

# Geleneksel ve çok bileşenli modelleme yöntemlerindeki içsel solunum katsayısının çamur üretimine etkisinin karşılaştırılması

Didem OKUTMAN TAŞ, Emel TOPUZ, Betül GENÇEL, Derin ORHON\*

İTÜ İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

*Aktif çamur sistemlerinin modellenmesinde günümüzde kullanılan yöntemler geleneksel aktif çamur modellenmesi ve çok bileşenli aktif çamur modellemesi şeklinde sınıflandırılabilir. Geleneksel aktif çamur modellenmesi, çözülmüş oksijene ilaveten, karbon yapıdaki besi maddesi ve biyokütle olmak üzere sadece iki ana bileşenden oluşmaktadır ve biyokütlenin içsel solunum katsayısına ( $k_d$ ) bağlı olarak azalması toplam uçucu askıda katı madde üzerinden verilmektedir. Aktif çamur modellenmesinde, sistemde oluşacak çamurun giriş atıksu karakterizasyonuna önemli ölçüde bağlı olduğu ve bu nedenle de modelleme kapsamında sadece iki parametreden ziyade çok bileşenli aktif çamur modellenmesinin gerekliliği yapılan birçok çalışma sonucunda ortaya konulmuştur. Çok bileşenli aktif çamur modellemesinde, geleneksel sistemden farklı olarak, biyokütle heterotrofik biyokütle olarak tanımlanmakta ve biyokütlerdeki azalma içsel solunum katsayısına ( $b_H$ ) bağlı olarak ifade edilmektedir. Bu çalışma kapsamında, geleneksel aktif çamur modellenmesi ile çok bileşenli modelleme yaklaşımı detaylı bir şekilde incelenip, partiküler bileşenlerin oluşum ve davranışına etki eden unsurlar ele alınmış ve bu bağlamda aktif çamur sistemlerinde oluşan fazla çamur miktarlarının hesabında her iki modelleme yaklaşımı ile elde edilebilecek veriler değerlendirilmiştir. Geleneksel aktif çamur modellenmesinde, sistemde oluşan bütün çamur için bir içsel solunum katsayısı verilmekte ve buna bağlı olarak çamur azalması hesaplanmaktadır. Buna karşılık çok bileşenli aktif çamur modellenmesinde ise çamurun bileşenleri tanımlanabilmekte ve içsel solunum katsayısı sadece heterotrofik biyokütle için tanımlanabilmektedir. Bu nedenle geleneksel metodla elde edilen çamur üretim miktarı çok bileşenli aktif çamur modellenmesinden elde edilen çamur miktarından daha az olarak hesaplanmaktadır. Bu bağlamda eğer geleneksel aktif çamur modellemesi kullanılarak çamur hesabı yapılacak ise, içsel solunum katsayısı ( $k_d$ ) sabit alınmayıp aktif biyokütleyle bağlı bir değişken olarak ele alınmalıdır.*

**Anahtar Kelimeler:** Aktif çamur,  $b_H$ , çamur oluşumu, içsel solunum katsayısı,  $k_d$ , modelleme.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Derin ORHON. orhon@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 37 93.

Teknik not metni 14.04.2010 tarihinde dergiye ulaşmış, 01.09.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Teknik not ile ilgili tartışmalar 28.02.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Comparison of the effect of endogenous decay rates for the conventional and multi-component modelling approaches on the sludge production

### Extended Abstract

Activated sludge systems rely on the removal of pollutants from wastewater through a series of biochemical reactions. The pollutants removed during biochemical reactions constitute mainly the biodegradable portion of the wastewater. During the design the activated sludge systems two significant parameters that should be considered are oxygen consumption and the excess sludge production in the system. In order to define these parameters accurately the particulate matter and the effect of the endogenous respiration process on these particular matter should be defined clearly. In order to design and operate an activated sludge system under steady state conditions it is important to characterize accurately the endogenous decay kinetics in addition to the growth kinetics of the biomass. Activated sludge systems can be modeled using two approaches namely traditional design approach and multi-component design approach.

Traditional modeling approach mainly focus on the carbon removal. In this concept, the reaction kinetics were evaluated by means of two component system as substrate parameter that reflect all biodegradable organic compounds measured as Biological Oxygen Demand ( $BOD_5$ ) or Chemical Oxygen Demand (COD), and overall biomass parameter,  $X$  in addition to the oxygen parameter. In traditional modelling approach overall decrease in biomass concentration is traditionally defined by means of a first-order rate expression with respect to biomass concentration where,  $k_d$  is the endogenous decay coefficient. Endogenous metabolism can be defined as the sum of all biochemical activities of microorganisms in the absence of utilizable extracellular compounds likely to serve as sources of energy and biosynthesis. In the expression of the microbial decay, biomass is defined in terms of the volatile suspended solids (VSS). It should be pointed out that in traditional modeling approach accurate description of the microbial decay process as well as the excess sludge production is restricted with the limitations of VSS parameter.

Assessment of the amount of biodegradable substrate is one of the main concerns for wastewater treatment. Appropriate wastewater characterization

with respect to organic carbon is a key issue in order to design and model an activated sludge system. Identification of different COD fractions with different biodegradation characteristics is one of the major milestone in the understanding of biological treatment of wastewaters. In multi-component modelling approach a detailed differentiation of soluble and particulate components, the endogenous decay process is introduced together with the concept of viability. This approach also differentiates active biomass from other particulate biomass components. In this approach, the components of the excess sludge can be classified as heterotrophic active biomass,  $X_H$ , slowly biodegradable particulate COD,  $X_S$ , particulate inert COD,  $X_I$  and particulate metabolic products,  $X_P$ . In activated sludge systems, the chosen hydraulic retention time is usually enough for the removal of the slowly biodegradable particulate COD,  $X_S$ . Therefore, it is not necessary to take into account this parameter during the excess sludge calculations. The microbial decay accounts for the fate of active heterotrophic biomass fraction of the activated sludge and becomes directly related to the endogenous respiration. This way, in multi-component modelling approach the endogenous decay coefficient,  $b_H$  is defined as a function of the active heterotrophic biomass concentration,  $X_H$  in the reactor in a first-order rate expression.

In the traditional modelling approach the amount of the sludge decrease as a result of endogenous respiration can be calculated with an endogenous decay constant for all the sludge generated in the system. However, in the multi-component approach all of the constituents of the excess sludge can be defined separately and the endogenous decay coefficient can be attributed for only heterotrophic active biomass. In activated sludge systems, the amount of the excess sludge generation calculated with traditional modelling approach can be significantly different than the one calculated using multi-component modelling approach. If the sludge production calculated using multi-component modeling approach was used to calculate  $k_d$  values in the traditional modeling approach, new  $k_d$  values would be definitely lower than the constant  $k_d$  value used in traditional modeling approach. Thus, it can be concluded that  $k_d$  used in traditional modelling approach is not a constant value and varies as a function of the active fraction of the biomass.

**Keywords:** Activated sludge,  $b_H$ , excess sludge, endogenous decay coefficient,  $k_d$ , modeling.

## **Giriş**

Aktif çamur sistemlerinde temel yaklaşım, diğer biyolojik arıtma sistemlerinde de olduğu gibi atıksulardaki kirletici bileşenleri biyokimyasal reaksiyonlar ile uzaklaştırmaktır. Atıksudan biyolojik arıtma ile uzaklaştırılabilen bu bileşenler atıksuyun bünyesindeki biyolojik olarak ayrışabilen bileşenlerdir. Biyolojik sistemlerde, atıksulardan kaynaklanan bu kirleticilerin giderimi anabolik ve katabolik olmak üzere iki ana proses ile gerçekleşmektedir. Anabolik reaksiyonlar kapsamında, atıksudaki kirleticiler aktif çamur sistemlerindeki mikroorganizmaların bünyesine alınmakta ve hücre ana bileşenleri üretilmektedir. Katabolik reaksiyonlarda ise atıksuda bulunan biyolojik olarak parçalanabilen özellikteki kirleticiler yapı taşlarına ayrıştırılmakta ve bunların ayrışması esnasında ortaya çıkan enerji de mikroorganizmalar tarafından kullanılmaktadır. Katabolizma reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan yapıtaşları ise yine anabolik reaksiyonlar esnasında hücre sentezinde kullanılmaktadır. Bu döngüler kapsamında, ortamda mikroorganizma tarafından enerji ve biyosentez reaksiyonlarında kullanılacak organik karbonun bulunmadığı durumlarda ise, yine birçok biyokimyasal aktivitenin gerçekleştirildiği içsel solunum safhası gerçekleşmektedir. Aktif çamur sistemlerinde, reaktör tasarımı ve işletimi kapsamında, sistemde oluşacak olan biyokütlenin fazla çamur olarak atılması ve dolayısıyla sistemin kararlı denge ortamında işletilebilmesi için biyokütlenin çoğalma kinetiğinin yanında içsel solunum kinetiğinin de doğru değerlendirilip hesaplanması gerekmektedir.

Aktif çamur sistemlerinin tasarlanmasında özellikle üzerinde durulan en önemli iki parametre; sistemdeki oksijen tüketimi ve fazla çamur oluşumu şeklinde özetlenebilmektedir. Burada önemli olan fazla çamur oluşumuna esas oluşturan partiküler yapıdaki bileşenlerin ve içsel solunumun da bu partiküler bileşenlere etki mekanizmasının doğru bir şekilde tanımlanmasıdır. Geleneksel aktif çamur modellenmesinde fazla çamur oluşumunda tanımlanan partiküler yapıdaki bileşenler biyokütle (X) şeklinde tek bir parametre olarak kullanılmıştır ve bu bileşenin artması ve azalmasına bağlı olarak ifadeler ta-

nımlanmıştır. Buna kıyasla, çok bileşenli yeni modelleme yaklaşımlarında ise fazla çamuru oluşturan partiküler yapıdaki bileşenler farklı özelliklerine göre ayrılıp, bunların herbiri için gerekli tanımlamalar yapılmıştır. Bu kapsamda da uygulama açısından son derece önemli veriler oluşturulabilmiştir. Aktif çamur sistemlerindeki partiküler bileşenlerin tanımlanmasında, aynı yapıdaki bileşenlerin farklı şekillerde ifade edilmesi sonucunda elde edilecek olan veriler çok farklı olabilmektedir. Bu çalışmanın amacı, geleneksel aktif çamur modellenmesi ile yeni modelleme yaklaşımını detaylı bir şekilde inceleyip, partiküler bileşenlerin oluşum ve davranışına etki eden unsurların yeniden değerlendirilmesi ve bu bağlamda aktif çamur sistemlerinde oluşan fazla çamur miktarlarının hesabında karşılaşılabilecek hataların belirlenmesi ve engellenmesidir.

## **Geleneksel aktif çamur modellenmesi**

Geleneksel aktif çamur modellenmesinde organik karbonun gideriminde iki temel proses ele alınmıştır. Bu proseslerden ilki mikroorganizmaların anabolik reaksiyonlar neticesinde çoğalma prosesi, ikincisi ise içsel solunum prosesidir. İçsel metabolizma, hücrenin hazırda kullanılabileceği şekilde biyolojik ayrışabilir nitelikteki organik karbonun bulunmadığı durumlarda, hücre tarafından gerçekleştirilen bütün biyokimyasal aktivitelere verilen isimdir. İçsel solunum prosesinin varlığı Porges ve diğerleri (1953) tarafından, besi maddesinin olmadığı durumlarda bile aerobik çamurlarda oksijen tüketiminin gerçekleştiğinin ispat edilmesi sonucunda ortaya konmuştur. İçsel solunum prosesi geleneksel sistemlerde hücrenin ölümü ve kütle anlamında azalması olarak tanımlanmaktadır. Hücresel ölümü tanımlamada kullanılan en basit yöntem, hücrenin yeterli besinin bulunmadığı durumlarda, gerekli besini sağlamak amacıyla içsel biyokütleyi parçalaması ve hücrenin kendi bakımı için gerekli enerjinin eldesidir. Geleneksel aktif çamur modellenmesinde, ölüm prosesi tanımlamada kullanılan uçucu askıda katı maddede (UAKM) parametresindeki azalma aslında bu parametrenin ölçümü ile elde edilen kısıtlı veriden ileri gelmektedir.

Aktif çamur sistemlerinde artan çamur yaşı ile toplam çamur üretiminde de önemli bir miktarda düşüş görülmektedir. Bu düşüş genelde sistemde içsel solunumun gerçekleştiğinin bir göstergesi olarak ele alınmaktadır. Aktif çamur sistemlerinin modellenmesinde de, hücre parçalanması (veya ölümü) önemli bir bileşeni oluşturmaktadır. Hücre parçalanması sonucunda partiküler yapıdaki besi maddeleri hidroliz mekanizması ile hücreler tarafından tekrar kullanılabilir çözülmüş yapıdaki besi maddelerine dönüşebilmektedir. Aktif çamur sistemlerinde özellikle uzun çamur yaşlarında gözlenen toplam askıda katı maddedeki azalma sadece içsel solunumdan değil buna ilaveten hücresel parçalanma, bakım enerjisi gereksinimi için kullanım, protozoa gibi daha yüksek yapıdaki canlı gurupları tarafından tüketim proseslerinden de kaynaklanabilmektedir. Bu bağlamda da içsel solunum prosesi neticesinde, aktif çamur sisteminde önemli bir miktarda ilave oksijen gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Aktif çamur sistemindeki mikroorganizmalar besi maddesinin yeterli miktarda olduğu zamanlarda hücre içinde besi maddesini depolayabilmekte ve besi maddesinin mevcut olmadığı zamanlarda da bu depolanan besi maddelerini kullanabilmektedirler.

Geleneksel aktif çamur modellenmesi, çözülmüş oksijene ilaveten, karbon yapıdaki besi maddesi ve biyokütle olmak üzere sadece iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bu yaklaşım kapsamında, atıksudaki besi maddesi bileşenlerine ayrılmadan toplam biyolojik ayrışabilir KOİ olarak tanımlanmaktadır. Biyokütle (X) ise UAKM cinsinden tanımlanmakta ve bu parametrenin ölçümü sonucunda elde edilen bütün bileşenleri içermektedir. UAKM ölçümü ile sadece aktif biyokütle ölçülmemekte, bunun yanında aktif çamur sisteminde reaktör içinde biriken partiküler yapıdaki organik inert madde, biyolojik olarak ayrışamayan mikrobiyal ürünler ve biyokütle içinde depolanan veya biyolojik ayrışma sonunda reaktörde giderilemeyen partiküler yapıdaki organik maddeler de ölçülmektedir. Bu nedenle de bu parametre ile tanımlanan toplam biyokütle ölçümü, aslında içsel solunumdan sorumlu olan partiküler yapıdaki aktif biyokütleyi doğru olarak temsil edememektedir.

Buna ilaveten, geleneksel sistemde tanımlanan büyüme ve içsel solunum prosesleri, gerçekte varolan proses bileşenleri arasındaki kompleks ilişkileri ve dönüşümleri tanımlamada tam ve doğru bir yaklaşım getirememektedir. Geleneksel aktif çamur modellenmesinde biyokütlenin içsel solunum katsayısına bağlı olarak azalması aşağıdaki birinci dereceden bağımtıda verilmiştir.

$$\frac{dX}{dt} = -k_d X \quad (1)$$

Burada,  
 $k_d$ , içsel solunum katsayısı [ $\text{gün}^{-1}$ ]  
X, toplam biyokütle [ $\text{mg UAKM/L}$ ]  
olarak tanımlanmıştır.

### Çok bileşenli aktif çamur modellenmesi

Son yıllarda yapılan çalışmalar kapsamında gerek atıksu karakterizasyonu, gerek aktif çamur proseslerinin daha iyi açıklanması ve gerekse aktif çamur sistemlerinde çamur oluşumlarının iyi bir şekilde değerlendirilip hesaplanması için, iki bileşenden oluşan geleneksel aktif çamur modellenmesinden, çok bileşenli aktif çamur modellenmesine geçilmesi uygun bulunmuştur. Yapılan birçok araştırma kapsamında aktif çamur modellenmesinde çıkış suyu kalitesinin ve sistemde oluşacak çamurun giriş atıksu karakterizasyonuna önemli ölçüde bağlı olduğu ve bu nedenle de modelleme kapsamında sadece iki parametreden ziyade çok bileşenli aktif çamur modellenmesinin gerekliliği bir çok kere ortaya konulmuştur (Orhon vd., 2008).

### KOİ bileşenleri

Çok bileşenli aktif çamur modellenmesinde, atıksulardaki besi maddeleri KOİ cinsinden bileşenlerine ayrılmış şekilde tanımlanmaktadır. Bu anlamda toplam giriş atıksu KOİ'si biyolojik olarak ayrışabilen KOİ,  $C_{S1}$  ve inert KOİ,  $C_{I1}$  olmak üzere ikiye ayrılabilir. İnert KOİ ise kendi içinde, çözülmüş,  $S_{I1}$  ve partiküler inert,  $X_{I1}$  olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çözülmüş inert KOİ, reaktördeki biyokimyasal reaksiyonlara girmeden sistemden çıkarken, partiküler inert KOİ aktif çamur bünyesine alınır ve birikime uğrar ve fazla çamur olarak sistemden atılır. Biyolojik olarak ayrışabilen KOİ,  $C_{S1}$  ise

kendi içinde kolay ayrışabilen KOİ,  $S_{S1}$  ve yavaş ayrışabilen KOİ,  $X_{S1}$  olarak tanımlanmıştır (Dold ve Marais, 1986). Önerilen bu yaklaşımda partiküler olarak tanımlanmış olan biyolojik olarak yavaş ayrışabilen kısım da yine kendi içinde, partikül boyutuna bağlı olarak çözünmüş yapıdan ( $S_{H1}$ ) büyük partiküler organik yapıya ( $X_{S1}$ ) kadar değişen bileşenlerden oluşmuştur. Bu bileşenlerde temel özellik hidroliz hızlarının farklı olmasıdır. Buna ilaveten aktif çamur sistemlerinin tasarımında, sistem çıkış konsantrasyonlarının ve çamur oluşumunun hesabında da göz önüne alınması gereken bir diğer bileşen de, biyolojik arıtma esnasında biyokütle tarafından sistemde üretilen çözünmüş yapıdaki,  $S_{P1}$  ve partiküler yapıdaki,  $X_{P1}$  metabolik ürünlerdir.

### Biyokütle bileşenleri

Fazla çamur olarak sistemden atılacak olan çamur akımındaki bileşenler, aktif biyokütle,  $X_H$  başta olmak üzere, eğer biyolojik giderimi için gerekli olan hidrolik bekleme süresi sağlanmaz ise, yavaş ayrışan partiküler KOİ,  $X_S$ , partiküler inert KOİ,  $X_I$  ve partiküler inert metabolik ürünler,  $X_P$  şeklinde dört ana bileşenden oluşmaktadır. Aktif çamur modellenmesinde, genelde seçilen hidrolik bekleme süresi ile  $X_S$ 'in sistemde giderimi için gereken yeterli zaman sağlanmalıdır. Bu nedenle de aktif çamur sistemlerinde bu parametrenin tamamıyla giderimi beklendiğinden fazla çamur bileşenleri açısından bakıldığında bu parametrenin önemli bir rolünün olmadığı düşünülebilmektedir. Fakat bu parametrenin tam olarak gideriminin sağlanamadığı sistemlerde bu parametrenin de çamur oluşumunda önemli bir bileşeni oluşturacağı gerçeği unutulmamalıdır.

### İçsel solunum katsayısı

Çok bileşenli aktif çamur modellemesinde, geleneksel sistemden farklı olarak, biyokütle heterotrofik biyokütle olarak tanımlanmakta ve içsel solunum katsayısına bağlı olarak azalması aşağıdaki birinci dereceden bağıntıyla hesaplanmaktadır.

$$\frac{dX_H}{dt} = -b_H X_H \quad (2)$$

Burada,  
 $b_H$ , içsel solunum katsayısı [ $\text{gün}^{-1}$ ]

$X_H$ , toplam heterotrofik biyokütle [ $\text{mg hücre KOİ/L}$ ] olarak verilmiştir.

Bu bağlantıdan da görüldüğü üzere, biyokütle azalması, doğrudan içsel solunuma bağlı olarak, aktif biyokütle miktarındaki azalma olarak tanımlanmaktadır (Marais ve Ekama, 1976; Warner vd., 1986).

Geleneksel ve çok bileşenli sistemler için tanımlanmış olan içsel solunum katsayıları,  $k_d$  ve  $b_H$  arasındaki ilişki aşağıda verilen denklemle gösterilebilir. Fakat verilen bu denklemde içsel solunum mekanizmaları arasındaki fark sadece biyokütle üzerinden değerlendirilmiştir. Buna ilave olarak bu denklem kapsamında ele alınmamış olan fakat partiküler yapıdaki diğer bileşenleri de etkileyebilecek faktörlerin de bulunduğu ve gözardı edilmemesi gerekliliği vurgulanmalıdır. Biyokütle miktarında meydana gelen azalma genelde partiküler yapıda organik ürün oluşumu ( $X_P$ ) ile ilişkilendirilmiştir. Bu bağlamda, partiküler yapıda metabolik ürün oluşumu aşağıdaki denklem ile verilebilir;

$$\frac{dX_P}{dt} = -f_{EX} b_H X_H \quad (3)$$

Burada,  $f_{EX}$  biyokütle ölümü sonucunda ortaya çıkan partiküler yapıdaki inert KOİ'nin fraksiyonudur. Bu oran atıksuyun yapısına bağlı olarak değişebileceği için her atıksu için deneysel olarak belirlenmesi gerekir. Evsel atıksular için literatürde bu oran 0.2 olarak belirlenmiştir (Orhon vd., 2008).

Bir sistemdeki toplam biyokütlerdeki azalma, aktif biyokütlenin içsel solunum nedeniyle azalması ve partiküler yapıdaki inert metabolik ürünlerin oluşum hızının toplamına eşittir.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{dX_H}{dt} + \frac{dX_P}{dt} \quad (4)$$

Partiküler yapıdaki metabolik ürünlerin oluşumu aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir;

$$\frac{dX_P}{dt} = -f_{EX} \frac{dX_H}{dt} \quad (5)$$

Bunun sonucunda;

$$\frac{dX}{dt} = (1 - f_{EX}) \frac{dX_H}{dt} \quad (6)$$

ve

$$-k_d X = (1 - f_{EX})(-b_H X_H) \quad (7)$$

$$k_d = (1 - f_{EX}) \frac{X_H}{X} b_H \quad (8)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Bu bağıntıdan da görüldüğü üzere,  $k_d$  değeri sabit bir değer değildir ve aktif biyokütlenin toplam biyokütleyle oranına bağlı olarak değişmektedir. Bu bağıntıda sistemde çamur oluşumunda etkili olacak, partiküler inert KOİ, partiküler yapıdaki inert KOİ,  $X_I$  ve aktif çamur sisteminin bekletme süresine bağlı olarak sistemde birikebilecek yavaş ayrıışan partiküler KOİ,  $X_S$  bileşenleri hesaba katılmamıştır. Bu bileşenlerin önemli miktarlarda olduğu durumlarda, bunların da çamur oluşumlarında hesaba katılması gerekliliği vurgulanmalıdır.

## Genel kavramlar

### Dönüşüm oranı

Dönüşüm oranı kavramı aktif çamur sistemlerinde oluşan biyokütle ile çoğalma prosesinde kullanılan besi maddesi arasındaki sayısal dengeyi yansıtan önemli kavramlardan biridir.

Gerçek dönüşüm oranı ( $Y$ ), birim besi maddesi kullanımı başına sistemde üretilen biyokütle miktarı olarak tanımlanmıştır. Gerçek dönüşüm oranı çamur yaşına bağlı olarak değişmez ve sabit bir değere sahiptir. Aktif çamur sistemlerinde hiçbir zaman gerçek dönüşüm oranı ile belirlenen miktarda biyokütle oluşumu gözlenmemektedir. Gözlenen dönüşüm oranı, içsel solunumun çoğalmaya olan etkisi sonucunda azalmaktadır ve net dönüşüm oranı ( $Y_N$ ) olarak adlandırılmaktadır. Bu oran sabit bir oran olmayıp, çamur yaşına bağlı olarak ters orantılı şekilde değişen önemli bir tasarım parametresidir. Aktif çamur sistemlerindeki heterotrofik mikroorganizmaların çoğalması için, gerçek dönüşüm oranı ve net dönüşüm oranı kavramları  $Y_H$  ve  $Y_{NH}$  şeklinde tanımlanmıştır.

Geleneksel modelleme yaklaşımı çerçevesinde, heterotrofik net dönüşüm oranının çamur yaşına ve içsel solunum hızına bağlı olarak değişimi aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir.

$$Y_{NH} = \frac{Y_H}{1 + k_d \theta_X} \quad (9)$$

Aktif çamur sistemlerinde oluşan çamur miktarı ( $P_{XT}$ ) net dönüşüm oranının bir fonksiyonudur,

$$P_{XT} = f(Y_{NH}) \quad (10)$$

Sistemde oluşacak olan çamur miktarı ( $P_{XT}$ ) aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir [kg UAKM/gün].

$$P_{XT} = Q Y_{NH} C_S \quad (11)$$

Burada  $Q$ , aktif çamur sistemine gelen atıksuyun debisidir [ $m^3/gün$ ]. Oluşan çamur miktarı UAKM cinsinden ifade edilmekte olup AKM birimine çevirmek için deneysel olarak belirlenmiş katsayılar ile çarpılarak dönüşüm yapılabilmektedir. Bu oran literatürde evsel atıksular için 0.6-0.9 [UAKM/AKM] aralığında tanımlanmıştır (Okutman Taş vd., 2009). Bu oran söz konusu atıksu için ayrıca deneysel olarak da belirlenmelidir.

Benzer şekilde sistemde oluşacak çamur miktarı birim debi başına oluşacak olan çamur miktarı ( $p_{XT}$ ) olarak da aşağıdaki eşitlik ile verilebilir [kg UAKM/L].

$$P_{XT} = \frac{P_{XT}}{Q} = Y_{NH} C_S \quad (12)$$

Bu eşitlik kullanılarak biyolojik olarak ayrışabilen birim atıksu debisi başına oluşacak çamur miktarının net dönüşüm oranına eşit olduğu ifadesi çıkarılabilmektedir.

$$\frac{P_{XT}}{C_S} = \frac{P_{XT}}{Q C_S} = Y_{NH} = \frac{Y_H}{1 + k_d \theta_X} \quad (13)$$

fik net dönüşüm oranı;

$$Y_{NH} = \frac{Y_H}{1 + b_H \theta_X} \quad (14)$$

şeklinde belirlenebilmektedir.

Çok bileşenli model yaklaşımında, sistemde oluşacak toplam çamur miktarı ( $P_{XT}$ ), sistemde yavaş ayrışan partiküler bileşenlerin ( $X_S$ ) giderimine uygun hidrolik bekletme süresi olduğu kabulü ile aşağıdaki eşitlikler yardımıyla belirlenebilmektedir.

$$P_{XT} = P_{XH} + P_{XP} + P_{XI} \quad (15)$$

Burada, heterotrofik biyokütleden oluşacak çamur miktarı,  $P_{XH}$  sistemdeki biyokütle konsantrasyonunun ( $X_H=Y_{NH} \cdot C_S$ ) [kg hücre KOİ/gün] atıksu debisi ile çarpılması sonucunda belirlenebilmektedir.

$$P_{XH} = Q \cdot Y_{NH} \cdot C_S \quad (16)$$

Aktif çamur sisteminde atıksu arıtımı esnasında oluşacak partiküler yapıda inert metabolik ürünlerden kaynaklanacak çamur miktarı;

$$P_{XP} = Q \cdot Y_{NH} \cdot C_S \cdot f_{EX} \cdot b_H \cdot \theta_X \quad (17)$$

Toplam heterotrofik biyokütleden oluşacak çamur miktarı ve partiküler yapıda inert metabolik ürünlerden kaynaklanacak çamur miktarı;

$$P_{XH} + P_{XP} = Q \cdot Y_{NH} \cdot C_S (1 + f_{EX} \cdot b_H \cdot \theta_X) \quad (18)$$

şeklindedir.

Sistemde birikecek olan partiküler inert yapıdaki çamur miktarı ise aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir.

$$P_{XI} = Q \cdot X_I \quad (19)$$

Atıksudaki partiküler yapıdaki inert bileşenlerin konsantrasyonu,  $X_I$

$$X_I = \frac{f_{XI}}{f_S} \cdot C_S \quad (20)$$

Şeklindedir. Burada,  $f_{XI}$  atıksudaki partiküler inert yapıdaki bileşenlerin oranı ( $f_{XI}=X_I/C_T$ ),  $f_S$  ise atıksudaki biyolojik olarak parçalanabilen kısmın toplam atıksuya oranını göstermektedir ( $f_S=C_S/C_T$ ).

Bu eşitliklerin toplamında sistemdeki toplam üretilen çamur miktarı;

$$P_{XH} + P_{XP} + P_{XI} = Q \cdot Y_{NH} \cdot C_S (1 + f_{EX} \cdot b_H \cdot \theta_X) + Q \cdot \frac{f_{XI}}{f_S} \cdot C_S \quad (21)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Aktif çamur sistemlerinde oluşan toplam çamur miktarı aynı zamanda toplam çamur dönüşüm oranı ( $Y_N$ ) adı altında dizayn aşamasında faydalı olabilecek yeni bir parametre ile de tanımlanabilir.

$$Y_N = Y_{NH} (1 + f_{EX} \cdot b_H \cdot \theta_X) + \frac{f_{XI}}{f_S} = \frac{P_{XT}}{Q \cdot C_S} \quad (22)$$

Geleneksel modelleme yaklaşımı ile çok bileşenli modelleme yaklaşımı çerçevesinde kullanılan içsel solunum hızı katsayılarına da bağlı olarak hesaplanan çamur miktarlarının arasındaki farkları belirlemek üzere aşağıda bir örnek verilmiştir.

### Örnek

1) Aktif çamur sisteminde birim biyolojik çamur üretiminin ( $P_{XT}$ ), geleneksel sistem için ( $k_d$ ) ve çok bileşenli dizayn yaklaşımını kullanarak içsel solunum hızı ( $b_H$ ) için çamur yaşına bağlı olarak değişimini karşılaştırınız.

2) Çok bileşenli dizayn yaklaşımına göre aynı çamur oluşum miktarını verecek olan,  $b_H$  ve çamur yaşına bağlı olarak değişen bir  $k_d$  tanımlayınız.

#### Dizayn verileri

$$C_{T1} = 500 \text{ mg/l}$$

$$C_{S1} = 400 \text{ mg/l}$$

$$S_{I1} = 40 \text{ mg/l}$$

$$X_{I1} = 60 \text{ mg/l}$$

$$Q = 100 \text{ m}^3/\text{gün}$$

$$Y_H = 0.60 \text{ g hücre KOİ/g KOİ (0.422 g UAKM/g KOİ)}$$

$$b_H = 0.2 \text{ gün}^{-1}$$

$$k_d = 0.05 \text{ gün}^{-1}$$

1) Geleneksel aktif çamur modelinde;

Net dönüşüm oranı;

$$Y_{NH} = \frac{Y_H}{1 + k_d \theta_X} = \frac{0.42}{1 + 0.05 \theta_X} \quad (23)$$

şeklindedir.

Bu ifadeye göre  $Y_{NH}$ 'ın geleneksel model yaklaşımı ( $k_d$ ) için hesaplanmış  $\theta_X$ 'e bağlı olarak değişimi Şekil 1'de verilmiştir. Örneğin;  $\theta_X = 5$  gün için  $Y_{NH} = 0.338$  g UAKM/g KOİ (=0.48 g hücre KOİ/g KOİ) ve  $\theta_X = 20$  gün için  $Y_{NH} = 0.211$  g UAKM/g KOİ (=0.3 g hücre KOİ/g KOİ) olarak hesaplanmıştır.

Geleneksel modelleme çerçevesinde, sistemde oluşacak olan toplam biyolojik çamur;

$$P_{XT} = Q \cdot Y_{NH} \cdot C_S \quad (24)$$

şeklindedir. Bu ifadeye göre  $P_{XT}$ 'nin geleneksel model yaklaşımı için hesaplanmış  $\theta_X$ 'e bağlı olarak değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Örneğin;  $\theta_X = 5$  gün için  $P_{XT} = 19.2$  kg KOİ/gün (=13.52 kg UAKM/gün) ve  $\theta_X = 20$  gün için  $P_{XT} = 12$  kg KOİ/gün (=8.45 kg UAKM/gün) olarak hesaplanmıştır.

Çok bileşenli aktif çamur modelinde;  
Net dönüşüm oranı;

$$Y_{NH} = \frac{Y_H}{1 + b_H \theta_X} = \frac{0.60}{1 + 0.2 \theta_X} \quad (25)$$

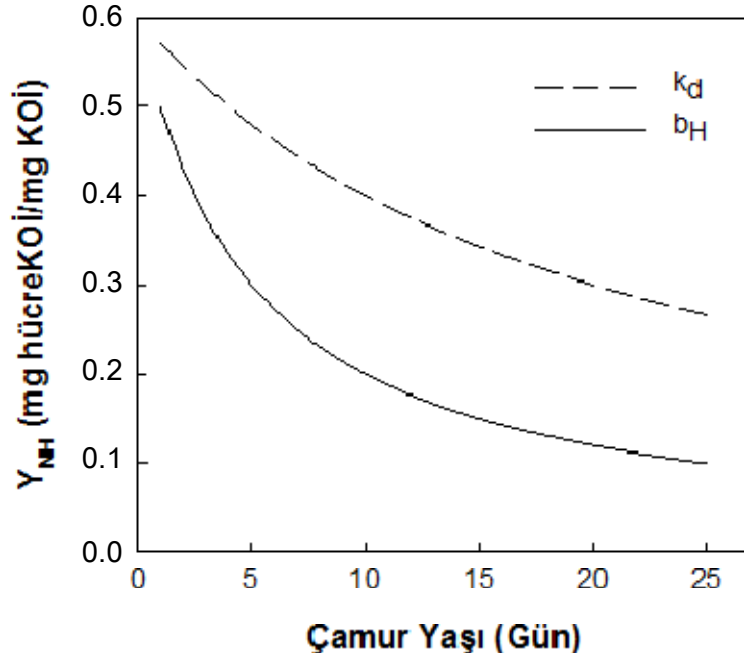
şeklindedir. Bu ifadeye göre  $Y_{NH}$ 'ın geleneksel model yaklaşımı ( $b_H$ ) için hesaplanmış  $\theta_X$ 'e bağlı olarak değişimi Şekil 1'de verilmiştir. Örneğin;  $\theta_X = 5$  gün için  $Y_{NH} = 0.3$  g hücre KOİ/g KOİ ve  $\theta_X = 20$  gün için  $Y_{NH} = 0.12$  g hücre KOİ/g KOİ olarak hesaplanmıştır.

Çok bileşenli aktif çamur modellemesi çerçevesinde sistemdeki toplam biyolojik çamur oluşumu;

$$P_{XT} = P_{XH} + P_{XP} + P_{XI} \quad (26)$$

şeklindedir. Bu ifadeye göre  $P_{XT}$ 'nin çok bileşenli model yaklaşımı için hesaplanmış  $\theta_X$ 'e bağlı olarak değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Örneğin;  $\theta_X = 5$  gün için  $P_{XT} = 20.4$  kg KOİ/gün ve  $\theta_X = 20$  gün için  $P_{XT} = 14.6$  kg KOİ/gün olarak hesaplanmıştır.

Çamur yaşına bağlı olarak geleneksel aktif çamur modeli ve çok bileşenli aktif çamur modeli

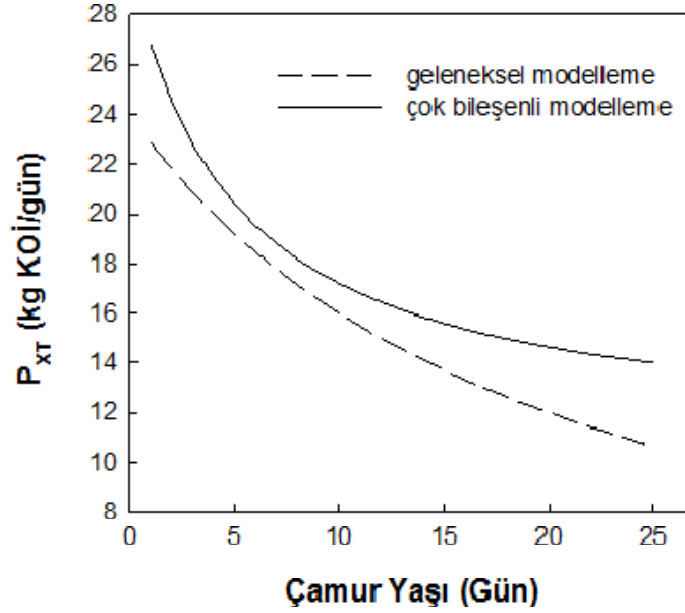


Şekil 1.  $Y_{NH}$ 'ın geleneksel model yaklaşımı ( $k_d$ ) ve çok bileşenli model yaklaşımı ( $b_H$ ) için hesaplanmış  $\theta_X$ 'e bağlı olarak değişimi

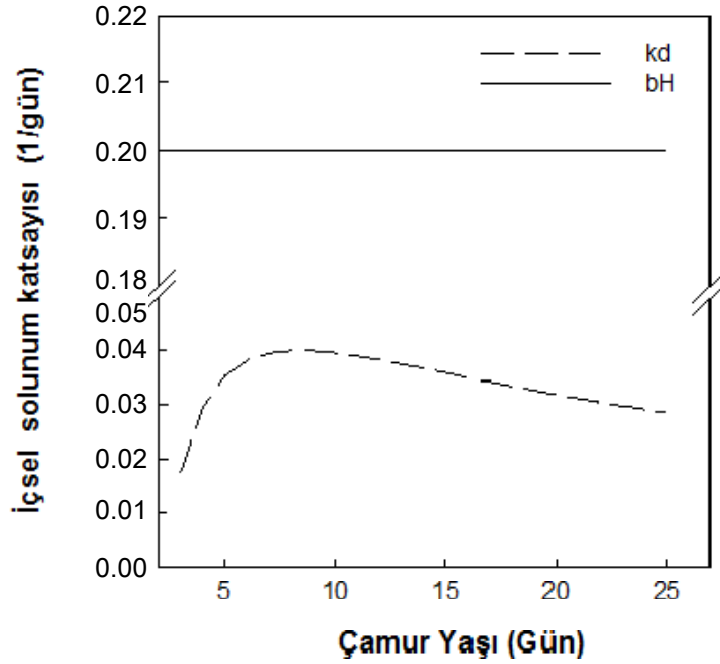


ile hesaplanan çamur üretimleri Şekil 2’de verilmektedir. Bu şekilden de görüldüğü üzere, aktif çamur sistemlerinde geleneksel yaklaşım kullanılarak hesaplanan çamur miktarı, çok bileşenli yaklaşım kullanılarak hesaplanan çamur miktarından daha az olarak belirlenmiştir.

2) Çok bileşenli dizayn yaklaşımına göre aynı çamur oluşum miktarını verecek olan  $k_d$  değeri Şekil 3’te verilmiştir. Bu hesaplamalar kapsamında çok bileşenli aktif çamur modellemesinin sonucunda hesaplanan çamur miktarının, geleneksel modelleme ile hesaplandığında aynı



Şekil 2. Geleneksel aktif çamur modeli ve çok bileşenli aktif çamur modeli ile hesaplanan çamur üretimleri çamur yaşına bağlı olarak değişimi



Şekil 3. Çok bileşenli dizayn yaklaşımına göre aynı çamur oluşum miktarını verecek olan  $k_d$  değerinin çamur yaşına bağlı olarak değişimi

çamur yaşları için hangi  $k_d$  değerine tekabül ettiği belirlenmiştir.

Bu ifadeye göre,  $P_{XT}$ 'nin çok bileşenli model yaklaşımı için hesaplanmış  $\theta_x = 5$  gün için değeri 20.4 kg KOİ/gün ve  $\theta_x = 20$  gün için 14.6 kg KOİ/gün değerleri kullanılmıştır. Bu değerler, aşağıdaki eşitlikte  $P_{XT}$  yerine konulmuş ve burada gereken  $k_d$  değeri belirlenmiştir. Örneğin;  $\theta_x = 5$  gün için  $k_d = 0.035 \text{ gün}^{-1}$  ve  $\theta_x = 20$  gün için  $k_d = 0.032 \text{ gün}^{-1}$  olarak hesaplanmıştır.

$$P_{XT} = QY_{NH}C_S = QC_S \frac{Y_H}{1 + k_d\theta_x} \quad (27)$$

$$P_{XT} = 100 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \frac{0.42}{1 + k_d\theta_x}$$

## Sonuçlar

Geleneksel aktif çamur modellemesinde, sistemde oluşan bütün çamur için bir içsel solunum katsayısı verilmekte ve bunun üzerinden çamur azalması hesaplanmakta ve dolayısıyla da çamur oluşumu belirlenmektedir. Buna karşılık çok bileşenli aktif çamur modellenmesinde ise çamurun bileşenleri tanımlanabilmekte ve içsel solunum sadece heterotrofik biyokütle için hesaplanabilmektedir.

Bu nedenle geleneksel metodla elde edilen çamur üretim miktarı çok bileşenli aktif çamur modellenmesinden elde edilen çamur miktarından daha az olarak hesaplanmaktadır. Bu bağlamda eğer geleneksel aktif çamur modellemesi

kullanılarak çamur hesabı yapılacak ise, içsel solunum katsayısı ( $k_d$ ) sabit alınmayıp aktif biyokütleyle bağlı bir değişken olarak ele alınmalıdır.

## Kaynaklar

- Dold, P.L. ve Marais, G.v.R., (1986). Evaluation of the general activated sludge model proposed by the IAWPRC Task Group, *Water Science and Technology*, **18**, 63-89.
- Henze, M. ve Loosdrecht, M.C.M., (1999). Maintenance, endogenous respiration, lysis, decay and predation, *Water Science and Technology*, **39**, 107-117.
- Marais, G.v.R. ve Ekama, G.A., (1976) The activated sludge process, Part I-Steady state behavior, *Water SA*, **2**, 163-200.
- Okutman Taş, D., Karahan, O., Insel, G., Ovez, S., Orhon, D. ve Spanjers, H., (2009). Biodegradability and denitrification potential of settleable chemical oxygen demand in domestic wastewater, *Water Environment Research*, **81**, 715-727.
- Orhon, D. ve Artan, N., (1994). *Modelling of activated sludge systems*, Technomic Publishing Co., Lancaster PA.
- Orhon, D., Germirli Babuna, F. ve Karahan, O., (2008). *Industrial wastewater treatment by activated sludge treatment*, IWA Publishing.
- Porges, N., Jasewicz, L. ve Hoover, S.R., (1953). A microbiological process report. Aerobic treatment of dairy waste, *Journal of Applied Microbiology*, **1**, 262-270.
- Warner, A.P.C., Ekama, G.A. ve Marais, G.V.R. (1986). The activated sludge process-IV: application of the general kinetic model to anoxic-aerobic digestion of waste activated sludge, *Water Research*, **20**, 943-958.