, biyokimyasal oksijen ihtiyacı, BOİ₅, ve uçucu askıda katı madde, UAKM, gibi parametreler arasındaki stokiyometrik ilişkilerin model bünyesinde doğru kurulması esastır. Şu anda, tüm güncel modellerde hem sübstrat hem de biyokütle için KOİ parametresi kullanılmaktadır. Ancak modelleri uygulamaya dönüştürme aşamasında bazen sübstratı BOİ₅ parametresine, biyokütleyi de UAKM parametresine dönüştürmek gerekebilir. Bu durumlarda oksijen gereksinimi bağıntısının türetilmesine esas olan kütle korunum denklemlerinin yeni stokiyometriye göre yeniden ifadesi söz konusudur. Uygulamada rastlanan yanlışlıklar bu dönüşümlerin doğru yapılmamasından kaynaklanmaktadır.

Modellerde yer alan biyokimyasal süreçler bir dizi kinetik ve stokiyometrik katsayı ile belirlenmektedir. Modellerin geçerliliği, büyük ölçüde bu katsayıların değerlerine bağlı olmaktadır. Bu katsayıların hiçbiri için mutlak değerler söz konusu değildir. Bazı modelleme çalışmalarında katsayılar için önerilmiş olan kullanım (default) değerlerini sadece yol gösterici büyüklükler olarak değerlendirmek doğru olur (Henze v. diğ., 1987). Her bir model katsayısının incelenen mahale ve atıksuya uygun olarak seçilmiş olması gerekir. Özellikle, değişik parametrelerin (KOİ/BOİ₅; KOİ/UAKM, vb.) dönüşümlerini tanımlayan stokiyometrik katsayıların her atıksuya uygun olarak dikkatle belirlenmesi, hesapların doğruluğu bakımından çok önemlidir.

Bu çalışmada, aerobik koşullarda, organik karbon giderimine çalıştırılan aktif çamur sistemlerinde oksijen tüketimi, değişik biyokimyasal dönüşümleri yansıtan temel süreçler yardımı ile belirlenip modellenmiştir. Bunun için yeni, çok bileşenli model tanımları kullanılmış ve elde edilen sonuçlar geleneksel modelleme yaklaşımları ile kıyaslanmıştır. Modelleme, esasta sübstrat ve biyokütle türlerinin KOİ ile belirlendiği sistemler için ele alınmış, buradan KOİ/UAKM

ve $BOI_5/UAKM$ parametre çiftleri için gerekli değişiklikler gösterilmiştir. Çalışmada, Türkiye’de aktif çamur tesislerinin tasarımında oksijen gereksiniminin hesaplanması için kullanılması önerilen ifadeler de ele alınmış ve bu ifadelerdeki katsayıların geçerliliği değerlendirilmiştir.

Kavramsal Yaklaşım

Aktif Çamur Modellerinin Matris Yaklaşımı ile Gösterimi

Aktif çamur modellerinin reaksiyon kinetiğinin açıkça belirlenebilmesi için IAWPRC Çalışma Grubu (Henze v. diğ., 1987) tarafından modellerin matris formatında oluşturulması önerilmiştir. Modellerin bu formata uygun olarak yazılması, hem daha iyi anlaşılmasını sağlamış, hem de modellerde yer alan reaksiyonlara ait denklemlerin bilgisayar ortamına kolaylıkla aktarılmasına olanak vermiştir. Matris yaklaşımı ile, model bileşenleri, prosesler, stokiyometrik bağıntılar ve proses kinetiği net bir şekilde belirlenebilmekte ve modelde yer alan süreçlerin reaksiyon hızları sistematik olarak ifade edilebilmektedir.

Önerildiğinden bugüne değin geniş bir kullanım alanı bulan matris gösteriminde (Tablo 1) ilk kolon tanımlanan modele ait proseslerin isimlerini, j , içerir. Matrisin ilk satırında, model bileşenleri, i , verilmektedir. Matrisin son (sağ) kolonu her bir prosese ait proses hızı, ρ_j , ifadelerinden oluşmakta ve her model bileşeninin stokiyometrik katsayısı, v_{ij} , matrisin içine yerleştirilmektedir.

Matriste yer alan her proses satırı kütle koru-

numunu sağlamalıdır. Başka bir deyişle tüm model bileşenlerinin KOI cinsinden gösterilmesi ve çözülmüş oksijenin de negatif KOI olarak değerlendirilmesi halinde her proses satırındaki stokiyometrik ifadelerin toplamı sıfır olmalıdır.

$$\sum_i v_{ij} = 0 \quad (1)$$

Model bileşenlerine ait reaksiyon hızları, r_{ij} , her proseste o bileşenin stokiyometrik katsayısı ile proses hızının çarpımından elde edilir.

$$r_{ij} = v_{ij} \cdot \rho_j \quad (2)$$

Bileşenlerin gözlenen hızları ise tüm proseslerdeki reaksiyon hızlarının toplamına eşittir.

$$r_i = \sum_j r_{ij} = \sum_j v_{ij} \rho_j \quad (3)$$

Çok Bileşenli Aktif Çamur Modellerinde Oksijen Gereksinimi

Aktif çamur modelleri, içerdikleri prosesler, bu proseslerin ilişkili oldukları model bileşenleri ve tanımlandıkları proses hızı ifadeleri ile birbirlerinden ayrılırlar. Günümüzde geçerliliğini kaybetmiş olmasına karşın, *konvansiyonel aktif çamur modeli* bu sistemlerin modellenmesinde kullanılan temel kavramları örneklemek açısından önem taşımaktadır. Konvansiyonel aktif çamur modellenmesinde, *çoğalma* ve *içsel solunum* organik karbon giderimini tanımlayan iki temel proses olarak kullanılmıştır. Bu prosesler minimum üç model bileşeni için tanımlanır - *biyokütle*, *süstrat* ve *çözülmüş oksijen*. Aktif

Tablo 1. Matrisi Gösterimi

Bileşen j Proses	i	1	2	...	i	Proses Hızı, ρ_j $ML^{-3}T^{-1}$
1		v_{11}	v_{21}	...	v_{i1}	ρ_1
2		v_{12}	v_{i2}	ρ_2
...		$\rho_{...}$
j		v_{1j}	v_{2j}		v_{ij}	ρ_j
Gözlenen dönüşüm hızı, $ML^{-3}T^{-1}$		$r_i = \sum_j r_{ij} = \sum_j v_{ij} \rho_j$				
Parametreler, ML^{-3}		Birim	Birim	Birim	Birim	

çamur sistemlerinin tüm modelleme yaklaşımlarında, çoğalma prosesi Monod türü bir denklem ile ifade edilir. İçsel solunum kavramı ise, modellere birinci dereceden bir reaksiyon hızı ile yansıtılmıştır. Proses hızlarının $[ML^{-1}T^{-1}]$ birimi ile belirlendiği ve birim zamanda, birim hacimde kütle değişimini verdiği dikkate alınmalıdır.

Konvansiyonel aktif çamur modellerinde sübstratın ve biyokütlenin birer bileşen ile tanımlanması, bu modellerin kullanımı açısından büyük güçlükler yaratmaktadır. KOİ, BOİ, UAKM gibi kolektif parametrelerle ifade edilen bu bileşenler, hız kısıtlayıcı sübstratı ve aktif heterotrofik biyokütle konsantrasyonunu belirleyemediğinden, model sonuçlarının tutarlılığı ve geçerliliği tartışılır hale gelmektedir. Konvansiyonel modellerin ikinci önemli eksiği ise, modeldeki çoğalma ve içsel solunum proseslerinin sistemin mekanizmasını tanımlamaktaki yetersizliğidir. Bunun yanı sıra, sistem çıkışında ölçülen organik maddenin giriş atıksuyunun arıtmadan artakalan bir bölümü olduğunun kabul edilmesi, çıkış suyu kalitesinin belirlenmesinde hatalara yol açmaktadır. Bu konuda yürütülen çalışmalar, aktif çamur sistemlerinde yer alan süreçler sonucu oluşan mikrobiyal ürünlerin çıkış atıksuyu karakterini belirlediğini ortaya koymuştur. Bu kapsamda, konvansiyonel aktif çamur modelinin sistemde oluşan inert metabolik ürünler ile giriş akımında mevcut ve hiç bir biyokimyasal reaksiyona girmeden sistemden atılan inert bileşenler de hesaba katılacak şekilde geliştirilmesi, deşarj edilen atıksuyun organik madde içeriğini belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır.

Geleneksel modellerin yetersizliklerini gidermek amacıyla önerilen çok bileşenli modeller günümüzde oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır. 1987 yılında IAWPRC Çalışma Grubu (Henze v. diğ., 1986) tarafından önerilen Aktif Çamur Modeli No.1 (Activated Sludge Model No.1, ASM1) atıksuyun organik madde içeriğini kolay ve yavaş ayrışan bileşenler olarak ikiye ayırmış ve çoğalma ve bozunma proseslerine ek bir proses olarak da yavaş ayrışan organik maddenin hidrolizini kullanmıştır. ASM1 uyarınca tanımlanan bozunma

prosesinin, ölüm-yenilenme mekanizması doğrultusunda gerçekleştiği ve biyokütlenin bozunması ile inert metabolik ürünler ve yavaş ayrışan organik sübstrat oluştuğu varsayılmıştır. Biyokütlenin bozunması ile oluşan yavaş ayrışabilir sübstrat tekrar çoğalmada kullanılarak sonsuz bir döngü içine girdiğinden ve tanımlanan bozunma prosesinin pek çok prosesi bir arada yansıtması dolayısıyla net bir şekilde karakterize edilememesinden dolayı, ASM1 modeli kısa süre içerisinde bozunma prosesi olarak içsel solunum mekanizması kullanılarak üzere modifiye edilmiştir. Bu modifikasyon ile modelin bilgisayar ortamında simülasyonu ve içsel solunum prosesinin aktif biyokütle bazında karakterizasyonu mümkün olabilmıştır. Karbon ve azot giderimi için önerilmiş ASM1 modeli genişletilerek biyolojik aşırı fosfor giderimini de içine alacak şekilde düzenlenmiş ve ASM2 ve ASM2d modelleri 1995 yılında yayınlanmıştır (Henze v. diğ., 1995). Bu modellerin aktif çamur sistemlerinin tasarımı ve işletmesinde kullanılması ile ortaya çıkan tecrübeler, ASM1 modelinin sistemde gerçekleşen süreçleri tanımlamakta yetersiz kaldığını göstermiş ve ASM1 proseslerine sübstratın biyokütle içerisinde çeşitli polimerler halinde depolanması da eklenecek ASM3 modeli önerilmiştir (Gujer v. diğ., 2000).

Bu çalışma kapsamında, çoğalma prosesinin ASM1 modeli esas alınarak, biyokütlenin bozunmasının ise, içsel solunum mekanizması uyarınca gerçekleştiği kabul edilerek (Washington ve Hetling, 1965; Eckhoff ve Jenkins, 1967; Chudoba v. diğ., 1968) yalnızca karbon giderimi için hazırlanan model Tablo 2'de verilmektedir. Modelde, sübstrat kolay (S_S) ve yavaş ayrışan KOİ (X_S) bileşenleri ile tanımlanmış, yavaş ayrışan KOİ'nin hidroliz ile kolay ayrışan KOİ'ye dönüştüğü ifade edilmiştir. Ayrıca, Tablo 2'de de görüldüğü üzere, içsel solunum mekanizması ile bozunan biyokütlenin bir kısmının (f_{ES}) çözülmüş formda (S_P), bir kısmının da (f_{EX}) partiküler formda (X_P) inert metabolik ürün oluşturduğu belirtilmiştir. Giriş akımındaki çözülmüş (S_I) ve partiküler (X_I) inert KOİ bileşenleri, hiç bir biyokimyasal proses içinde yer almadığı için matriste gösterilmemiştir. Ayrıca, bu kapsamda sadece karbon giderimi ele

Tablo 2. İçsel solunum modeli ile karbon giderimi için hazırlanan reaksiyon matrisi

Bileşen	i	1	2	3	4	5	6	Proses Hızı, ρ_j ML ⁻³ T ⁻¹
j Proses		S _S	X _S	X _H	X _P	S _P	S _O	
1 Çoğalma		$-\frac{1}{Y_H}$	-	-	-	-	$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$	$\hat{\mu}_H \frac{S_S}{K_S + S_S} X_H$
2 İçsel Solunum		-	-	-1	f _{EX}	f _{ES}	-(1-f _{EX} -f _{ES})	b _H X _H
3 Yavaş Ayrışan Organik Maddenin Hidrolizi		1	-1	-	-	-	-	$k_h \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} X_H$
Parametreler, ML ⁻³		KOİ	KOİ	Hücre KOİ	KOİ	KOİ	O ₂ -KOİ	-

alındığından aktif heterotrofik biyokütle bileşeni modelde yer almıştır.

Matrisin Özelliği: sübstrat ile biyokütlenin KOİ ile belirlenmesi

Aktif çamur sistemlerinin tasarımında ve modellenmesinde en önemli noktalardan biri de atıksuyun organik madde içeriğinin belirlenmesidir. Atıksularda bulunan azot ve fosfor gibi inorganik bileşikler fizikokimyasal yöntemlerle kolaylıkla belirlenebilmekte ancak, çok sayıda ve değişik formlarda bulunabilen organik bileşiklerin tekil olarak saptanması mümkün olamamaktadır. Bunun sonucu olarak, atıksuda bulunan organik maddelerin indirekt yöntemler kullanılarak kolektif parametreler ile belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Bu amaçla atıksu karakterizasyonunda ve aktif çamur sistemlerinin modellenmesinde sıklıkla kullanılan parametreler BOİ (Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı), KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı), ve TOK (Toplam Organik Karbon) olarak sıralanabilir. Bu parametreler arasında KOİ modelleme çalışmaları açısından büyük önem taşımaktadır, çünkü KOİ parametresi, biyokimyasal reaksiyonlardaki karbon dengesini sübstratın stokiyometrik eşdeğeri olarak ifade edebilmektedir. Bir başka deyişle KOİ, sübstrat, biyokütle ve çözünmüş oksijen arasında elektron eşdeğerliği kurması bakımından

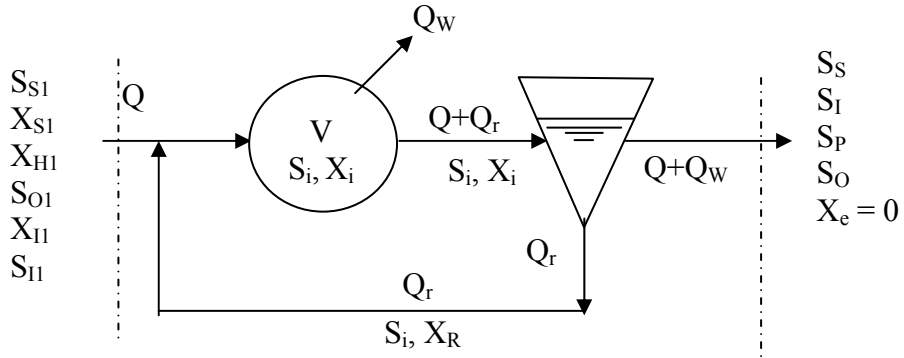
modellemede ve tasarımda kullanılacak en uygun parametredir.

Aktif çamur sistemleri, gün içindeki debi ve organik yük dalgalanmalarına karşın, uzun vadede kararlı dengede işletilebilirler. Sistem modellenmesi için Şekil 1'de şematik olarak gösterilen *proses diyagramı*'ndan yararlanılabilir. Şekilde gösterildiği gibi, temel kütle korunum denklemleri için sistemin giriş ve çıkışını içine alan kontrol kesitleri göz önüne alınır. Modelleme genelde aşağıdaki kabullere dayandırılır:

- Çökeltme tankında biyokimyasal reaksiyon oluşmaz.
- Çökeltme tankındaki biyokütle ihmal edilir.
- Giriş akımı biyokütle içermez ($X_{H1} = 0$).
- Çıkış akımında biyokütle olmayacak şekilde ($X_{He} = 0$) tam çökeltme sağlanır ve çamur sadece artık çamur akımı ile uzaklaştırılır.

Bu kabuller, kinetik teori ya da tesisin tasarımı ve işletimini etkilemeksizin, modelin basit bir çerçevede yorumlanmasını sağlar.

Kararlı halde çalışan bir sistemde oksijen gereksinimi (OG), giriş (S_{O1}) ve çıkış (S_O) akımlarındaki oksijen konsantrasyonları arasındaki fark ihmal edilerek, oksijen tüketim hızının



Şekil 1. Proses diyagramı

dan hareketle hesaplanabilir. Oksijen tüketim hızı, OTH, Tablo 1’de verilen matris esas alınarak belirlenmiştir.

$$OG = V \cdot OTH = V \cdot \frac{1 - Y_H}{Y_H} \mu_H X_H + V \cdot (1 - f_E) b_H X_H \quad (4)$$

Yukarıdaki ifadede kullanılan f_E parametresi, içsel solunum sonucu oluşan inert metabolik ürünlerin fraksiyonunu tanımlamakta ve aşağıdaki bağıntı ile verilmektedir:

$$f_E = f_{ES} + f_{EX} \quad (5)$$

Aktif heterotrofik biyokütle atıksudaki kolay ayrışan sübstrat (S_S) ve yavaş ayrışan sübstratın (X_S) hidrolizi ile oluşan S_S üzerinde çoğalma yolu ile oluşur. Bu iki sübstrat bileşeni için toplam ayrışabilir sübstrat ifadesi:

$$C_{S1} = S_{S1} + X_{S1} \quad (6)$$

tanımlaması yapılarak elde edilir ve sistemde ayrışabilir KOİ’nin giderim verimi E ile verilirse, kütle dengesi ifadesinden:

$$V \cdot \frac{\mu_H}{Y_H} X_H = EQC_{S1} \quad (7)$$

eşitliği elde edilir. Bu değer (4) denklemine yerine konursa aşağıdaki ifade oluşturulur:

$$OG = (1 - Y_H) \cdot EQC_{S1} + V \cdot (1 - f_E) b_H X_H \quad (8)$$

Kolay ayrışan sübstratın tamamıyla sistemde giderileceği düşünülürse, giderim verimi (E) ya-

vaş ayrışan sübstratın (X_S) hidroliz hızı tarafından belirlenecektir.

Yukarıdaki denklem (8), sistemin oksijen gereksinimi üzerine iki önemli prosesin etkisini ayrı ayrı göstermektedir. İlk terim, çoğalma prosesinde enerji üretimi için kullanılan sübstratın oksijen eşdeğerini ifade ederken ikinci terim içsel solunum prosesinde kullanılan oksijen miktarını göstermektedir.

Oksijen gereksinimi sistemde tüketilen sübstrat ve üretilen çamur miktarına bağlı olarak da ifade edilebilir. Sistemdeki net çamur üretimi üç bileşenden oluşmaktadır:

$$P_{XT} = P_{XH} + P_{XP} + P_{XI} \quad (9)$$

Çamur bileşenleri ayrı ayrı kütle dengesi ifadeleri ile hesaplanır. Aktif heterotrofik biyokütle için yazılan kütle dengesi ifadesinden:

$$P_{XH} = V \cdot X_H (\mu_H - b_H) \quad (10)$$

ve çamur yaşı tanımından:

$$\theta_X = \frac{VQ_w}{P_{XH}} = \frac{1}{\mu_H - b_H} \quad (11)$$

P_{XH} , (7), (10) ve (11) eşitlikleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_{XH} = \frac{Y_H}{1 + b_H \theta_X} EQC_{S1} = Y_{NH} EQC_{S1} \quad (12)$$

Burada, Y_{NH} , net dönüşüm oranı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$Y_{NH} = \frac{Y_H}{(1 + b_H \theta_X)} \quad (13)$$

Partiküler inert ürün üretimi, X_P , için yazılan kütle dengesi ifadesinde:

$$P_{XP} = f_{EX} b_H V \cdot X_H = f_{EX} b_H \theta_X \cdot P_{XH} \quad (14)$$

P_{XH} 'in değeri yerine konulduğunda (14) denklemi aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$P_{XP} = f_{EX} b_H \theta_X \cdot Y_{NH} EQC_{S1} \quad (15)$$

Sisteme giren partiküler inert KOİ ise sistemde bir değişikliğe uğramadan çamurun bir bileşeni olarak, P_{XI} , sistemden uzaklaştırılmaktadır. Bu durumda sistemde üretilen fazla çamur ile atılan P_{XI} aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır. Sisteme giren çözünmüş inert KOİ'nin (S_{II}) ise hiç bir biyokimyasal reaksiyona girmeden, aynı miktarda (QS_{II}) sistemden çıktığı kabul edilmektedir.

$$P_{XI} = QX_{II} \quad (16)$$

Giriş atıksu akımındaki toplam KOİ'nin ayrışabilir kısmı (C_{S1}), f_S fraksiyonu ile, partiküler inert kısmı da f_{XI} fraksiyonu ile tanımlanır ise, girişteki partiküler inert KOİ bileşenini (17) denklemi ile ifade etmek mümkün olduğundan:

$$X_{II} = \frac{f_{XI}}{f_S} C_{S1} \quad (17)$$

sistemde oluşan toplam çamur, P_{XT} , aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$P_{XT} = (1 + f_{EX} b_H \theta_X) \cdot Y_{NH} EQC_{S1} + \frac{f_{XI}}{f_S} QC_{S1} \quad (18)$$

Oksijen gereksinimi, net çamur üretimini (P_{XT}) gösterecek şekilde KOİ üzerinden yazılacak kütle dengesinde de aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir:

$$\boxed{OG} = EQC_{S1} - P_{XT} + P_{XI} - QS_P \quad (19)$$

(9) eşitliği (19) ifadesinde yerine konursa, sistemin oksijen gereksinimi şöyle bulunur:

$$OG = EQC_{S1} - QS_P - (P_{XH} + P_{XP}) \quad (20)$$

Sistemde oluşan çözünmüş inert ürünler için yazılan kütle dengesinde:

$$-QS_P + f_{EX} b_H \cdot VX_H = 0 \quad (21)$$

(10),(11) ve (12) denklemleri birleştirilerek oluşan çözünmüş metabolik ürün miktarı aşağıdaki ifade ile belirlenir:

$$QS_P = f_{ES} b_H \theta_X \cdot Y_{NH} EQC_{S1} \quad (22)$$

(12), (15) ve (22) eşitliklerinin değerleri (20) denkleminde yerine konur ve (5) denkleminde verilen f_E tanımı kullanılarak düzenlenir ise oksijen gereksinimi için aşağıdaki gibi bir ifade elde edilir:

$$OG = EQC_{S1} [1 - Y_{NH} (1 + f_E b_H \theta_X)] \quad (23)$$

Böylece oksijen gereksinimi, inert ürünlerin de dahil edildiği net dönüşüm oranına bağlı olarak bulunur. Denklemden görülebileceği gibi, belirli bir atıksu karakteri için oksijen gereksinimi sadece çamur yaşının bir fonksiyonudur. Atıksu karakterini belirleyen parametrelerden, Y_H ve f_E gibi stokiyometrik katsayılar ile b_H gibi bir kinetik katsayının oksijen gereksinimi hesabında etkili olduğu açıkça görülmektedir. Atıksudaki ayrışabilir KOİ konsantrasyonunun (C_{S1}) belirlenmesi de son derece önemlidir. Sistemin işletme koşullarına bağlı olarak giderim veriminin hesaplanabilmesi için de hidroliz prosesinin kinetik katsayılarının belirlenmesi gereklidir.

KOİ/UAKM Parametreleri ile Oluşturulan Modeller

Aktif çamur sistemlerinin tasarımında çoğu kez substratın [KOİ], biyokütlenin de uçucu askıda katı madde, [UAKM] cinsinden ifade edilmesi pratik kolaylık sağlamaktadır. Bu durumda, Y_H ya da Y_{NH} katsayılarının da uygun birimlerde, yani [g UAKM/g KOİ] cinsinden tanımlı olması ve kütle korunum denklemlerinde bu birimlerle kullanılması gereklidir.

Biyokütle ölçümünde UAKM parametresi kullanıldığında oksijen gereksiniminin hesaplanabilmesi için UAKM'nin oksijen eşdeğerine çevrilmesi gerekmektedir. Çevirme faktörü olarak kullanılan f_X 'in değeri aktif biyokütlenin yapısal kompozisyonunun $C_5H_7NO_2$ formülü ile tanımlanmasından hareketle teorik olarak 1.42 g KOİ/g UAKM olarak bulunabilir. Çamurun diğer bileşenleri için bu çevirme faktörü 1.42 g KOİ/g UAKM değerinden bir miktar farklı olabilir. Reaktörde ölçülen UAKM değerinin, $X_{T,UAKM}$, (8) denkleminde kullanılabilmesi için aktif biyokütle fraksiyonunun da, f_H , bilinmesi gerekir.

Aktif biyokütle fraksiyonunun, f_H , işletme koşullarına (θ_X) ve atıksu içindeki inert partiküller KOİ fraksiyonuna, f_{XI} , bağlı olarak değişeceği (12) ve (18) denklemlerinden görülmektedir:

$$f_H = \frac{P_{XH}}{P_{XT}} = \frac{f_S E Y_{NH}}{(1 + f_{EX} b_H \theta_X) f_S E Y_{NH} + f_{XI}} \quad (24)$$

Bu durumda (8) denklemini:

$$OG = (1 - f_X Y_H') \cdot EQC_{S1} + V \cdot f_H f_X (1 - f_E) b_H X_{T,UAKM} \quad (25)$$

şeklinde düzeltilmelidir. Burada:

$$Y_H' = \frac{Y_H}{f_X} [\text{g UAKM/g KOİ}] \quad (26)$$

olarak tanımlanmıştır. Benzer şekilde, UAKM/KOİ birimi ile verilen net dönüşüm

oranının da KOİ/KOİ birimine çevrilebilmesi için (23) denkleminde f_X çevirme faktörü kullanılmalıdır:

$$OG = EQC_{S1} [1 - f_X Y_{NH}' (1 + f_E b_H \theta_X)] \quad (27)$$

Bu ifadede:

$$Y_{NH}' = \frac{Y_{NH}}{f_X} = \frac{Y_H'}{(1 + b_H \theta_X)} \quad (28)$$

olarak tanımlanmıştır.

BOİ₅/UAKM Modelinin Verdiği Bağlılar

KOİ, daha önce de belirtildiği gibi, modellemede ve tasarımda kullanılacak en uygun parametredir. Buna karşın, değişik ülkelerde geçerli birçok yönetmelikte, tasarımın hala BOİ₅ kullanılarak yapılması istenmektedir. Türkiye'deki *İller Bankası Yönetmeliği*'ndeki hesaplamalarda da BOİ₅ parametresi esastır. Bu tür bir yaklaşım, İller Bankası Yönetmeliğinde olduğu gibi, geçerli stokiyometrik katsayıların ve model bileşenleri arasındaki ilişkilerin yanlış hesaplanmasına yol açmaktadır.

Zorunluluk olduğu hallerde, reaksiyon kinetiği matrisini, substrat ve biyokütle için BOİ₅ ve UAKM kullanarak kurmak mümkündür. Bu durumda birim ayrışabilir KOİ miktarına karşı gelen BOİ₅ değerini veren bir f [g BOİ₅/g ayrışabilir KOİ] katsayısının matristeki gerekli stokiyometrik ifadelerde kullanılması ve Y_h katsayısının [g UAKM/g BOİ₅] birimi ile tanımlanması gerekmektedir. Bu şekilde oluşan reaksiyon kinetiği matrisi Tablo 3'te verilmiştir.

BOİ₅/UAKM modelinde oksijen gereksinimi

Tablo 3. BOİ₅/UAKM Sisteminde Reaksiyon Kinetiği Matrisi

Bileşen j Proses	i	1 X	2 S	3 S ₀	Proses Hızı, ρ_j ML ⁻³ T ⁻¹
1 Çoğalma		1	$-\frac{1}{Y_h}$	$-\left[\frac{1 - f \cdot f_X \cdot Y_h}{f \cdot Y_h}\right]$	$\hat{\mu} \cdot \frac{S}{K_s + S} \cdot X$
2 İçsel solunum		-1	-	- f_X	$k_d X$
Parametreler, ML ⁻³		UAKM	BOİ ₅	O ₂	-

Tablo 3'te verilen reaksiyon hızları kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$OG = V \cdot \left[\frac{1 - f \cdot f_X \cdot Y_h}{f \cdot Y_h} \right] \cdot \mu X + V \cdot f_X k_d X \quad (29)$$

Bu modelde giderilen sübstrat için aşağıda verilen eşitlik yazılabilir:

$$V \cdot \frac{\mu}{Y_h} X = QS_1 \quad (30)$$

Burada, sisteme giren atıksudaki organik maddenin (S_1), KOİ cinsinden eşitliği aşağıdaki gibidir:

$$S_1 = f \cdot C_{S1} \quad (31)$$

Bu eşitlik yukarıdaki denklemde yerine konduğunda:

$$OG = \left[\frac{1}{f} - f_X Y_h \right] \cdot QS_1 + V \cdot f_X k_d X \quad (32)$$

denklemleri elde edilir. Sistemin net dönüşüm oranı, Y_{Nh} , aşağıdaki gibi tanımlanır ise:

$$Y_{Nh} = \frac{Y_{NH}}{f \cdot f_X} = \frac{Y_h}{(1 + k_d \theta_X)} \quad (33)$$

net dönüşüm oranı kullanılarak hesaplanacak oksijen gereksinimi aşağıdaki gibidir:

$$OG = \left[\frac{1}{f} - f_X Y_{Nh} \right] \cdot QS_1 \quad (34)$$

Sistemin oksijen gereksinimi günlük sübstrat giderimi ve çamur üretimi ile hesaplanır ise aşağıdaki bağıntı geçerli olur:

$$OG = Q \cdot \frac{S_1}{f} - f_X P_{XH} \quad (35)$$

İller Bankasına Göre Oksijen Gereksinimi Hesabı

İller Bankası tarafından yayınlanmış olan "Atıksu Arıtma Tesisi Proses Genel Şartnamesi"

uyarınca nüfus, kişi başına düşen su kullanımı üzerinden hesaplanması gereken atıksu debileri ve yine kişi başına düşen kirlilik yüklerine göre yapılacak hesaplar tasarlanacak tesislerin ana tasarım parametrelerini oluşturmaktadır. Fiziksel ve mekanik, biyolojik ve kimyasal arıtma prosesleri ile çamur stabilizasyonu, arıtılmış atıksuyun dezenfeksiyonu ve koku arıtımı proseslerinin çeşitli uygulama üniteleri için hazırlanmış olan teknik şartname, aktif çamur sistemlerinin havalandırma havuzları için tasarımda kullanılacak kriterleri BOİ₅/UAKM modeli doğrultusunda belirlemektedir.

Bu çalışmada, İller Bankası Şartnamesi ile belirlenen tasarım parametrelerinin doğruluğunun değerlendirilmesi amaçlandığından, bu şartname ile belirlenmiş formüller ve önerilen katsayılar, yukarıda detaylı bir şekilde tanımlanmış çok bileşenli aktif çamur modeline ait katsayılarla kıyaslanacaktır:

$$OG = a \cdot \frac{E}{100} \cdot L + k_{re} \cdot M \cdot V \quad (36)$$

Bu ifadeye;

a = organik maddenin ayrıştırılması için gerekli oksijen miktarı (0.5-0.7 kg O₂/kg BOİ₅ alınacaktır)

E = arıtma verimi (%)

L = günlük kirlilik yükü (kg BOİ₅/gün)

k_{re} = içsel solunum hızı (kg O₂/kg AKM.gün)

M = sistemde tutulan AKM konsantrasyonu (kg AKM/m³)

V = havalandırma havuzu hacmi (m³)

olarak tanımlanmıştır.

Yukarıda verilen formül çalışmanın önceki safhalarında KOİ/KOİ birimleri kullanılarak türetilmiş olan oksijen gereksinimi formülü ile karşılaştırıldığında burada yer alan ifadelerle denk düşen terimler aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$\frac{E}{100} L = E \cdot Q \cdot f \cdot C_{S1} \quad (37)$$

Sistemdeki çamur, AKM cinsinden ifade edildiğinde:

$$M = \frac{X_{T,UAKM}}{f_{AKM}} \quad (38)$$

çamurun UAKM/AKM oranı aşağıda verilen faktör ile belirlenir:

$$f_{AKM} = \frac{X_{T,UAKM}}{X_{T,AKM}} \quad (39)$$

Bu durumda, (36) denkleminde verilen a ve k_{re} katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır:

$$a = \frac{1}{f}(1 - Y_H) \quad (40)$$

$$k_{re} = f_{AKM} f_H f_X (1 - f_E) b_H \quad (41)$$

Ayrıca yönetmelikte günlük çamur yüküne, L_S , bağlı olarak k_{re} parametresinin alacağı değerler Tablo 4'te verildiği gibi özetlenmiştir.

Tipik bir evsel atıksu için Tablo 5'te verilen kinetik, stokiometrik katsayılar ve oranlar kullanılarak çok bileşenli model için hesaplanan tasarım parametreleri ile yönetmelikte verilen parametreleri karşılaştırmak mümkün olacaktır.

Çok bileşenli substrat modeli kullanılarak değişik çamur yaşları için hesaplanan aktif biyokütle fraksiyonu, f_H , ile buna karşılık gelen çamur yükü, L_S , parametrelerinin değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan formüller aşağıda verilmektedir:

$$L_S = f_{AKM} f_H f_X f \frac{\mu_H}{Y_H} = f_{AKM} f_H f_X f \frac{1}{\theta_X Y_{NH}} \quad (42)$$

Şekil 2'de verilen grafik üzerinden saptanan en uygun eğri denklemleri, aktif biyokütle fraksiyonunun çamur yaşına göre logaritmik bir azalma gösterdiğini, buna karşılık çamur yükündeki azalmanın en iyi şekilde üstel ampirik bir denklem ile ifade edilebileceği sonucunu vermiştir. Parametrelere ait eğri denklemleri ve regresyon sonuçları aşağıda verilmektedir:

$$f_H = -0.1565 \cdot \ln \theta_X + 0.7928 \quad r^2 = 0.9905$$

Tablo 4. Çamur yüküne bağlı olarak alınacak k_{re} değerleri

L_S (kg BOİ ₅ /kg AKM. gün)	k_{re} (kg O ₂ /kg AKM. gün)
0.05	0.1
0.1	0.13
0.3	0.15
0.5	0.16
1.0	0.2

Tablo 5. Tipik evsel atıksu için verilen literatür değerleri (Orhon ve Artan, 1994).

Parametre	Birim	Değer
Y_H	kg KOİ/kg KOİ	0.67
b_H	1/gün	0.24
f_{EX}	-	0.20
f_{ES}	-	0.05
f_E	-	0.25
f_{XI}	kg KOİ/kg KOİ	0.10
f_S	kg KOİ/kg KOİ	0.85
f	kg BOİ ₅ /kg KOİ	0.50
f_X	kg KOİ/kg UAKM	1.42
f_{AKM}	kg UAKM/kg AKM	0.80
E	%	80

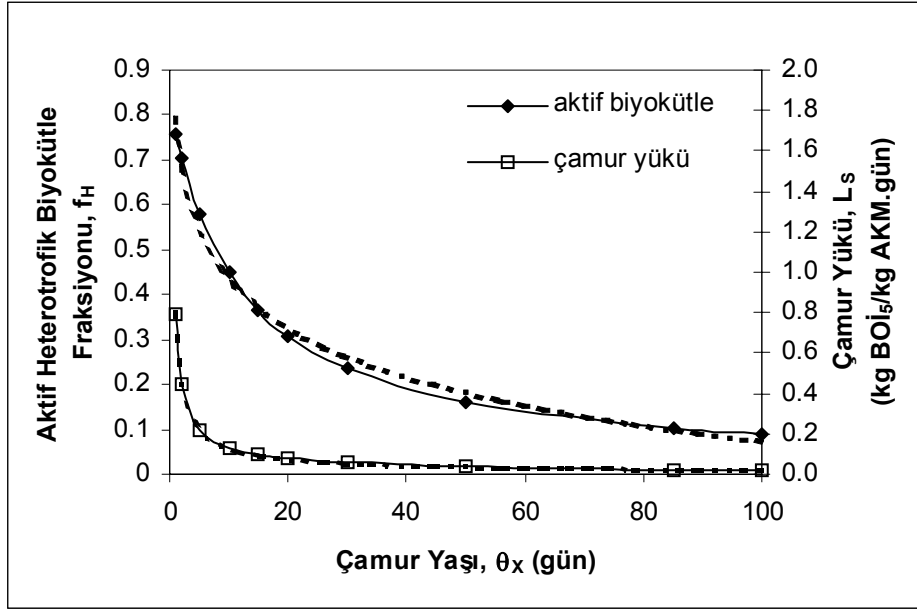
$$L_S = 0.8033x^{-0.8028} \quad r^2 = 0.9990$$

Yönetmelikte içsel solunum hızı olarak tanımlanan k_{re} parametresi yukarıda da verildiği gibi sistemdeki çamurun aktif biyokütle oranına ve dolayısıyla da çamur yaşına bağlı olarak azalmaktadır. Şekil 3'te gösterilen bu değişim çamur yaşına bağlı olarak, aktif biyokütle oranına benzer olarak logaritmik bir ampirik denklem ile 0.9905 doğrulukla belirlenebilmektedir:

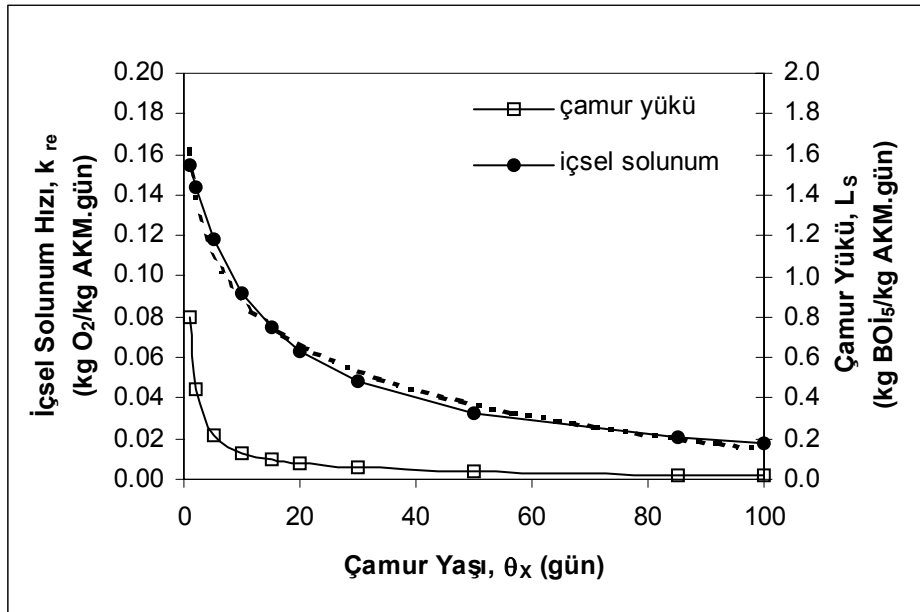
$$k_{re} = -0.032 \cdot \ln \theta_X + 0.1621$$

İller Bankası yönetmeliğinde verildiği gibi, tanımlanan içsel solunum hızını, çamur yüküne bağlı olarak göstermek açısından Şekil 4'te verilen grafik hazırlanmıştır. İçsel solunum hızı, k_{re} , artan çamur yükü ile logaritmik olarak artmaktadır. Grafik üzerinden çizilen en uygun eğrinin denklemi aşağıda verilmektedir:

$$k_{re} = 0.0398 \cdot \ln L_S + 0.1706 \quad r^2 = 0.9864$$



Şekil 2. Aktif biyokütle ve çamur yükünün çamur yaşına bağlı olarak değişimi



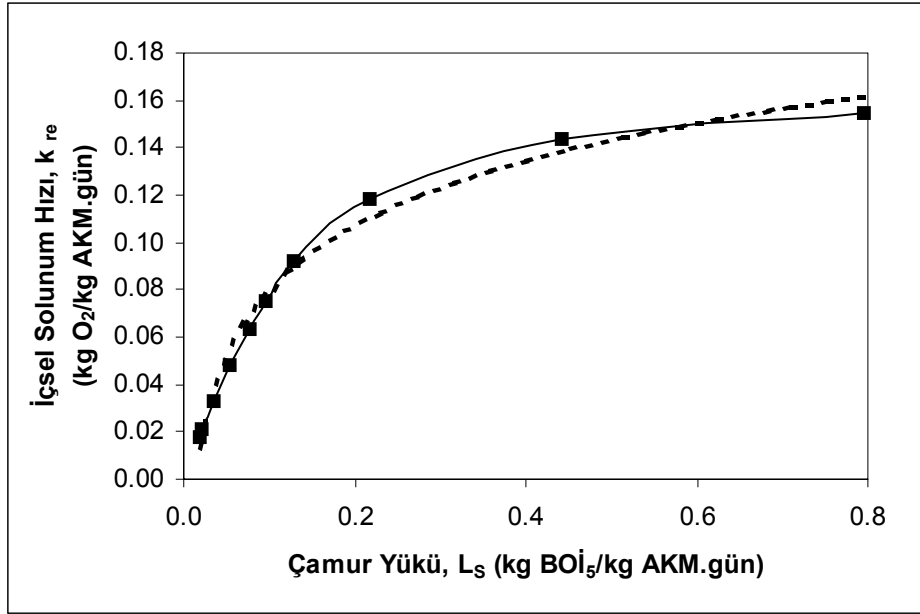
Şekil 3. İçsel solunum hızı ve çamur yükünün çamur yaşına bağlı olarak değişimi

Yukarıda verilen ampirik denklem kullanılarak yönetmelikte verilen değerler ile çok bileşenli model sonuçları Tablo 6'da ve Şekil 5'te karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

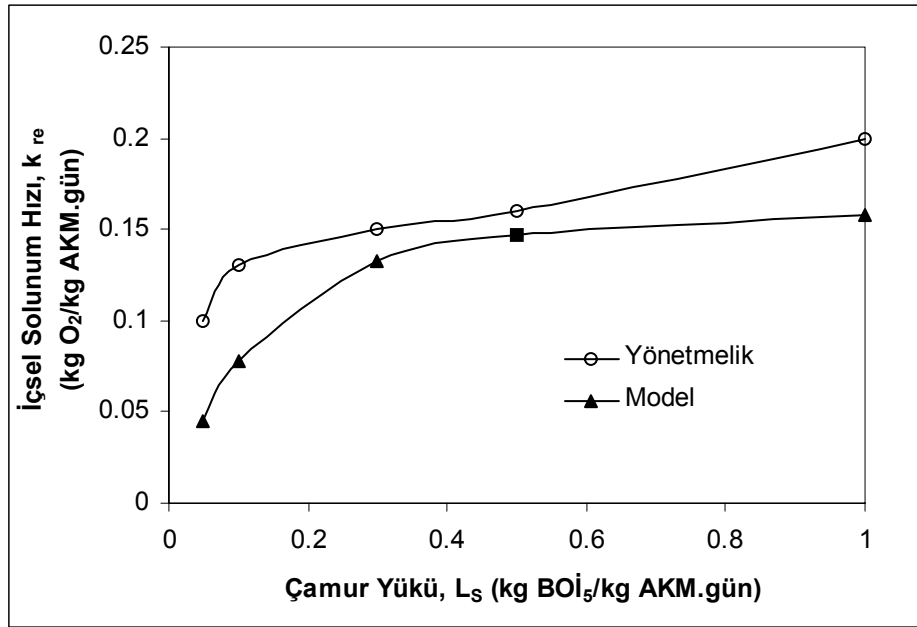
Yönetmelikte organik maddenin ayrıştırılması için gerekli oksijen miktarı olarak tanımlanan a parametresi çok bileşenli model ile yapılan hesaplar sonucu yukarıda verilen atıksu ve sistem spesifikasyonları için 0.66 kg O₂/kg BOI₅ olarak

belirlenmiştir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi yönetmelikte verilen oksijen gereksinimi ifadesinin ikinci kısmında kullanılan k_{re} katsayısı çok bileşenli modelleme ile hesaplanan değerlerin üzerindedir. Bu durum çamur yaşına göre irdelendiğinde, Şekil 6'da verilen grafikten anlaşıldığı gibi, yüksek çamur yaşlarında, ya da başka bir deyişle yavaş çalışan sistemlerde iki farklı şekilde hesaplanan oksijen gereksinimi oldukça farklı olmaktadır.



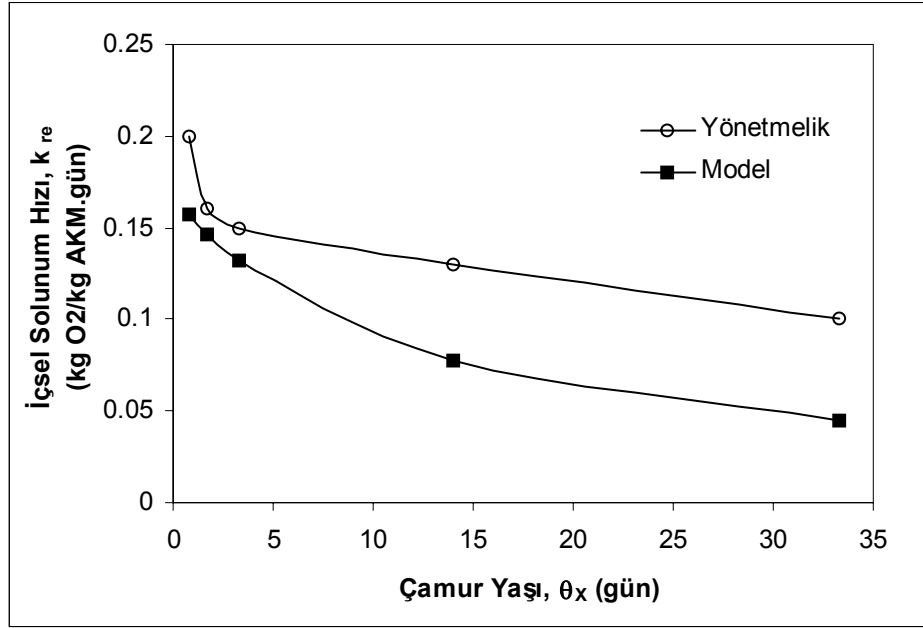
Şekil 4. İçsel solunum hızının çamur yüküne bağlı olarak değişimi



Şekil 5. Çamur yüküne bağlı k_{re} değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Tablo 6. Çamur yüküne bağlı k_{re} değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi

İller Bankası Şartname Değerleri		Çok Bileşenli Model Değerleri	
L_s (kg BOI_5 /kg AKM.gün)	k_{re} (kg O_2 /kg AKM.gün)	θ_x (gün)	k_{re} (kg O_2 /kg AKM.gün)
0.05	0.1	33.33	0.051
0.1	0.13	14.00	0.079
0.3	0.15	3.25	0.123
0.5	0.16	1.72	0.143
1.0	0.2	0.77	0.171



Şekil 6. k_{re} değerlerinin çamur yaşına göre karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Sonuçlar

Oksijen gereksinimi aktif çamur sistemlerinde hem yatırım hem de işletme ihtiyaçları açısından büyük önem taşıyan bir tasarım parametresidir. Pratik olarak sistemin istenen verimde çalıştırılabilmesi ve ekonomik açıdan optimizasyonunun sağlanabilmesi için, bu parametrenin doğru bir yaklaşımla hesaplanması zorunludur. Günümüzde aktif çamur sistemlerinin işletilmesinde elde edilen kuramsal bilgiler ve ortaya konan kavramsal yaklaşımlarla, aktif çamur prosesinin biyokimyasal temellerini ve bu çerçevede oksijen gereksinimini, matematiksel olarak belirlemek mümkün olmaktadır. Bu çalışma kapsamında, oksijen tüketiminin hesaplanmasında kullanılan değişik modellere göre türetilmiş ifadeler ve bu yaklaşımla literatürde verilen benzer tanımların geçerliliği değerlendirilmiştir.

Güncel modelleme yaklaşımları itibariyle oksijen gereksiniminin, sistemin en önemli işletme parametrelerinden biri olan çamur yaşına ve çamur yaşının bir fonksiyonu olarak hesaplanan net dönüşüm oranına bağlı olarak ifade edilmesi gerektiği bu çalışma ile açıkça ortaya konmaktadır. Ancak Türkiye’de uygulandığı biçimiyle olduğu gibi, çok bileşenli modelleme kavramlarının yeterince ifade edilemediği dönemlerde oluşturulmuş ampirik ifadeler kullanılarak yapı-

lan sitem tasarımları ve oksijen gereksinimi hesaplamaları da mevcuttur. İller Bankası örneğinde de görüldüğü üzere, kullanılan bu tür ampirik yaklaşımlar, çoğu kez doğru tanımlanması ve saptanması gereken, havalandırma havuzu AKM konsantrasyonu ya da atıksuyun BOI_5 içeriği gibi, sistem girdilerine ihtiyaç duymaktadır. Bu tür ifadeler sistem tasarımında önemli zorluklar yaratmakta ve tasarım parametrelerinin bilimsel esaslardan uzak bir yaklaşımla seçilmesine yol açmaktadır.

Bu çalışmada da belirlendiği gibi, Türkiye özelindeki İller Bankası Şartnamesi uyarınca yapılan oksijen gereksinimi hesaplamalarının bilimsel modelleme yaklaşımları ile yapılan hesaplardan çok farklı olduğu görülmektedir. Sistem tasarımında, parametre seçimlerinde yapılacak hataları en aza indirebilmek için bu hesaplamalarda fazla emniyetli katsayıların kullanılması önerilmektedir. Bu durum ise sonuç olarak, arıtma verimi ve maliyetleri açısından optimize edilmemiş sistem tasarımlarına yol açmaktadır. Bu kapsamda tesis tasarımına esas oluşturacak şekilde hazırlanan yönetmeliklerin bilimsel ve teknolojik gelişmelere paralel olarak güncellenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

- ATV. (1991). Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnerwerten. Arbeitsblatt A 131.
- Chudoba, J., Nemec, M. ve Nemcova, R. (1968). Residual organic matter in activated sludge process effluents-II. Degradation of saccharides and fatty acids under continuous conditions. *Technol. Wat.*, 13, 27.
- Eckenfelder, W. W., Jr. ve Grau, P. (1992). *Activated Sudge Process Design and Control: Theory and Practice*. Lancaster, PA: Technomic Publishing Co. Inc.
- Eckhoff, D. ve Jenkins, D., (1967). Activated sludge system kinetics of the steady and transient states. SERL Report No.67-2. University of California, Berkeley.
- Gujer, W., Henze, M., Mino, T. ve van Loosdrecht, M. (2000). Activated Sludge Model No.3. In: *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3*, Henze, M., Gujer, W., Mino, T., van Loosdrecht, M., (eds.) IWA Scientific and Technical Report No.9. IWA London. ISBN: 1 900222 24 8.
- Henze, M., Grady, C. P. L. Jr., Gujer, W., Marais, G. v. R. ve Matsuo, T. (1987). Activated Sludge Model No.1. IAWPRC Scientific and Technical Report No.1, IAWPRC, London.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Matsuo, T., Wentzel, M. C. ve Marais, G. v. R., (1995). Activated Sludge Model No.2. IAWPRC Scientific and Technical Report No.2, IAWQ, London.
- McCarty, P. L., (1971). Energetics and microbial growth. *Water Pollution Microbiology*, 1, R. Mitchell, ed., New York, NY:Marcel Dekker, Inc., 495-533.
- Orhon D. ve Artan, N., (1994). Modelling of Activated Sludge Systems, Technologic Publ. Co., Lancaster, USA.
- Washington, D. R. ve Hetling, L. J., (1965). Volatile sludge accumulation in activated sludge plants. *J. Wat. Poll. Cont. Fed.*, 37, 499.