

Steady-State Modelling of Composition and Production of Activated Sludge

*Zinati Zadeh, A.A. (M.Sc.),
Gharb Higher Education Complex*

Abstract

The mathematical model used for computing the composition and production of activated sludge is derived from the method of material balance. Solids composition and production are expressed explicitly as a function of solids time. The new model contains two variable parameters that are characteristic of the influent and can be easily determined using laboratory data. The model is applicable in optimization of design parameters and removal yield and operating of activated sludge system.

مدل سازی ترکیبات و محصولات ناشی از فرآیند لجن فعال در حالت پایدار

(دریافت ۸۱/۸/۱۳ پذیرش ۸۲/۲/۲۳)

علی اکبر زیتتی زاده*

چکیده

مدل ریاضی مورد نظر، بر اساس موازنه جرم و به منظور تعیین ترکیب درصد اجزای موجود در فرآیند لجن فعال به صورت لحظه‌ای، تهیه شده است. این مدل، فرآیند لجن فعال را در شرایط پایدار بررسی می‌نماید. مقادیر ترکیب درصد جامدات موجود و تولید شده طی فرآیند به عنوان تابعی از زمان ماند سلولی (SRT) می‌باشد. این مدل، شامل دو پارامتر متغیر است که از مشخصات فاضلاب خام ورودی بوده و به سادگی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی می‌تواند تعیین شود. در این روش با توجه به ارتباط بین (SRT) و ترکیب درصد انواع جامدات موجود در سیستم، می‌توان با راندمان پیش‌بینی شده، بهترین زمان ماند سلولی را برای دست‌یابی به کیفیت مورد نظر انتخاب نمود. از این رو یکی از کاربردهای این مدل بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از سیستم لجن فعال می‌باشد. واژه‌های کلیدی: ترکیب لجن فعال، زمان ماند جامدات، مشخصات فاضلاب.

مقدمه

جامدات تولیدی در فرآیند لجن فعال مخلوطی از چندین جزء متفاوت است که در یک تقسیم‌بندی ابتدایی می‌توان به دو دسته جامدات فرار و غیر فرار تقسیم نمود. از جمله اطلاعات مهم در طراحی و بهره‌برداری از واحد لجن فعال، میزان یا شدت تولید لجن است. به طوری که بهره‌برداری صحیح از واحد بیولوژیکی مستلزم وجود اطلاعات دقیق از میزان اجزاء مختلف لجن فعال تولیدی می‌باشد. هر چه این اطلاعات واقعی‌تر و دقیق‌تر تعیین شود، متناسب‌سازی خوراک، میکروارگانیسم و اکسیژن مورد نیاز بهتر انجام می‌شود. از طرفی با انتخاب مؤثرترین SRT، مصرف اکسیژن و تبع آن انرژی، بهینه می‌شود. از این رو شناسایی دقیق اجزاء لجن، حاکمیت علمی بر سینتیک فرآیند بیولوژیکی را محقق می‌سازد.

تاکنون مدل‌های زیادی در خصوص پیش‌بینی ترکیبات فاضلاب خروجی، غلظت جامدات بارگذاری شده در سیستم، تغییرات BOD، COD، TSS، VSS و ... در قسمت‌های مختلف سیستم ارائه گردیده است. در همین

راستا توسط آقایان تاسک و چودوبا (۱۹۸۵)، آرگامان (۱۹۹۵)، دیجروهنس (۱۹۹۲)، زیمن (۲۰۰۰) و اولسون (۲۰۰۳) مدل‌هایی به منظور تخمین شدت تولید لجن ارائه گردیده است که تأکید کمتری بر ترکیبات جامدات دارد [۱، ۲، ۳، ۴، ۵].

بدین منظور و بنا به ضرورت در این مطالعه، اجزاء لجن فعال به عنوان تابعی از زمان ماند جامدات (SRT) تخمین زده می‌شود. به طوری که ابتدا مفاهیم و اطلاعات مورد نیاز ارائه و سپس معادلات مربوطه بررسی و نهایتاً مدل مورد نظر و کاربری‌های آن ارائه می‌گردد.

مبانی طرح و فرضیات

- ترکیبات لجن فعال

ترکیبات موجود در لجن فعال را می‌توان با توجه به ماهیت شیمیایی آن‌ها به دو دسته فرار و ثابت تقسیم نمود. در صورتی که هر یک از این ترکیبات را به صورت جزئی از کل بنویسیم خواهیم داشت:

$$f_a + f_v = 1 \quad (1)$$

* عضو هیأت علمی مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی غرب

f_a : جزء ثابت جامدات

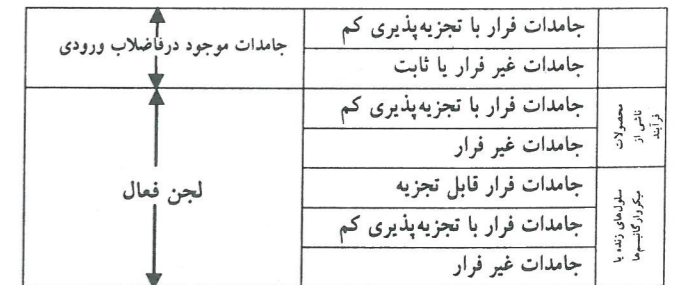
f_v : جزء فرار جامدات

جامدات فرار را می‌توان به دو دسته قابل تجزیه و غیر قابل تجزیه یا با تجزیه‌پذیری کم تقسیم‌بندی نمود:

$$f_a + (f_r + f_d) = 1 \quad (2)$$

f_r : جزیی از کل جامدات فرار با تجزیه‌پذیری کم می‌باشد.

f_d : جزیی از کل جامدات فرار قابل تجزیه می‌باشند. اجزای مختلف تشکیل دهنده لجن فعال در شکل ۱ آمده است.



شکل ۱- ترکیبات موجود در فرآیند لجن فعال

- فرضیات

به منظور تعیین محدوده تعمیم، ساده‌سازی و کاربردی‌تر نمودن این مدل، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱- این مدل برای سیستم‌های منفرد لجن فعال^۱ کاربرد دارد.

۲- ثابت سرعت کاهش BOD در طی فرآیند ثابت می‌ماند.

۳- پس از زمان ماند ۳ روز، تمامی مواد آلی قابل تجزیه بیولوژیکی، در مکانیسم تجزیه شرکت کرده و کاملاً هضم می‌شوند و به محصولات ناشی از واکنش بیولوژیکی تبدیل می‌شوند. در صورتی که زمان ماند از ۳ روز کمتر باشد، مقداری جامدات قابل تجزیه بیولوژیکی هضم نشده در سیستم باقی می‌ماند که در مدل لحاظ می‌شود [۶ و ۷].

بررسی معادلات فرآیندی

- سینتیک رشد بیولوژیکی

از آنجا که قسمت عمده لجن فعال، ناشی از تبدیل مواد محلول به مواد معلق (میکروارگانیسم) طی فرآیند بیولوژیکی است، از این رو بهترین شاخص، میزان جامدات فرار قابل تجزیه (f_d) می‌باشد که این میزان را می‌توان با محاسبه شدت رشد بیولوژیکی تعیین نمود. از این رو رابطه سینتیکی زیر را می‌توان نوشت:

(شدت مرگ و میر) - (شدت رشد کلی) = شدت رشد خالص

$$\Delta X_d = (Y_d \cdot E \cdot S^{in} \cdot F) - (K_d \cdot X_d \cdot V) \quad (3)$$

ΔX_d : میزان تولید خالص جامدات قابل تجزیه (gr/s)

E: راندمان تصفیه در فرآیند لجن فعال (بدون بعد)

F: میزان جریان ورودی (m^3/s)

V: حجم تانک هوادهی (m^3)

Y_d : راندمان تولید جامدات قابل تجزیه از BOD

محلول (حذف شده $grVSS/gr BOD_s$)

S^{in} : غلظت BOD محلول در ورودی (gr/m^3)

K_d : ضریب تخریب (مرگ و میر) جامدات قابل تجزیه

بیولوژیکی (S^{-1})

X_d : غلظت جامدات قابل تجزیه بیولوژیکی در تانک

هوادهی (MLVSS) (gr/m^3)

جزیی از میکروارگانیسم‌ها که ماهیت آلی دارند به

جامدات فعال بیولوژیکی^۲ معروف بوده و اجزای آن با

ضرایب زیر مشخص شده است:

$$f_d^b = 0.78 \quad (جزیی از مواد آلی قابل تجزیه)$$

$$f_r^b = 0.22 \quad (جزیی از مواد آلی با تجزیه‌پذیری کم)$$

با بهره‌گیری از ضرایب فوق میزان تولید جامدات فعال

بیولوژیکی با میزان تولید خالص جامدات قابل تجزیه

رابطه‌ای به صورت زیر خواهد داشت:

$$\Delta X_d = f_d^b \cdot \Delta X_b \quad (4)$$

$$X_d = f_d^b \cdot X_b \quad (5)$$

ΔX_b : میزان تولید جامدات فعال بیولوژیک (gr/s)

X_b : غلظت جامدات فعال بیولوژیکی تحت هوادهی

(gr/m^3)

$$\Delta X_b = (Y_b \cdot E \cdot S^{in} \cdot F) - (K_d \cdot X_b \cdot V) \quad (6)$$

² Bioactive

¹ Single-Sludge System

$$Y_b = \frac{Y_d}{f_d^b} \quad (7)$$

Y_b : ضریب راندمان تولید جامدات فعال بیولوژیکی

Y_b و f_d^b : ثابت‌های بیولوژیکی

طی مطالعات آزمایشگاهی آقای اکن فلدر مقادیر

Y_b و K_d به ترتیب 0.46 و $0.074d^{-1}$ تعیین شده است [۷].

یکی از شاخص‌های مهم، نسبت بین میزان تولید

جامدات و میزان مصرف مواد آلی محلول می‌باشد که

متناسب با نوع جامدات تولید شده این نسبت فرق می‌کند

[۷، ۸ و ۹].

$$SSP_s = \frac{\Delta X_s}{S^{in} \cdot F} \quad (8)$$

$$SSP_b = \frac{\Delta X_b}{S^{in} \cdot F} \quad (9)$$

SSP_s : نسبت میزان تولید کل جامدات (لجن) به میزان

مصرف مواد آلی محلول،

SSP_b : نسبت میزان تولید جامدات فعال بیولوژیکی به

میزان مصرف مواد آلی محلول

دو پارامتر SSP_b و SSP_s با یکدیگر با ضریب f_b در

ارتباط می‌باشند:

$$SSP_b = f_b \cdot SSP_s \quad (10)$$

f_b : جزء جامدات فعال بیولوژیکی در لجن فعال

$$f_b = \frac{f_d^b}{f_d^c} \quad (11)$$

$$SSP_b = \frac{f_d^b}{f_d^c} \cdot SSP_s \quad (12)$$

اگر طرفین رابطه ۶ را بر $S^{in} \cdot F$ تقسیم کنیم، آنگاه

خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta X_b}{S^{in} \cdot F} = \frac{Y_b \cdot E \cdot S^{in} \cdot F}{S^{in} \cdot F} - \frac{K_d \cdot X_b \cdot V}{S^{in} \cdot F}$$

در نتیجه:

$$\frac{\Delta X_b}{S^{in} \cdot F} = \frac{K_d}{\left(\frac{F}{M}\right)_b} \quad (13)$$

طبق تعریف داریم:

$$\left(\frac{F}{M}\right)_b = \frac{S^{in} \cdot F}{X_b \cdot V} \quad (14)$$

اگر طرفین رابطه ۶ را بر $X_b \cdot V$ تقسیم کنیم، آنگاه

خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta X_b}{X_b \cdot V} = \frac{Y_b \cdot E \cdot S^{in} \cdot F}{X_b \cdot V} - \frac{K_d \cdot X_b \cdot V}{X_b \cdot V}$$

در نتیجه:

$$\left(\frac{1}{SRT}\right) = Y_b \cdot E \cdot \left(\frac{F}{M}\right)_b - K_d$$

یا:

$$\left(\frac{F}{M}\right)_b = \frac{(1 + K_d \cdot SRT)}{E \cdot Y_b} \quad (15)$$

که:

$$SRT = \frac{X_b \cdot V}{\Delta X_b} \quad (16)$$

اگر از رابطه (۱۵) نسبت $\left(\frac{F}{M}\right)_b$ را در رابطه (۱۳) قرار

دهیم و سپس در رابطه (۱۲) جایگزین نماییم، خواهیم داشت:

$$SSP_s = f_d^b \cdot E \cdot \left(\frac{Y_b}{f_d^c}\right) / (1 + K_d \cdot SRT) \quad (17)$$

با بهره‌گیری از معادله (۱۷)، رابطه بین تولید جامدات و

ترکیب درصد آن‌ها به دست می‌آید. در رابطه فوق f_d

نامعلوم است که از طریق موازنه جرم می‌بایست تعیین

شود.

موازنه جرم تحت شرایط پایدار

در اینجا موازنه جرم برای جامدات غیر ثابت^۱ و

جامدات فرار با تجزیه‌پذیری کم^۲ مورد بررسی قرار

می‌گیرد.

الف) جامدات ثابت

$$(f_a^{in} \cdot X^{in} \cdot F) + (\alpha \cdot Y_b \cdot E \cdot S^{in} \cdot F) = f_a^c \cdot \Delta X_s \quad (18)$$

f_a^{in} : جزء جامدات غیر فرار در ورودی

X^{in} : غلظت SS ورودی (gr/m^3)

f_a^c : جامدات ثابت موجود در میکروارگانیسم‌ها

$f_a^c \cdot \Delta X_s$: میزان جریان خروجی جامدات ثابت

از تقسیم معادله (۱۸) بر $S^{in} \cdot F$ محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \frac{f_a^c}{1 - f_a^c} \quad (19)$$

بنابراین:

$$f_a = \frac{\gamma_a + (\alpha \cdot Y_b \cdot E)}{SSP_s} \quad (19)$$

که در آن:

$$\gamma_a = \frac{f_a^{in} \cdot X^{in}}{S^{in}} \quad (20)$$

¹ Fixed
² Refractory

متغیر γ_a تنها وابسته به مشخصات فاضلاب ورودی است و به عنوان شاخص جامدات ثابت می‌باشد. رابطه f_a با (SRT) را می‌توان از ارتباط بین معادلات (۱۷) و (۱۹) به دست آورد:

$$f_a = \frac{\gamma_a + \alpha \cdot Y_b \cdot E}{f_d^b \cdot E \cdot \left(\frac{Y_b}{f_d}\right) / (1 + K_d(SRT))}$$

در نتیجه:

$$f_a = \frac{f_d(\gamma_a + \alpha \cdot Y_b \cdot E)(1 + K_d(SRT))}{f_d^b \cdot E \cdot Y_b} \quad (21)$$

(ب) جامدات فرار با تجزیه پذیری کم

(میزان تولید جامدات فرار با تجزیه پذیری کم) = میزان تولید خالص (میزان جریان ورودی از جامدات فرار با تجزیه پذیری کم) + $X_r^{in} \cdot F + f_r^b \cdot Y_b \cdot E \cdot S^{in} \cdot F = f_r \cdot \Delta X_s$ (۲۲)

از تقسیم رابطه (۲۲) بر $S^{in} \cdot F$ ، محاسبه می‌شود:

$$\frac{X_r^{in} \cdot F + f_r^b \cdot Y_b \cdot E \cdot S^{in} \cdot F}{S^{in} \cdot F} = \frac{f_r \cdot \Delta X_s}{S^{in} \cdot F} \quad (23)$$

$$f_r = \frac{(\gamma_r + f_r^b \cdot E \cdot Y_b)}{SSP_s} \quad (24)$$

$$\gamma_r = \frac{X_r^{in}}{S^{in}} \quad (24)$$

که در آن:

$$X_r^{in} = \text{غلظت جامدات ورودی با تجزیه پذیری کم}$$

متغیر γ_r تنها وابسته به مشخصات فاضلاب ورودی است و به عنوان شاخص جامدات فرار با تجزیه پذیری کم می‌باشد.

ارتباط بین f_r با (SRT) را می‌توان از بین روابط (۱۷) و (۲۳) به دست آورد:

$$f_r = \frac{(\gamma_r + f_r^b \cdot E \cdot Y_b)}{f_d^b \cdot E \cdot \left(\frac{Y_b}{f_d}\right) / (1 + K_d(SRT))}$$

بنابراین:

$$f_r = \frac{f_d(\gamma_r + f_r^b \cdot Y_b \cdot E)(1 + K_d(SRT))}{f_d^b \cdot E \cdot Y_b} \quad (25)$$

حل معادلات موازنه جرم

با جایگزین نمودن روابط (۲۱) و (۲۵) در رابطه (۲) سهم جامدات قابل تجزیه به دست می‌آید:

$$\frac{f_d(\gamma_a + \alpha \cdot Y_b \cdot E)(1 + K_d(SRT))}{f_d^b \cdot E \cdot Y_b} + f_d + \frac{f_d(\gamma_r + f_r^b \cdot Y_b \cdot E)(1 + K_d(SRT))}{f_d^b \cdot E \cdot Y_b} = 1 \quad (26)$$

$$f_d = \frac{f_d^b \cdot E \cdot Y_b}{f_d^b \cdot E \cdot Y_b + [\gamma_a + \gamma_r + (\alpha + f_r^b) \cdot Y_b \cdot E](1 + K_d(SRT))}$$

یا:

$$f_d = f_d^b \cdot E \cdot Y_b / \Phi \quad (27)$$

که در آن:

به منظور ساده نمودن پارامترهای موجود در فرمول، موارد زیر در روابط بعدی لحاظ می‌شود:

$\beta = f_r^b$, $f_a^b = 1 - f_r^b = 1 - \beta$
با استفاده از تعریف‌های فوق رابطه (۲۷) بازنویسی می‌شود.

$$f_d = (1 - \beta) \cdot E \cdot y_b \cdot \Phi \quad (28)$$

با جایگزین نمودن رابطه (۲۶) در روابط (۲۱) و (۲۵) مقادیر f_a و f_r محاسبه می‌شوند:

$$f_a = (\gamma_a + \alpha \cdot E \cdot Y_b)(1 + K_d(SRT)) / \Phi \quad (29)$$

$$f_r = (\gamma_r + \beta \cdot E \cdot Y_b)(1 + K_d(SRT)) / \Phi \quad (30)$$

با بهره‌گیری از روابط (۲۹) و (۳۰) جز فرار از لجن فعال به دست خواهد آمد.

$$f_v = f_r + f_d = [(1 - \beta) \cdot E \cdot Y_b + (\gamma_r + \beta \cdot E \cdot Y_b)] \times (1 + K_d(SRT)) / \Phi \quad (31)$$

لذا جزء جامدات فعال بیولوژیکی در لجن فعال خواهد شد:

$$f_b = \frac{f_d}{f_a^b} = \frac{f_d}{1 - \beta} \quad (32)$$

$$f_b = \frac{E \cdot Y_b}{\Phi}$$

نهایتاً با جایگزین نمودن رابطه (۲۷) در رابطه (۱۷)، رابطه بین نسبت شدت تولید لجن به شدت جریان مواد آلی محلول (SSP_s) با زمان ماند سلولی (SRT) به دست می‌آید:

$$SSP_s = \frac{\Phi}{1 + K_d(SRT)} \quad (33)$$

روابط (۲۶) تا (۳۳) اجزا و ترکیبات لجن فعال را به عنوان تابعی از SRT، مشخصات فاضلاب ورودی (γ_a و γ_r) و سایر پارامترها شامل β ، α ، $\alpha = 0.053$ و $\beta = 0.22$ ، راندمان تصفیه (E) و ضرایب رشد بیولوژیکی (Y_b و K_d) بیان می‌کند [۷، ۸، ۱۰].

بحث و نتیجه‌گیری

با بهره‌گیری از مدل اخیر، ترکیب درصد هر یک از اجزای موجود در فرآیند لجن فعال پیش‌بینی و با استفاده از آن بهترین زمان ماند سلولی (SRT) به دست می‌آید. به طوری که با ترسیم نمودار تغییرات پارامترهای f_d ، f_r ، f_a و SSP_s بر حسب SRT تأثیر سن لجن را بر اجزای مختلف و بالعکس می‌توان بررسی نمود.

در دوران بهره‌برداری، با استفاده از رابطه زیر می‌توان مقدار SSP_s را به ازای هر مقدار از SRT محاسبه نمود:

$$SSP_s = \left[SRT \left(\frac{F}{M} \right) \right]^{-1} \quad (34)$$

با استفاده از معادله موازنه جرم جامدات تولید شده در سیستم لجن فعال، رابطه بین SSP_s و میزان لجن زائد خروجی از جریان زیرین تانک ته‌نشینی، به صورت زیر نتیجه‌گیری می‌شود:

$$\frac{Q_w \cdot X_w}{S^{in} \cdot F} = SSP_s - \frac{X_e}{S^{in}} \quad (35)$$

که در آن:

$$X_e = \text{مقدار SS خروجی}$$

$$X_w = \text{مقدار SS در جریان زیرین تانک ته‌نشینی}$$

$$Q_w = \text{میزان جریان زائد خروجی تانک ته‌نشینی}$$

منابع و مراجع:

- 1- Chudoba, J., and Tucek, F. (1985). "Production, Degradation and Composition of Activated Sludge in Aeration Systems without Primary Sedimentation", J. Water Pollut. Control Federation, 57,3,201.
- 2- Argaman, Y. (1995). "A Steady-State Model for the Single Solids Activated Sludge System I. Model Description", Water Res. (G.B), 29,1,137.
- 3-Daigger, G.T., and Henze, J.A. (1992). "Upgrading Wastewater Treatment Plants", Technomic Publication, Lancaster, Pa., Chap. 6.
- 4-Olsson, G., Nielson, M., Yuan, Z. (2003). "Instrumentation Control and Automation in Wastewater Systems", IWA Publishing 76.
- 5- Zeeman, G. (2000). "Appropriate and Innovative Wastewater", Management for Small Communities in EMC Countries Cr Press, Boca Raton, 3.28.
- 6- Henze, M., Grady, C.P.L., Jr., Gujer, H., Masais, G.V.R., and Matsuo, T. (1987). "Model for Single-Sludge Wastewater Treatment", Water Res.(G.B), 21,505.
- 7- Quirk, T.P., and Eckenfelder, W.W., Jr (1986). "Active Mass in Activated Sludge Analysis and Design", J. Water Pollut. Control. 58,932.
- 8- Metcalf and Eddy, Inc. (1991). "Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse", 3rd Ed., McGraw-Hill, New York. 394.
- 9- Mynhier, M.D., and Grady, C.P.L., Jr. (1975). "Design Graphs for Activated Sludge Process". J. Environ. Eng., 101,829.
- 10- Schulz, J.R., Hegg, B.A. and Rakness, K.L. (1982). "Realistic Solids Production for Activated Sludge Plants without Primary Clarifier", J. Water Pollut. Control Federation, 54. 1355.

در رابطه SSP_s با شدت جریان لجن زائد خروجی، نسبت $\frac{X_e}{S^{in}}$ ، به عنوان فاکتور تصحیح می‌باشد و از آنجا که مقدار X_e معمولاً حدود 30 mg/lit فرض می‌شود، لذا فاکتور تصحیح با S^{in} نسبت عکس داشته و با اندازه‌گیری BOD فاضلاب ورودی این فاکتور تعیین می‌شود.

استفاده از نسبت $\frac{F}{M}$ به عنوان پارامتر موثر در کنترل فرآیند لجن فعال، به دلایل زیر از دقت و اطمینان بالایی برخوردار نیست:

الف) تغییر شدت تولید لجن به دلیل تفاوت در γ_a یا γ_r حتی در SRTهای یکسان

ب) عدم انطباق تغییرات $\frac{F}{M}$ در SRTهای مختلف با شدت تولید لجن فعال، به دلیل تغییر در ترکیب درصد میکروارگانیسم

این مطالعه نشان می‌دهد که بررسی دقیق و کامل تولید جامدات در فرآیند لجن فعال به پارامترهای γ_a و γ_r و Y_b و K_d نیاز دارد.