

Operation and Upgrading the Capacity of Wastewater Treatment Plants by Activated Sludge Method Using the Mass Flux Approach (Case Study of Wastewater Treatment Plant of Shahrak Gharb in Tehran)

R. Mohammadi¹, B. Aminnejad²

1. PhD Student in Engineering and Water Resources Management, Dept. of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran
(Corresponding Author) babak1406@yahoo.com

(Received June 5, 2020 Accepted March. 10, 2021)

To cite this article:

Mohammadi, R., Aminnejad, B. 2021. "Operation and upgrading the capacity of wastewater treatment plants by activated sludge method using the mass flux approach (case study of wastewater treatment plant of Shahrak Gharb in Tehran)" Journal of Water and Wastewater, 32(4), 21-33. Doi: 10.22093/wwj.2021.233988.3032. (In Persian)

Abstract

One of the major challenges in the operation of wastewater treatment plants is the lack of experts and the lack of use of new methods in the management of this system, which has rarely been addressed in the past. Therefore, the application of new methods in exploitation is of great importance and in this regard, in the present study, using the mass flux approach, velocity and behavior of sediment particles and sludge masses in the secondary sedimentation pond by performing Settling column experiment with observance of the sludge index range between 150 and 250 mg/L, with the preparation of 6 different concentrations of raw wastewater, effluent and returned sludge continuously for more than 18 months (551 days) and in different climatic conditions were studied. By drawing graphs of height-time, concentration-velocity, concentration- mass flux, the relationships between important parameters were obtained using MATLAB software and new mathematical and experimental models that could estimate velocity in a wide range of different concentrations were presented and observed in unusual conditions. By determining the optimal operating point (sp), the capacity of wastewater treatment plants can be increased between 15 and 20% at no cost.

Keywords: Integrated Water Resources Management, Treatment Process, Activated Sludge, Mass Flux, Mathematical and Experimental Models.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۴، صفحه: ۳۳-۲۱

راهبری و ارتقای ظرفیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به روش لجن فعال با استفاده از رویکرد شار جرمی (مطالعه موردی تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب تهران)

رحمت‌اله محمدی^۱، بابک امین‌نژاد^۲

۱- دانشجوی دکترای عمران، مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران،
واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن،
دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
(نویسنده مسئول) Babak1406@yahoo.com

(دریافت ۹۹/۳/۱۶ پذیرش ۱۴۰۰/۱/۵)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

محمدی، ر.، امین‌نژاد، ب.، ۱۴۰۰، "راهبری و ارتقای ظرفیت تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به روش لجن فعال با استفاده از رویکرد شار جرمی
(مطالعه موردی تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب تهران)" مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۴)، ۳۳-۲۱. Doi: 10.22093/wwj.2021.233988.3032

چکیده

یکی از چالش‌های مهم در بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، فقدان نیروی انسانی متخصص و عدم استفاده از روش‌های نو در راهبری از این سیستم است که در گذشته خیلی کم به این موضوع پرداخته شده است. بنابراین به‌کارگیری روش‌های جدید در امر بهره‌برداری اهمیت بسیار زیادی دارد و در این راستا، در این پژوهش با بهره‌گیری از رویکرد شار جرمی، سرعت و رفتار ته‌نشینی ذرات و توده‌های لجن در حوض ته‌نشینی ثانویه با انجام آزمایش ستون ته‌نشینی و با رعایت قرارگیری محدوده شاخص لجن بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر با تهیه ۶ غلظت مختلف از فاضلاب خام ورودی، پساب خروجی و لجن برگشتی و به‌صورت مستمر بیش از ۱۸ ماه (۵۵۱ روز) و در شرایط مختلف آب و هوایی بررسی شد و با ترسیم نمودارهای ارتفاع زمان، غلظت-سرعت، غلظت-شار جرمی، ارتباط بین پارامترهای مهم با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به‌دست آمد و مدل‌های ریاضی و تجربی جدیدی که قابلیت تخمین سرعت در طیف وسیعی از غلظت‌های مختلف را داشت، ارائه و مشاهده شد که در شرایط غیرعادی می‌توان با تعیین درست نقطه بهینه بهره‌برداری، ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها را بدون هزینه کرد، بین ۱۵ تا ۲۰ درصد ارتقا داد.

واژه‌های کلیدی: مدیریت یکپارچه منابع آب، فرایند تصفیه، لجن فعال، شار جرمی و مدل‌های ریاضی و تجربی

۱- مقدمه

خارج می‌شوند. بنابراین بررسی رفتار توده‌های لجن در هنگام ته‌نشینی اهمیت زیادی دارد و به‌دلیل شباهت بین فرایند ته‌نشینی ناپیوسته و پیوسته، پژوهشگران زیادی پژوهش‌هایی را در ارتباط با

یکی از واحدهای مهم در تصفیه‌خانه‌های فاضلاب که نقش اصلی در حذف آلاینده‌ها را دارد، حوض ته‌نشینی ثانویه است که ذرات و توده‌های لجن در آن با مکانیسم ته‌نشینی، رسوب کرده و از سیستم



- ناحیه زلال: در این بخش پساب حاصل از تصفیه از طریق سرریز خارج و وارد محیط پذیرنده می‌شود، بنابراین غلظت مواد جامد معلق در این ناحیه تقریباً صفر در نظر گرفته می‌شود.

- ناحیه زیرین ناحیه زلال‌ساز: در این بخش ذرات در ته‌نشینی تمایلی به چسبندگی ندارند و تقریباً به صورت مجزا ته‌نشین می‌شوند و تغییرات چندانی در جرم و حجم ذرات رخ نمی‌دهد. ته‌نشینی در آن به نوع اول معروف است.

- ناحیه ته‌نشینی: در این بخش ذرات هنگام ته‌نشینی به یکدیگر برخورد کرده و به هم می‌چسبند و در نتیجه در حین حرکت به سمت پایین، جرم، شکل و حجم آن تغییر یافته و توده‌هایی را به وجود می‌آورد. بنابراین در این بخش با افزایش غلظت، سرعت نیز افزایش می‌یابد و نمودار غلظت- سرعت غیرخطی است. ته‌نشینی در این بخش به ته‌نشینی نوع دوم معروف است.

- ناحیه مانع حرکت^۱: در این ناحیه، غلظت ذرات افزایش می‌یابد و معمولاً غلظت بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌شود که در حین ته‌نشینی مانع حرکت یکدیگر شده و تمایل به ماندن در یک جای ثابت را دارند. گاهی توده‌های لجن از هم گسسته می‌شوند و سرعت ته‌نشینی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. ته‌نشینی در این بخش به نوع سوم مرسوم است.

- ناحیه تغلیظ: هنگامی که تراکم ذرات بسیار افزایش می‌یابد تقریباً ته‌نشینی ذرات متوقف می‌شود و فرایند تغلیظ اتفاق می‌افتد. ته‌نشینی در این بخش به نوع چهارم معروف است.

بنابراین با عنایت به تعاریف فوق و مدنظر قراردادن فرض‌های زیر روابط زیر حاصل می‌شود:

(۱) از واکنش بیولوژیکی در حوض ته‌نشینی ثانویه صرف نظر می‌شود.

(۲) غلظت ذرات در ورودی همگن و به صورت شعاعی بلافاصله پس از ورود، در سطح مقطع حوض توزیع می‌شود.

(۳) سرعت ته‌نشینی ذرات فقط به غلظت بستگی دارد.

(۴) دو بخش در حوض ته‌نشینی وجود دارد که جهت جریان به تناسب موقعیت هر لایه نسبت به ارتفاع، به سمت بالا، پایین یا بالا و پایین خواهد بود.

(۵) ته‌نشینی ذرات (توده‌ها) در لایه‌های مختلف به صورت مجزا و با

رفتار ذرات در زلال‌ساز و تغلیظ لجن فعال در حوض ته‌نشینی ثانویه با انجام آزمایش‌های مرتبط به عمل آوردند و توابع متنوعی از ریاضی و تجربی توسط پژوهشگران مختلفی مانند براتو (Buratto et al., 2014)، کلرک (Clerc, 2003)، اسکات (Scott, 1966)، و سیلیند (Vesilind, 1968)، دیهل (Diehl, 2007)، کینیر (Kinner, 2002)، ژانگ و همکاران (Zhang, et al 2006)، کلرک و همکاران (De Clercq et al., 2008)، دیوید و همکاران (David, et al., 2009b) و بورگر (Burger et al., 2013) پیشنهاد شده است. همچنین پارامترهای مختلفی مانند اندازه ذرات، شکل، لزجت لجن، تخلخل و دانسیته به عنوان مشخصات ذرات در ته‌نشینی مورد توجه قرار گرفته است و در بین این توابع تجربی و ریاضی ارائه شده، مدل آقای ویسیلیند و تاکاکس و همکاران به لحاظ کاربردی بودن، استفاده رایج تری را در طراحی حوض ته‌نشینی ثانویه پیدا کرده است (Vesilind, 1968, Takács et al., 2007).

تئوری ته‌نشینی بیان می‌کند که غلظت ذرات در فواصل مختلف از سطح حوض متفاوت بوده و با تعریف انواع ته‌نشینی که در شکل ۱-a نشان داده شده است، روابط تجربی و ریاضی حاصل شده است که در زیر به آن پرداخته می‌شود:

- تئوری ته‌نشینی: جداسازی مواد جامد معلق از مایع مخلوط بر اساس ماهیت ذرات و رفتار آنها در حین ته‌نشینی پیچیدگی‌های خاصی دارد و در واحد تصفیه نهایی^۱، ته‌نشینی نوع سوم و نوع چهارم اهمیت زیادی دارد. هنگامی که میزان غلظت لجن فعال افزایش می‌یابد این نوع ته‌نشینی اتفاق می‌افتد و در این شرایط، لجن در ابتدا با سرعت یکنواخت ته‌نشین می‌شود که تابعی از میزان غلظت اولیه مواد جامد است. سپس هنگامی که سرعت ته‌نشینی به دلیل افزایش غلظت مواد جامد، کاهش می‌یابد ناحیه ته‌نشینی انتقال رخ می‌دهد و در نهایت ناحیه فشرده‌سازی توسعه می‌یابد، زمانی که لایه لجن ته‌نشینی افزایش می‌یابد و به سطح (مرز مشترک جامد - مایع) می‌رسد. تحت این شرایط، ذرات در بخش فشرده‌سازی با انباشتگی جرم ذرات حمایت می‌گردند و فشرده‌سازی انجام می‌شود. این امر در شکل ۱ با بخش‌بندی نواحی ته‌نشینی نشان داده شده است.

² Hender Settling

¹ Zone Settling Compression



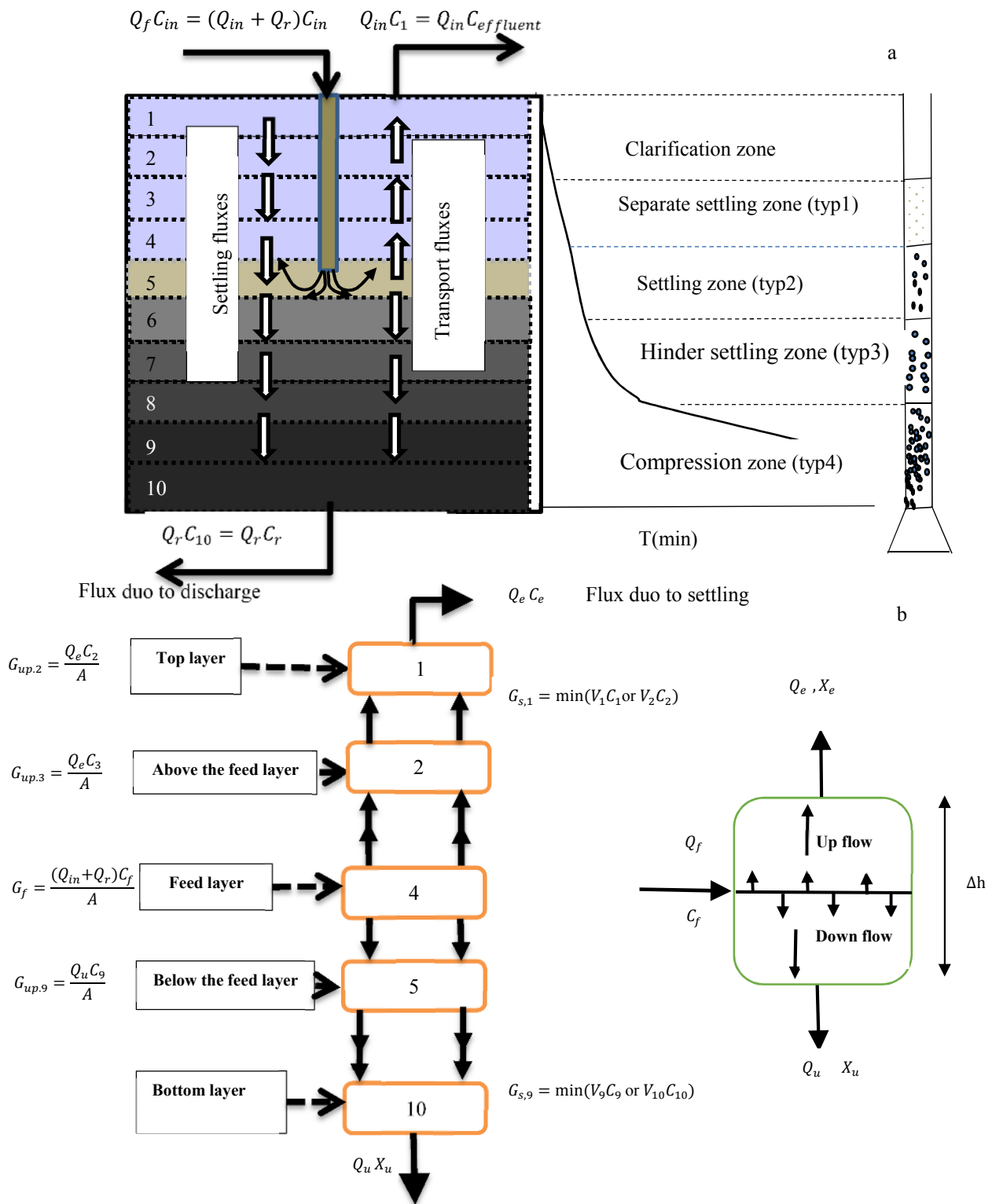


Fig. 1. a) Dividing the depth of the secondary settling basin into different settling zones, b) Layering the clarifying basin and the control volume element for different layers of the settling basin

شکل ۱- a) تقسیم‌بندی عمق حوض ته‌نشینی ثانویه به نواحی مختلف ته‌نشینی، b) لایه‌بندی حوض زلال‌ساز و المان حجم کنترل برای لایه‌های مختلف حوض ته‌نشینی

برای لایه تغذیه

$$\frac{\partial c_{in}}{\partial t} = \frac{[Q_f(C_{in}-C_f)-V_{s,f-1}C_{f-1}A-V_{s,f}C_fA]}{A\Delta h} \quad (8)$$

که در آن

$$Q_f = Q_{in} + Q_r$$

برای لایه‌های پایین لایه تغذیه

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{[Q_r(C_{i-1}-C_i)-V_{s,i-1}C_{i-1}A-V_{s,i}C_iA]}{A\Delta h} \quad (9)$$

برای لایه کف $i = n$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{[Q_r(C_{n-1}-C_n)-V_{s,n-1}C_{n-1}A-V_{s,n}C_nA]}{A\Delta h} \quad (10)$$

معادله ۱۰ مدل ته‌نشینی بدون آیتیم پراکنندگی را به دست می‌دهد. که در آن

c غلظت، n شماره لایه و h ارتفاع است. معادله غیرخطی فوق با استفاده از روش سعی و خطا حل می‌شود که در این معادله برای محاسبه سرعت ته‌نشینی ذرات، روش‌های تجربی مختلفی ارائه شده است که رایج‌ترین آن مربوط به معادله تجربی وسیلند^۱ است که در عمل کاربرد بیشتری پیدا کرده، اما یک ایراد مدل تجربی ایشان این است که فقط در ناحیه ته‌نشینی کاربرد دارد. با وجود پژوهش‌های متعدد هنوز روش ساده، جامع و کاربردی که بتوان در راهبری تصفیه‌خانه‌ها از آن استفاده کرد ارائه نشده است و در ایران بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب به روش لجن فعال مشکلات عدیده‌ای دارد.

یکی از چالش‌های پراهمیت در راهبری این است که ایجاد تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، اغلب با سرمایه‌گذاری‌های قابل توجه و چشم‌گیر همراه است. در این صنعت به دلیل عدم وجود نظام فنی و بهره‌برداری و پتانسیل‌های غنی پیمانکاری در بخش بهره‌برداری و استفاده از افراد غیرمتخصص در امر راهبری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب موجب شده است تأسیسات ایجاد شده کارایی مورد انتظار را در عمل برآورده نمی‌کنند و وجود خلأ روش‌های پویا که بتواند بخشی از نارسایی‌ها را برطرف کند، کاملاً محسوس است. بنابراین

فرض ثابت بودن غلظت انجام می‌شود و تنها انتقال بین لایه‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین با در نظر گرفتن این فرضیات و اینکه ته‌نشینی ذرات در حوض زلال‌ساز انباشتگی لجن در کف را تولید و موجب مترکم شدن آن می‌شود و این امر موجب می‌شود دو شار برای غلظت لجن به وجود آید: اول شار ته‌نشینی که نشان‌دهنده تخلیه لجن از کف، دوم شار انتقال (شار فرارفت) است که برای بررسی این موضوع معادلات موازنه جرمی برای المان حجم کنترل شکل ۱- b به شرح زیر نوشته می‌شود

$$h-G_s(h+\Delta h)+G_b h-G_b(h+\Delta h)=0 \quad (1)$$

که در آن

h ارتفاع، G_s و G_b به ترتیب شار انتقال و شار ته‌نشینی است که به صورت زیر بیان می‌شود

$$G_b = \frac{Q_i}{A} C = C_i u, \quad G_s = V C_i \quad (2)$$

که در آن

Q_i دبی برگشت لجن، C_i غلظت ذرات، V سرعت ته‌نشینی ذرات و u سرعت لجن خروجی از کف حوض است. معادله ۱ را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial G_s}{\partial h} - \frac{\partial G_b}{\partial h} \quad (3)$$

با مشتق‌گیری از معادله ۲ و جایگزاری آن در معادله ۳، خواهیم داشت

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \left(\frac{Q_r}{A}\right) \left(\frac{\partial G_s}{\partial h}\right) - \frac{\partial(V_s c)}{\partial h} \quad (4)$$

با حل معادله ۴ برای لایه‌های مختلف زلال‌ساز، معادلات زیر حاصل می‌شود برای بخش زلال‌ساز

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \left(\frac{Q_{in}}{A}\right) \left(\frac{\partial c}{\partial h}\right) + \frac{\partial(V_s c)}{\partial h} \quad (5)$$

و برای لایه اول ($i=1$)

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \left(\frac{Q_{in}}{C_2-C_1}\right) - \left(\frac{V_{s,1}C_1A}{A\Delta h}\right) \quad (6)$$

برای لایه‌های بالای لایه تغذیه

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{[Q_{in}(C_{i+1}-C_i)-V_{s,i-1}C_{i-1}A-V_{s,i}C_iA]}{A\Delta h} \quad (7)$$

¹ Vesilind



بین اتوبان حکیم و پارک پردیسان محدود می‌شود. مبانی طرح ایجاد تأسیسات فاضلاب شامل ۸۵۰۰۰ نفر جمعیت، ۱۸۱ لیتر سرانه تولید فاضلاب و برای افق ۱۴۱۰ است که بر اساس این مبانی ظرفیت متوسط تصفیه‌خانه در مدول اول ۳۰۰۰۰ مترمکعب در شبانه‌روز لحاظ شده است. در انتخاب فرایند تصفیه‌خانه فاضلاب، توجه به شرایط اجتماعی- فرهنگی و اقتصادی جامعه و گزارش ارزیابی اثرات محیط‌زیستی، از بین فرایندهای بیولوژیکی متداول در تصفیه‌خانه فاضلاب، فرایند لجن فعال و فرم‌های اصلاح شده آن از نوع لجن فعال متداول با هوادهی ممتد انتخاب و اجرا شده است که مشخصات فنی واحدها در جدول ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- تئوری شارگرانشی

در این پژوهش برای بهینه‌سازی فرایند تصفیه فاضلاب و ارتقای ظرفیت تصفیه‌خانه مورد بررسی از رویکرد شار جرمی استفاده شد و این مفهوم تابعی از سرعت ته‌نشینی و غلظت ذرات است، بنابراین برای یافتن مدل ریاضی برای سرعت ته‌نشینی توده‌های لجن در حوض ته‌نشینی ثانویه، مستلزم اندازه‌گیری سطوح ته‌نشینی نسبت به زمان و در غلظت‌های مختلف است تا بتوان شار جرمی را محاسبه کرد، زیرا شارگرانشی از شار جرمی مواد جامد و در اثر ته‌نشینی ذرات بر مبنای وزن خود ایجاد می‌شود و به غلظت مواد جامد و ویژگی ذرات در آن غلظت بستگی دارد. از طریق

در این پژوهش سعی شد با بهره‌گیری از روش‌ها و رویکردهای جدید به ارتقای بهره‌وری سیستم، کیفیت راهبری و کاهش هزینه‌ها کمک کند.

همچنین یک مسئله مهم دیگری که در این رابطه وجود دارد، عدم تحقق برنامه‌های اجرایی متولیان امر در توسعه تأسیسات موردنیاز به تناسب رشد جمعیت و بر اساس طرح تهیه شده اولیه توسط مشاور، به دلیل کمبود منابع مالی است و در چنین شرایطی، تصفیه‌خانه‌های در دست بهره‌برداری با بارگذاری بیش از ظرفیت نامی خود مواجه شده و گاهی پساب خروجی از آن، نمی‌تواند الزامات سازمان حفاظت محیط‌زیست را برآورده سازد. در این پژوهش روش‌های حل این مشکل بررسی شد و از رویکرد شار جرمی در بهره‌برداری و راهبری تصفیه‌خانه مورد بررسی، برای اولین بار در ایران استفاده شد که با این روش می‌توان بدون توسعه تأسیسات جدید و هزینه اضافی، حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها را افزایش داد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات فنی و مبانی تصفیه‌خانه مورد بررسی

تصفیه‌خانه مورد بررسی در قطعه زمینی به مساحت حدود ۱۳ هکتار ساخته شده است که این قطعه زمین از شمال به بزرگراه همت، از شرق به بزرگراه شیخ فضل‌الله نوری، از غرب به انبار وزارت مسکن و شهرسازی و پارک پردیسان و از جنوب به دره حد فاصل

جدول ۱- مشخصات فنی تصفیه‌خانه مورد بررسی

Table 1. Technical properties of the sewage treatment plant

Unit name / System	Technical description
Screen	Type of grid-arched shaped grid, the width of the channel -120 cm
Grit chamber	Type-horizontal flow, length-20 m, maximum speed -3/0 m / s, time remaining 2-3 minutes
Primary settling tank	Number -4, circular, diameter -18 m, depth-3 m, slope -10%, length of overflow -427 m
Aeration pond	Length -28 meters, width 14 meters, effective depth of 3.5 meters, effective volume 1372 cubic meters
Secondary sediment tank	Number -8, circular, diameter -18 m, depth-3 m, slope -10%, length of overflows -452 m
Chlorine contact tank	Length -26 m, width 15 m, reservoir volume -550 cubic meters, time remaining 20 minutes, number of baffles -4 pcs.



آزمایش سرعت ته‌نشینی در غلظت‌های مختلف مایع مخلوط مواد جامد به دست می‌آید.

شار دومی نیز در حوض ته‌نشینی ثانویه که در اثر تخلیه لجن از کف و برگشت لجن رخ می‌دهد به شار تخلیه^۱ معروف است. تئوری شار جرمی به‌عنوان ابزار مهمی برای ارزیابی رفتار و ویژگی ته‌نشینی ثانویه با تأثیرات تغلیظ است.

برای تشریح این موضوع، شکل ۱ را در نظر بگیرید شار جرمی (G_s) ناشی از وزن توده‌های لجن که به رسوب گرانشی نیز معروف است، طبق معادله ۲ تابعی از غلظت C_i و سرعت ته‌نشینی V_i و شار انتقال (G_b) تابعی از مقدار لجن برگشتی u و غلظت مربوطه از کف حوض ته‌نشینی بوده و شار کل، مجموع این دو پارامتر تعریف می‌شود

$$G_T = G_s + G_b \quad (11)$$

که در آن

G_T شار کل است. جریان فله‌ای^۲ G_b (میزان لجن خروجی از کف) به میزان غلظت مواد جامد و سرعت جریان خروجی توده‌های لجن از کف (اعمال شده برای برگشت لجن)، بستگی دارد. سرعت توده‌های لجن تنها تابعی از میزان جریان لجن برگشتی بوده و این پارامتر قابل کنترل است. با ترکیب معادلات ۲ و ۱۱ خواهیم داشت

$$G_T = G_s + G_b = C_i(V_s + u) \quad (12)$$

ضخامت لجن ناشی از غلظت مواد جامد معلق مایع مخلوط^۳ به سمت جریان زیرین و از طریق غلظت مداخله عبور می‌کند. یکی از این غلظت‌ها برای بهره‌برداری زلال‌ساز بحرانی و به‌عنوان ظرفیت کنترل مواد جامد با محدودیت شار تعریف می‌شود و با G_L نشان داده می‌شود. معادله ۱۳ کاربرد شار G_A که بیانگر ارسال مواد ارگانیک به زلال‌ساز است، تعریف می‌شود

$$G_A = \frac{C_0(Q_{in} + Q_r)}{A} \quad (13)$$

که در آن

C₀ غلظت MLSS در حوض هوادهی Q_{in} جریان ورودی به حوض ته‌نشینی ثانویه، Q_r جریان لجن برگشتی از حوض ته‌نشینی ثانویه به حوض هوادهی و A سطح حوض زلال‌سازی (ته‌نشینی ثانویه) است. هنگامی که جریان شار G_A به بیش از ظرفیت بارگیری مواد جامد می‌رسد پتوی لجن بالا می‌آید. اگر این شرایط تداوم یابد، پتوی مواد جامد بالا آمده و از سرریز خارج خواهد شد. در معادلات بیان شده به دلیل کوچکی از جریان لجن مازاد در مقایسه با لجن برگشتی، لحاظ نشده است. در زمانی که غلظت خیلی بالا باشد، در این شرایط لجن مازاد نیز لحاظ می‌شود. در این شرایط، سرعت جریان توده‌های لجن شامل مجموع جریان برگشتی و جریان مازاد خواهد بود بنابراین G_b به صورت زیر تعریف می‌شود

$$G_b = C_i(u + w) \quad (14)$$

که در آن

w نرخ جریان دائمی از لجن مازاد است. یکی از فن‌های بسیار مهم و مفید در بهره‌برداری از تصفیه‌خانه، تعیین نقطه وضعیت بهینه (ثابت) است که با استفاده از ترسیم نمودارهای مرتبط به شار جرمی حاصل می‌شود. برای تعیین این نقطه، شکل ۲ که ویژگی‌های ته‌نشینی گرانشی را بیان می‌کند، در نظر بگیرید که در آن محور قائم بیانگر شار جرمی برحسب کیلوگرم بر مترمربع در ساعت و محور افقی غلظت MLSS برحسب گرم در لیتر را نشان می‌دهد. محل تلاقی دو خط ترسیم شده از مرکز مختصات (که شیب آن نشان‌دهنده بار سطحی ناشی از دبی ورودی) و غلظت لجن (که شیب آن بار وارده از طریق لجن برگشتی را نشان می‌دهد)، حاصل می‌شود. طبق تعریف شیب خط سرریز برابر با جریان ورودی تقسیم بر سطح حوض است

$$OFR = (Q_{in} - w)/A \quad (15)$$

که در آن

OFR نرخ سرریز، Q_{in} نرخ جریان ورودی، w نرخ جریان مازاد و A سطح حوض زلال‌ساز است. با توجه به اینکه میزان جریان مازاد در مقایسه با جریان ورودی ناچیز است، عدم لحاظ آن در معادله خطای

¹ Under Flow Flux

² Bulk Flux

³ Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)



واحد حوض ته‌نشینی ثانویه و هوادهی از یکدیگر مورد توجه قرار گرفت. همچنین از مزیت خاصی برخوردار بود و محدودیت مدل ویسیلیند را نداشت و برای اولین بار در ایران اتفاق افتاد.

۲-۳- روش آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌ها در این پژوهش با رعایت کلیه پروتکل‌ها و دستورالعمل‌های کتاب آزمایش ته‌نشینی انجام شد (Burger et al., 2007, Takács et al., 2013) که بر این اساس از یک استوانه مدرج با حداقل وضوح ۱۵۰ میلی‌لیتر استفاده شد (شکل ۳-ا). برای تهیه نمودار سرعت ته‌نشینی و شار گرانشی، آزمایش‌ها در ۶ غلظت متفاوت به این ترتیب که یک نمونه اصلی از محل ورودی به حوض زلال‌ساز، دو نمونه تریقی شده با استفاده از پساب خروجی با رعایت قرارگیری محدوده شاخص لجن بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، دو نمونه تلغیظ شده با استفاده از غلظت خروجی از کف حوض ته‌نشینی ثانویه و یک نمونه از غلظت لجن برگشتی انجام شد. پس از تهیه نمونه‌ها برای ایجاد سوسپانسیون همگن از مواد جامد معلق مایع مخلوط، نمونه‌ها به آرامی و به خوبی به هم زده شد. سپس بلافاصله نمونه‌برداری از آن انجام و در این لحظه یعنی $t=0$ ، غلظت مربوطه طبق روش APHA^۲ اندازه‌گیری شد و با $C=C_0$ نشان داده شد. سپس به سوسپانسیون اجازه داده شد تا ذرات ته‌نشین شوند و در فواصل زمانی ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۵ دقیقه ارتفاع پتوی لجن (مرز مشترک پتوی لجن و آب) از روی استوانه مدرج قرائت و ثبت شد (شکل ۳-ا). این کار در روزهای مختلف سال در طول مدت پژوهش در تصفیه‌خانه یعنی ۱۸ ماه تداوم یافت و با برآزش بهترین منحنی بر داده‌های حاصل از آن، نمودار هم غلظت به دست آمد. از ترسیم خط در سه نقطه متوالی که بیشترین شیب را دارد، سرعت در غلظت مربوطه حاصل شد و طبق تعریف

$$V = 9.568 \exp(-0.547c) \quad (18)$$

که در آن

V سرعت ته‌نشینی بر حسب متر در ساعت و c غلظت مایع مخلوط

قابل توجهی را ایجاد نمی‌کند. محل تقاطع خط سرریز خروجی و خط ترسیمی عمودی از میزان غلظت MLSS حوض هوادهی به عنوان نقطه کنترل^۱ معروف است

$$OFR = Q_{in}/A \quad (16)$$

$$u = -Q_r/A \quad (17)$$

که در آن

u شیب خط نرخ لجن برگشتی، Q_r نرخ لجن برگشتی و A به سطح حوض ته‌نشینی ثانویه است.

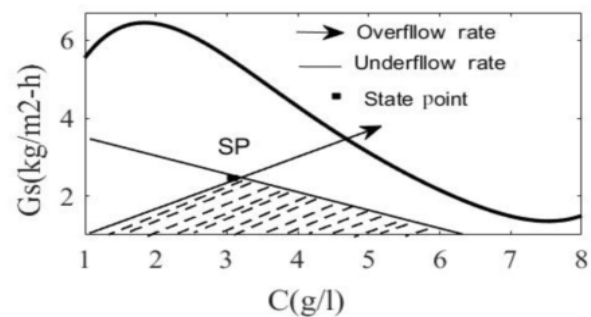


Fig. 2. Gravitational flux and optimal point (reference: research data)

شکل ۲- شار گرانشی و نقطه بهینه (مرجع: یافته‌های پژوهش)

محل تقاطع عمودی این خط با محور X ها میزان غلظت MLSS در حوض هوادهی را بیان می‌کند. زلال‌سازی که تحت بارگذاری و به صورت مفید بهره‌برداری می‌شود، ناحیه هاشور خورده که محدود به دو خط بهره‌برداری است، زیر منحنی شار گرانشی قرار می‌گیرد. علی‌رغم وجود پژوهش‌های زیاد در ارتباط با بررسی رفتار ته‌نشینی ذرات در حوض ته‌نشینی ثانویه، محدودیت‌های مربوط به خود را دارند. پرکاربردترین مدل تجربی که مربوط به آقای ویسیلیند است فقط در ناحیه ته‌نشینی دقت کافی دارد و در نواحی فشرده‌سازی دقت مدل کاهش می‌یابد. در این پژوهش به دلیل جامع، کاربردی و کامل بودن از لحاظ طول مدت آزمایش که در آن کلیه شرایط محیطی در روزهای مختلف سال، بارگذاری‌های مختلف کمی و کیفی به تصفیه‌خانه در نظر گرفته شد و اثرپذیری دو

² American Public Health Association (APHA)

¹ Stat Point

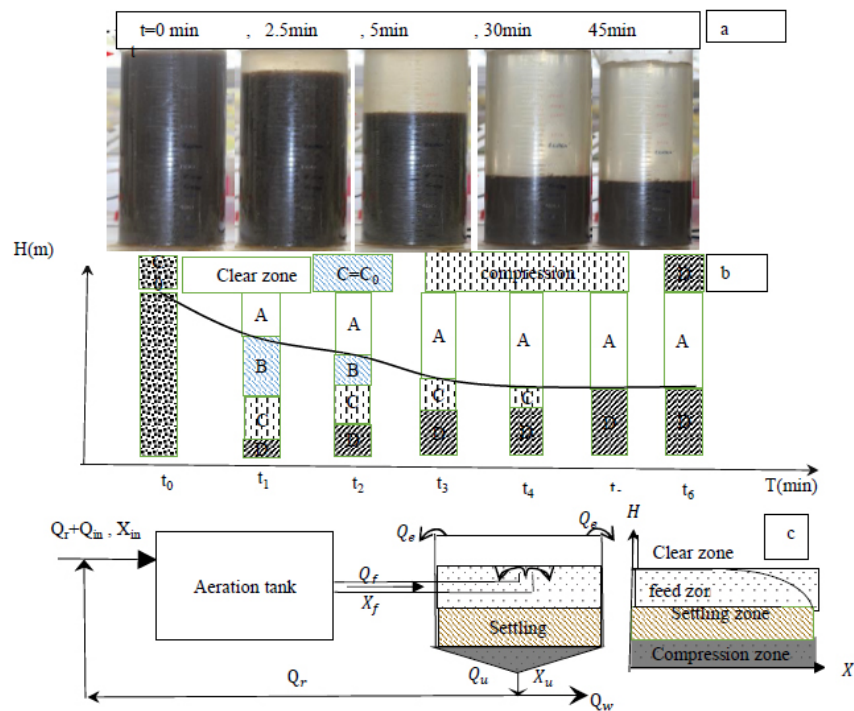


Fig. 3. a) Sedimentation suspension, b) Sedimentation behavior of sludge masses based on time, c) Overview of activated sludge process

شکل ۳- a) سوسپانسیون ته‌نشینی، b) رفتار ته‌نشینی توده‌های لجن بر اساس زمان، c) سیمای کلی فرآیند لجن فعال

متناظر آن برحسب گرم در لیتر است. مطابق شکل ۴- a، این شاخص نشان‌دهنده شیب مثبت خط ترسیمی است و خط دیگری با شیب منفی که نشان‌دهنده بار وارده به حوض ته‌نشینی ثانویه از طریق برگشت لجن است و با شاخص نسبت میزان لجن برگشتی به سطح مقطع است و با Q_u/A نشان داده شد، رسم شده است. تقاطع این دو خط به نقطه وضعیت یا ثابت (SP) معروف است و با انجام آزمایش به صورت مستمر این نقطه باید برای بهره‌برداری بهینه از سیستم تجزیه و تحلیل شود. در شکل ۴- a، سه نقطه ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر جرم شار مواد جامد وارد به حوض ته‌نشینی در واحد زمان، نقطه وضعیت و مقدار غلظت لجن برگشتی است. وقتی که زلال‌ساز در شرایط پایدار قرار می‌گیرد، مقدار شار جرمی با نرخ بارگذاری مواد جامد^۲ به ته‌نشینی برابر است و نقطه ۲ نشان‌دهنده مقدار واقعی MLSS در حوض هوادهی است. شکل ۴- b عملکرد حوض زلال‌ساز بر اساس جریان ورودی به آن را نشان می‌دهد که در این شکل نقاط ۱، ۲ و ۳ واقع در روی خط

در راکتور هوادهی برحسب گرم در لیتر است و شار جرمی طبق تعریف به شرح زیر حاصل شد

$$G_s = c * 9.568 \exp(-0.547c) \quad (19)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بحث و بررسی نقطه وضعیت (ثابت):

نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که عوامل مختلفی موجب تغییر کیفیت پساب خروجی از ته‌نشینی نهایی می‌شود که یکی از آنها میزان بارگذاری آلودگی از طریق دبی ورودی به حوض ته‌نشینی است که این شاخص با تقسیم دبی ورودی به سطح مقطع حوض بیان شده و به صورت نسبت Q_{in}/A نشان داده شده است و در منحنی شارگرانشی حاصل از داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش (معادله ۱۹) که در آن خط قائم شار جرمی برحسب کیلوگرم بر مترمربع در ساعت و خط افقی غلظت

² Solid Loading Rate (SLR)

¹ OverFlow Rate



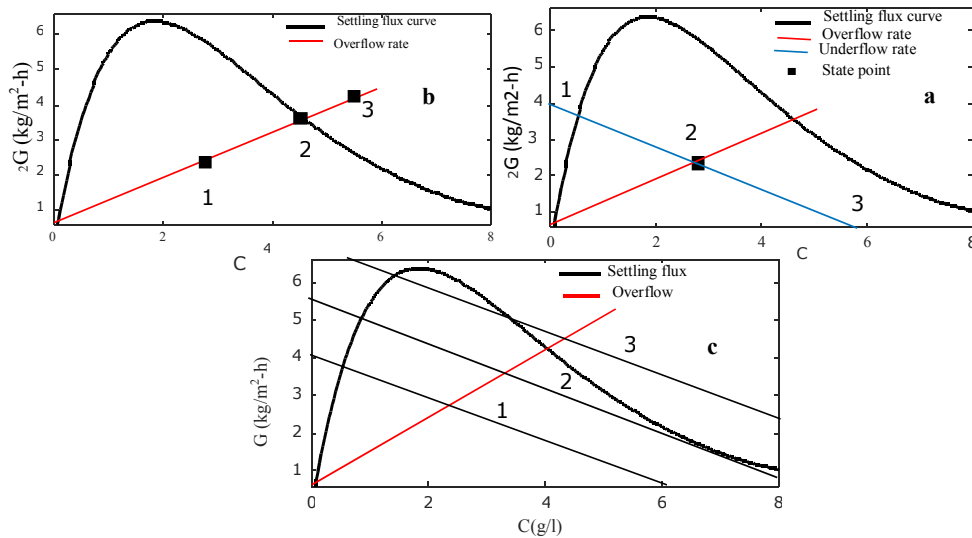


Fig. 4. a) State point analysis (SP), b) Diagnosis of clarifier performance based on inlet flow line, c) Performance detection based on return sludge (reference: research findings)

شکل ۴- a) تجزیه و تحلیل نقطه وضعیت (SP)، b) تشخیص عملکرد زلال‌ساز بر اساس خط جریان ورودی و c) تشخیص عملکرد بر اساس برگشت لجن (مرجع: یافته‌های پژوهش)

خط جریان خروجی از حوض ته‌نشینی با محور Xها به دست می‌آید و همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است با افزایش مقدار غلظت مواد جامد معلق مخلوط، نرخ بار مواد جامد معلق افزایش یافته و نقطه (SP) بالا و راست حرکت می‌کند (شکل ۵- b).

نرخ برگشت لجن به صورت درصدی از جریان ورودی به سیستم بیان می‌شود و مقدار آن بر اساس میزان جریان برگشتی و غلظت آن تعیین می‌شود. اگر سایر پارامترها ثابت نگه داشته شود، با افزایش نرخ جریان لجن برگشتی، مقدار لجن و نرخ جریان آن زیاد می‌شود، بنابراین شیب خط جریان خروجی، افزایش یافته و انتظار می‌رود غلظت لجن کاهش یابد. اگر شیب خیلی کم شود، این خط به منحنی شار جرمی مماس شده و شرایط بحرانی برای سیستم به وجود می‌آید و این امر در کاهش بیش از حد لجن برگشتی برای حوض ته‌نشینی رخ می‌دهد (شکل ۵- c).

بنابراین با انتخاب نقطه بهینه از روی شکل ۵ بر اساس پارامترهای ورودی تصفیه‌خانه فاضلاب و شرایط آب و هوایی، سطح مقطع بهینه برای طراحی مدول‌های در دست توسعه با استفاده از معادله $A = \frac{MLSS \cdot Q_{in}}{G_0}$ به دست می‌آید که G_0 شار معادل MLSS حوض هوادهی است. همچنین از این نقطه برای کنترل فرایند برای مدول‌های در دست بهره‌برداری استفاده می‌شود.

بار سطحی به ترتیب نشان‌دهنده شرایط بارگذاری کم، بحرانی و بیش از ظرفیت سیستم است. سه خط ترسیمی نمودار شار ته‌نشینی در شکل ۴- c شرایط بارگذاری حوض ته‌نشینی ثانویه از طریق برگشت لجن را نشان می‌دهد که خطوط ۱، ۲، و ۳ به ترتیب بیانگر وضعیت عادی، بحرانی و بارگذاری بیش از ظرفیت است.

۳-۲- بررسی تأثیر تغییرات جریان ورودی، غلظت لجن برگشتی و مقدار لجن برگشتی به نقطه وضعیت (SP)

یکی از اهداف اصلی و مهم این پژوهش کنترل فرایند با استفاده از میزان لجن برگشتی و غلظت آن بود که در راهبری تصفیه‌خانه‌های فاضلاب از پارامترهای قابل کنترل است، با استفاده از مدل ارائه شده در معادله ۱۹ و ترسیم نمودار آن با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، شکل ۵ حاصل شد که تغییرات جریان ورودی، لجن برگشتی و غلظت از a تا c مورد تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۵- a، اگر مقدار جریان ورودی به حوض ته‌نشینی ثانویه تغییر یابد شیب خطوط بار سطحی و بار خروجی از کف حوض تغییر یابد و در صورت افزایش بار وارده به سیستم، شار جرمی افزایش خواهد یافت و نقطه وضعیت به سمت بالا حرکت می‌کند، همچنین با کاهش مقدار جریان ورودی نقطه حالت به سمت پایین انتقال می‌یابد. مقدار غلظت مواد جامد معلق مایع مخلوط از محل تقاطع



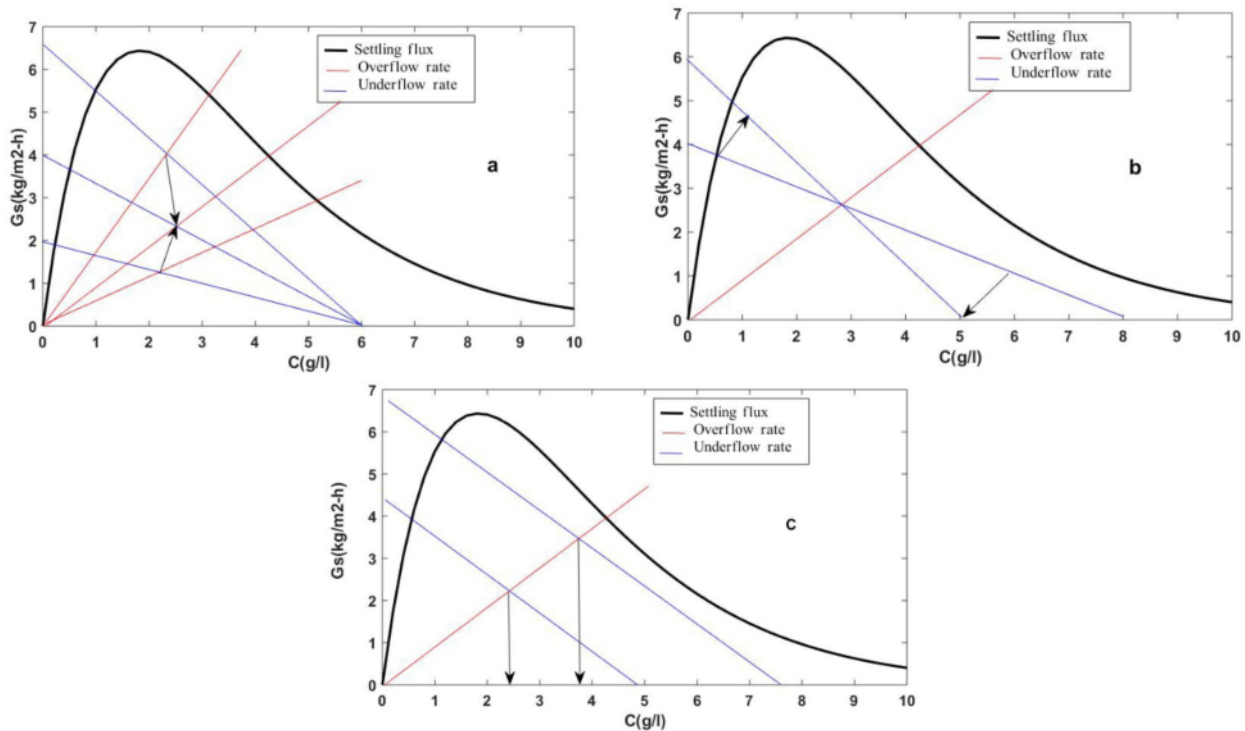


Fig. 5. a) Impact of inlet flow to sedimentation pond b) Impact of concentration, c) Impact of return flow (reference: research findings)

شکل ۵- (a) تأثیر جریان ورودی به حوض ته‌نشینی، (b) تأثیر غلظت و (c) تأثیر جریان برگشتی (مرجع: یافته‌های پژوهش)

با برازش منحنی بر اعداد حاصل برای یک غلظت ثابت، منحنی‌های هم غلظت مطابق شکل ۶-ا حاصل شد و با تعیین بیشترین شیب خط ترسیمی از این نمودارها در سه نقطه متوالی، سرعت‌های مربوط به ته‌نشینی ذرات برای غلظت مربوطه محاسبه شد که منحنی آن در شکل ۶-ب ترسیم شده است و طبق تعریف از حاصل ضرب سرعت در غلظت مربوطه، شار جرمی مانند، به دست آمد و نتایج آن در شکل ۶-ج رسم شده است. برای کالیبره کردن مدل بر اساس مشخصات مندرج در جدول ۱، فاز اول تصفیه‌خانه مورد بررسی، با ۸ واحد ته‌نشینی ثانویه به شکل دایره‌ای و به قطر ۱۸ متر و با سطح مقطع ۲۵۴ مترمربع احداث و وارد مدار بهره‌برداری شده است. یک واحد از ته‌نشینی ثانویه از مدار بهره‌برداری خارج شد، در این حالت بار وارده به زلال‌سازی بیش از ظرفیت شد و در این حالت، طبق شکل ۶-ج، نقطه بهینه بهره‌برداری SP به بالای منحنی شار گرانشی انتقال یافت و پتوی لجن بالا آمد و شار اعمال شد که به طور مستقیم به غلظت MLSS مرتبط است کاهش یافت. بعد از کاهش شار اعمال شده، سیستم با غلظت

۳-۳- تفسیر ته‌نشینی توده‌های لجن در انجام آزمایش

مطابق با شکل ۳-ب، در حین ته‌نشینی ذرات، نواحی مختلف مشاهده شد، به این ترتیب که در ناحیه B غلظت اولیه $C=C_0$ حفظ شده و ذرات تقریباً با سرعت یکنواخت ته‌نشین می‌شوند و موجب زلالی‌بخش فوقانی استوانه می‌شوند. با گذشت زمان امتداد این ناحیه توسعه یافته (ناحیه A) و زیر این دو ناحیه، دو ناحیه دیگر توسعه پیدا کرد، ذراتی که به کف حوض رسیدند به دلیل برخورد به یک مانع کف موقعیت ثابتی یافته و روی هم انباشته شدند (ناحیه D) و در فاصله بین ناحیه D-C، غلظت دقیقاً زیر ناحیه B مقداری کمتر از غلظت ناحیه C و غلظت ذرات دقیقاً بالای ناحیه D کمی بیشتر از غلظت ناحیه C شد. این امر موجب حرکت ذرات از ناحیه D به سمت بالا شد و با پیشرفت زمان این پدیده و اندرکنش بین لایه‌ها جریان در لایه‌های مختلف به سمت‌های بالا و پایین رخ می‌دهد و به گونه‌ای که در زمان $t=t_3$ ، ناحیه B و در زمان $t=t_5$ ، ناحیه C، محو شده و این روند در ارتفاع‌های مختلف تکرار و برای هر زمان $C=C_i$ ، $t=t_i$ اندازه‌گیری و ثبت شد.



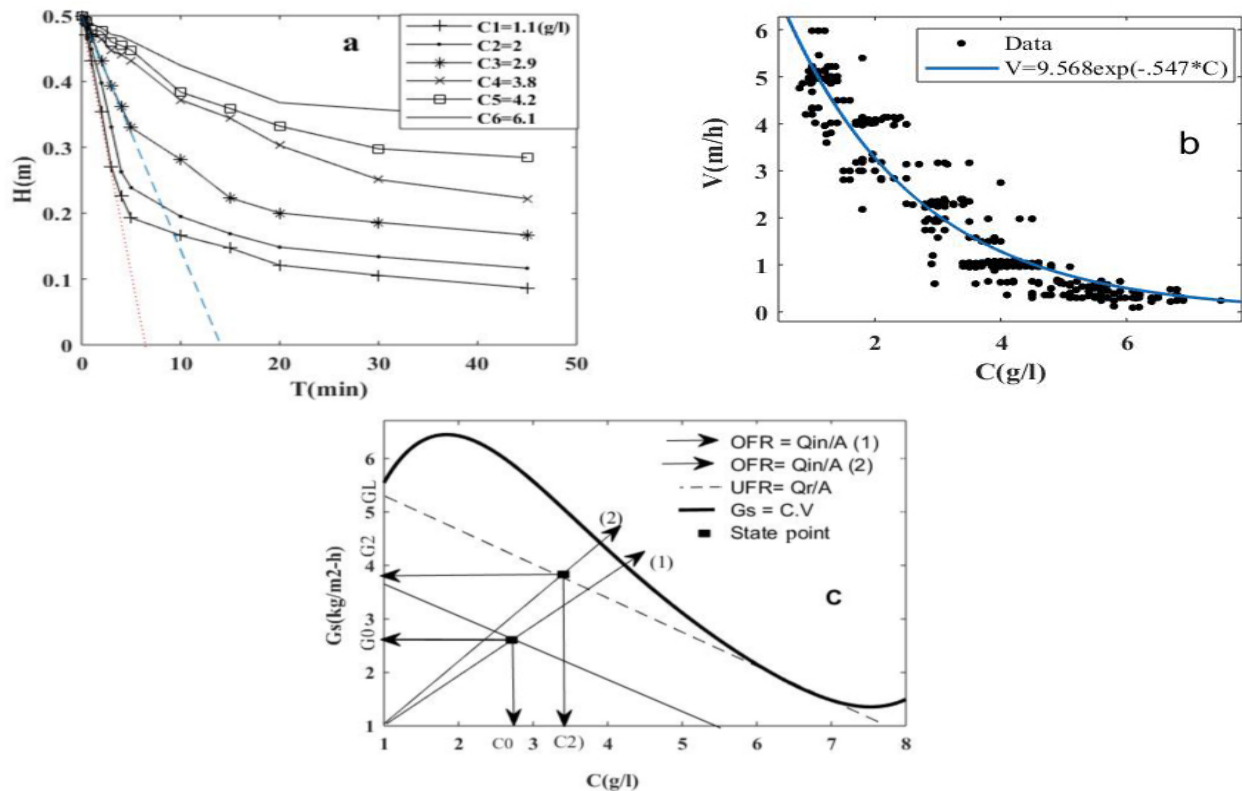


Fig. 6. a) Sediment column height with respect to time at different concentrations, b) Particle sedimentation rate changes with respect to concentration, c) Mass flux changes with particle concentration (reference: research data)
 شکل ۶- a) ارتفاع ستون ته‌نشینی نسبت به زمان در غلظت‌های مختلف، b) تغییرات سرعت ته‌نشینی ذرات نسبت به غلظت،
 c) تغییرات شار جرمی نسبت به غلظت ذرات (مرجع: یافته‌های پژوهش)

ارائه شده در این پژوهش، با تعیین شار جرمی حد، می‌توان شوک‌های احتمالی وارده بر سیستم را کنترل کرد و از تخلیه غیرمجاز فاضلاب خام ممانعت به‌عمل آورد.

- کارایی تصفیه‌خانه را با استفاده از نمودارهای حاصل از این پژوهش می‌تواند به حد ماکسیمم نزدیکتر کرد که این امر منجر به کاهش قابل توجه آلودگی‌های منابع آبی پذیرنده می‌شود.

- مدل ارائه شده در این پژوهش برای محاسبه سرعت ته‌نشینی برای نواحی ته‌نشینی و تغلیظ کاربرد دارد و در صورتی که مدل آقای ویلند فقط برای ناحیه ته‌نشینی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- یکی دیگر از مزایای استفاده از نتایج پژوهش‌ها، ارتقای ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها بدون توسعه تأسیسات و صرف هزینه‌های سنگین است.

- در این پژوهش شرایط واقعی بهره‌برداری تصفیه‌خانه فاضلاب

MLSS پایین‌تر و پتوی لجن بالاتر تثبیت شد. بر اساس مدل حاصله و با توجه به شکل ۶- c مقدار شار حد $G_1 = 3/5$ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت است و حداکثر بارگذاری که سیستم در شرایط بحرانی قرار می‌گیرد، طبق معادله $A = (mlss * Q_{in}) / G_0$ ، $A = 296$ مترمکعب در ساعت است و میزان لجن برگشتی به ۵۰ درصد با غلظت $7/6$ می‌رسد در این حالت می‌توان با کاهش غلظت لجن‌برگشتی و حفظ مقدار آن سیستم را کنترل کرده و از تخلیه غیرمجاز بار اضافی به محیط پذیرنده ممانعت کرد و الزامات استانداردها را رعایت کرد.

۴- نتیجه‌گیری

- با استفاده از روش شار جرمی سطح مقطع بهینه حوض ته‌نشینی ثانویه قابل محاسبه است.

- در بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها با استفاده از روش‌های پویای

- توسعه این روش در تصفیه‌خانه‌های دیگر می‌تواند در بازنگری نشریات و استانداردهای مرتبط با طراحی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مورد عمل قرار گیرد.

۵- قدردانی

از جناب آقای مهندس شقاقی بابت حمایت معنوی برای انجام پژوهش و از کلیه کارشناسان آزمایشگاه تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک غرب برای همکاری در انجام آزمایش‌ها کمال تشکر را داریم.

مورد بررسی در نظر گرفته شد و نتایج آزمایش نشان داد که می‌توان برای غلظت‌ها مختلف، استراتژی‌های کنترلی و بهره‌برداری مختلف اتخاذ کرد.

- نظر به اینکه سطح مقطع حوض ته‌نشینی ثانویه در مرحله طراحی با استفاده از بار سطحی توسط مهندسين مشاور محاسبه می‌شود در نتیجه نقطه بهینه طراحی از این طریق نادیده گرفته شده و در امر بهره‌برداری مشکلاتی را موجب می‌شود که این مشکل را می‌توان با روش‌های پیش‌گفته برطرف کرد.

References

- Buratto, B., Usher, S. P., Parris, D. & Scales, P. J. 2014. Wall effects during settling in cylinders. *Colloids Surfaces, A*, 449, 157-169.
- Bürger, R., Diehl, S., Faras, S., Nopens, I. & Torfs, E. 2013. A consistent modelling methodology for secondary settling tanks: a reliable numerical method. *Water Science and Technology*, 68(1), 192-208.
- Clercq, D. 2003. Computational fluid dynamics of settling tanks: development of experiments and rheological, settling, and scraper submodels. Ph.D Thesis, University of Gent, Applied Biological Sciences, Ghent, Belgium.
- David, R., Vasel, J. L. & Wouwer, A. V. 2009b. Settler dynamic modeling and MATLAB simulation of the activated sludge process. *Chemical Engineering Journal*, 146(2), 174-183.
- De Clercq, J., Nopens, I., Defrancq, J. & Vanrolleghem, P. A. 2008. Extending and calibrating a mechanistic hindered and compression settling model for activated sludge using in-depth batch experiments. *Water Research*, 42(3), 781-791.
- Diehl, S. 2007. Estimation of the batch-settling flux function for an ideal suspension from only two experiments. *Chemical Engineering Science*, 62, 4589-4601.
- Kinner, D. J. 2002. Biological solids sedimentation: a model incorporating fundamental setting parameters. Ph.D. Thesis, University of Utah, Utah, USA.
- Scott, K. J. 1966. Mathematical models of mechanism of thickening. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 5(1), 109-113.
- Takács, I., Vanrolleghem, P. A., Wett, B., Murthy, S. 2007. Elemental balance based methodology to establish reaction stoichiometry in environmental modelling. *Water Science and Technology*, 56(9), 37-41.
- Vesilind P. A. 1968. The influence of stirring in the thickening of biological sludge. Ph.D. Thesis, The University of North Carolina at Chapel Hill, USA.
- Zhang, D., Li, Z., Lu, P., Zhang, T. & Xu, D. 2006. A method for characterizing the complete settling process of activated sludge. *Water Research*, 40, 2637-2644.

