

# راهکارهای تجربی ارتقای کارایی هیدرولیکی برکه‌های تثبیت در مقیاس آزمایشگاهی

مرضیه طاهرزاده<sup>۱</sup>، حسین گنجی دوست<sup>۲</sup>، بیتا آیتی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار، مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۱/۱۵

پیام نگار: Ayati\_bi@modares.ac.ir

## چکیده

در این تحقیق با بررسی عوامل تاثیرگذار بر عملکرد هیدرولیکی برکه‌های تثبیت در مقیاس آزمایشگاهی، راهکارهایی به منظور افزایش کیفیت فاضلاب خروجی ارائه شده است. بنابر نتایج به دست آمده، مقایسه هندسه سه نوع برکه نشان داد که زمان وقوع جریان میان بر در برکه تیغه‌گذاری شده، نسبت به برکه‌ای با ورودی چندراهه و تکراره بیش از ۱۱۵ دقیقه (در مدت زمان ۵ ساعت) به تعویق افتاد. بنا بر نتایج آزمایش‌های ردیابی، استفاده از ورودی چندراهه در برکه و تیغه‌گذاری آن، به بهبود عملکرد هیدرولیکی انجامیده و جریان را به حالت آرامی نزدیک کرد. میزان حجم موثر برکه در حالت تیغه‌گذاری شده، ۷۵ تا ۸۰ درصد در برکه‌ای با ورودی چندراهه ۶۰ درصد به دست آمد. تیغه‌گذاری برکه حدود ۴۰ درصد کارایی هیدرولیکی و بیش از ۳۰ درصد بازده بیولوژیکی را افزایش داد. با بررسی کارایی بیولوژیکی (زیستی) در شرایط بی‌هوازی، برکه تیغه‌گذاری شده و با ورودی چندراهه، به ترتیب، ۷۲ و ۶۶ درصد COD ورودی را حذف کردند.

**کلیدواژه‌ها:** کارایی هیدرولیکی، حجم موثر، عدد پراکندگی، جریان قالبی، آزمایش ردیابی، بازده حذف COD

## ۱- مقدمه

است این سامانه‌ها گاهی نیز به مشکلاتی دچار شوند و فاضلاب آنها دچار افت کیفیت شود. وقوع جریان میان‌بر و خروج زود هنگام فاضلاب قبل از طی مدت زمان ماند مورد نیاز برای حذف آلاینده‌ها، عدم توزیع مناسب فاضلاب ورودی در برکه و کاهش حجم آن ناشی از وجود مناطق مرده، از جمله شایعترین مشکلات برکه‌های تثبیت به‌شمار می‌آیند که از رژیم هیدرولیکی نامناسب جریان درون برکه‌ها ناشی می‌شود [۲]. عوامل متعددی از جمله کاربرد تیغه و مانع [۳ و ۴]، پست و بلند برکه [۵]، کاشت گیاه [۵]، نوع

برکه‌های تثبیت از جمله ساده‌ترین سامانه‌های تصفیه فاضلاب به‌شمار می‌آیند که در جوامع کوچک و بزرگ در حکم گزینه‌ای اقتصادی و مقرون به صرفه به‌کار گرفته می‌شوند. از جمله مزایای آنها می‌توان به بازده مناسب در حذف ریزاندامگانهای بیماری‌زا و شوک‌پذیری در برابر مواد سمی و بارهای آلی و هیدرولیکی اشاره کرد [۱]. علیرغم راهبری ساده و آسان برکه‌های تثبیت، ممکن

\* تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

$$\sigma = \left( \frac{\sigma_t}{t_{mean}} \right)^2 = 2D - 2D^2(1 - e^{-1/D}) \quad (3)$$

تکستون<sup>۳</sup> و همکاران [۳] نیز در سال ۱۹۸۷ رابطه (۴) را برای تعیین (e)، نسبت حجم موثر برکه (V<sub>effective</sub>) به حجم کل برکه (V<sub>total</sub>)، با استفاده از مدت زمان ماند سیستم ارائه دادند. در این رابطه (t<sub>n</sub>) مدت زمان ماند اسمی برکه است:

$$e = \frac{t_{mean}}{t_n} = \frac{V_{effective}}{V_{total}} \quad (4)$$

پرسون<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۱۹۹۹ [۱۴] با در نظر گرفتن نسبت حجم موثر و تعداد معادل مخزنهای پشت سرهم (CSTRها) رابطه (۵) را ارائه دادند که در آن N تعداد معادل مخزنهای پشت سرهم (CSTRها)، و مقدار آن از رابطه (۶) قابل محاسبه است. باید گفت که در رابطه (۵)، (t<sub>p</sub>) زمان وقوع اتصال کوتاه است.

$$\lambda = e \left( 1 - \frac{1}{N} \right) = \left( \frac{t_{mean}}{t_n} \right) \left( 1 - \frac{t_{mean} - t_p}{t_{mean}} \right) = \frac{t_p}{t_n} \quad (5)$$

$$N = \left( \frac{\sigma}{t_n} \right)^{-2} \quad (6)$$

عبارت اول، رابطه (۵) مربوط به حجم موثر و عبارت دوم آن مربوط به تعداد CSTRهای پشت سرهم است. مقدار هر دو عبارت بین صفر تا یک متغیر است. عبارت نهایی λ (کارایی هیدرولیکی) همان نسبت غلظت خروجی بیشینه به زمان ماند اسمی سیستم است، که هر دو را براحتی می‌توان محاسبه کرد. پرسون در سال ۲۰۰۰ [۱۲] بر روی چند برکه با آرایشهای مختلف ورودی و خروجی و ابعاد متفاوت و توپوگرافی (پست و بلند زمینی) مختلف، بررسی‌هایی را انجام داد و عملکرد برکه‌ها را از نظر هیدرولیکی جریان مورد ارزیابی کرد. این بررسی‌ها نشان داد که بهره‌گیری از ورودی چند راهه به جای تک راهه موجب افزایش کارایی هیدرولیکی برکه، و در نهایت بهبود کارایی بیولوژیکی (زیستی) آن می‌شود. تیغه‌گذاری برکه تاثیر

جریان [۶]، محل قرارگیری ورودی و خروجی [۸ و ۷]، عمق، نسبت طول به عرض، مناطق مرده و راکد [۹]، وزش باد [۱۰]، و دما [۱۱] بر عملکرد هیدرولیکی برکه تاثیر می‌گذارند. یکی از روشهای رایج بررسی عملکرد هیدرولیکی برکه‌ها، مطالعات ردیابی یا رنگ‌سنجی است. در این روش، از یک ماده ردیاب برای تعیین نوع رژیم جریان هیدرولیکی غالب در برکه استفاده می‌شود. به این ترتیب که با تزریق ردیاب به صورت یکباره و یا به صورت پیوسته در ورودی برکه و اندازه‌گیری غلظت آن در محل خروجی می‌توان پارامترهای هیدرولیکی برکه، چون مدت زمان ماند واقعی، حجم موثر، بازده هیدرولیکی، تعداد واکنشگاههای بهم پیوسته (مخزنهای پشت سر هم)، عدد پراکندگی را به دست آورد [۱۲]. غلظت ماده ردیاب در خروجی به صورت یک تابع توزیع ترسیم می‌شود، از این رو رژیم‌های مختلف جریان، تابع توزیع مدت زمان ماند متفاوتی خواهند داشت [۱۳]. از جمله نتایج مطالعات ردیابی می‌توان به تعیین مدت زمان ماند، عدد پراکندگی<sup>۱</sup> و زمان وقوع جریان میان‌بر اشاره کرد. به‌طور کلی، توزیع زمان ماند با انحراف معیار زیاد، نمایانگر وجود جریان‌های میان‌بر و یا مناطق با گردش مجدد جریان است (به این معنی که ماده ردیاب یا خیلی زود و یا خیلی دیر به خروجی می‌رسد). باید گفت که واریانس توزیع زمان ماند برای جریان قالبی معادل صفر است، بنابراین جریان قالبی و حجم موثر بیشینه، لازمه رسیدن به کارایی هیدرولیکی مطلوب برای برکه‌اند [۱۴]. محققان تاکنون روابط متعددی برای تعیین نوع رژیم حاکم بر برکه، با استفاده از توزیع زمان ماند بیان کرده‌اند. لونسپیل<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۲ [۱۵] رابطه (۱) را برای تعیین زمان ماند واقعی سیستم با استفاده از خروجی آزمایشهای ردیابی ارائه داد. وی همچنین رابطه‌های (۲) و (۳) را ارائه کرد تا بین عدد پراکندگی با مدت زمان ماند و واریانس تابع توزیع آلاینده رابطه‌ای برقرار کند که در آن (t) زمان نمونه برداری، (C) غلظت نمونه، مدت زمان ماند واقعی برکه، (σ) واریانس تابع توزیع زمان ماند و (D) عدد پراکندگی است:

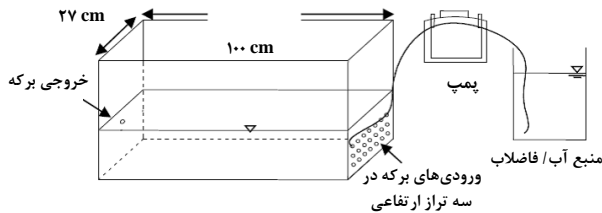
$$t_{mean} = \frac{\sum C * t}{\sum C} \quad (1)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum t^2 * C}{\sum C} - t_{mean}^2 \quad (2)$$

3. Thackston  
4. Persson  
5. Continuously Stirred Tanks Reactors

1. Dispersion Number  
2. Levenspiel

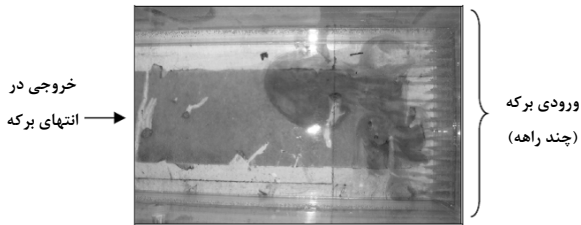
و غلظت خروجی برداشت شود [۱۶]، پس با توجه به مدت زمان انجام آزمایش و امکانات موجود، مدت زمان ماندهای ۳ و ۵ ساعت و دبی‌های ۱۵۸ و ۹۵ میلی‌لیتر بر دقیقه برای هر سه نوع برکه در نظر گرفته شد و آزمایش‌های ردیابی به منظور تعیین اثر نرخ جریان در پارامترهای هیدرولیکی برکه، همزمان با تغییر شکل هندسی آن انجام شد (شکل (۳)) که در ادامه به تفکیک ارائه خواهند شد:



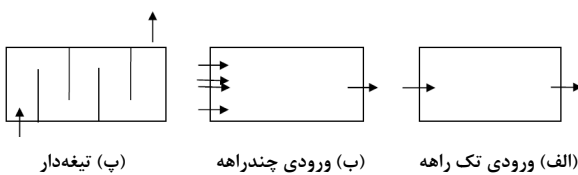
شکل ۱. طرح شکلی سامانه به کار رفته در تحقیق.

## ۲- مواد و روشها

در این تحقیق، مطالعات ردیابی روی مدل فیزیکی از جنس پلکسی گلاس و با نسبت تقریبی طول به عرض ۳/۵ به ۱ انجام و از متیل اورانژ به عنوان ماده ردیاب استفاده شد. برای بررسی تاثیر ارتفاع ورودی و خروجی بر رژیم هیدرولیکی برکه، محل ورود جریان در سه تراز ارتفاعی بالا، وسط و پایین در نظر گرفته شد (شکل (۱)). باید گفت که در این آزمایشها، ورود جریان به صورت چند راهه در هر تراز ارتفاعی انجام می‌گیرد و محل خروجی‌ها در سطح آزاد برکه بوده است. ارتفاع آب و فاضلاب در برکه نیز ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. در این مطالعه عمق و دبی جریان ثابت است و جریان با بهره‌گیری از پمپ به برکه وارد و ماده ردیاب بصورت لحظه‌ای به جریان ورودی برکه تزریق، سپس در فواصل زمانی مشخص، غلظت ردیاب در خروجی برکه اندازه‌گیری می‌شود. نمایی از آزمایشهای ردیابی را در شکل (۲) مشاهده می‌کنید. در ادامه، میزان جذب نمونه در طول موج جذب بیشینه متیل اورانژ ( $\lambda=464\text{nm}$ ) توسط دستگاه طیف-نورسنج قرائت و با استفاده از رابطه منحنی استاندارد آن، غلظت نمونه تعیین می‌شود. با در دست داشتن غلظت خروجی، توابع توزیع زمان ماند به ازای هر کدام از حالت‌های برکه ترسیم می‌شود و پارامترهای هیدرولیکی زمان ماند واقعی برکه، تعداد CSTRها، حجم موثر برکه، زمان وقوع جریان میان‌بر، عدد پراکندگی و کارایی هیدرولیکی برکه بررسی می‌شود. از آنجا که آزمایشهای ردیابی باید ۲ تا ۵ برابر مدت زمان ماند برکه ادامه داشته



شکل ۲. نمایی از انجام آزمایشهای ردیابی در برکه با ورودی چند راهه.



شکل ۳. تغییرات اعمال شده در برکه برای تعیین بهترین جریان.

در مرحله بعد تحقیق، با بهره‌گیری از لجن تصفیه خانه فاضلاب شهری، کارایی بیولوژیکی (زیستی) این برکه‌ها (در شرایط بی‌هوازی) نیز ارزیابی شد. به این ترتیب که حدود یک سوم برکه با لجن غلیظ با  $\text{TSS}=8000\text{ mg/L}$  و مابقی توسط فاضلاب سنتز شده (شامل قند، اوره و هیدروژن پتاسیم فسفات) پر شد و به صورت پیوسته از طریق همان فاضلاب با دبی ۱۹ میلی‌لیتر بر دقیقه

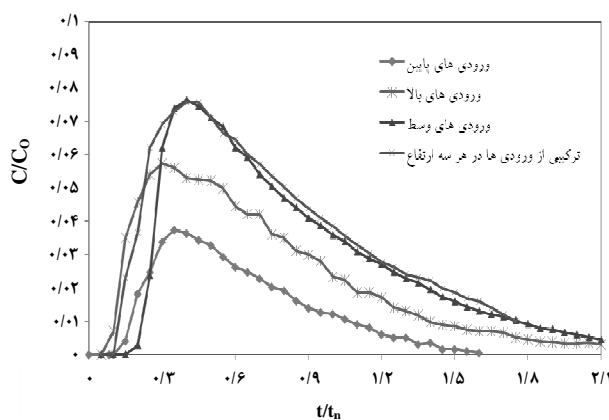
فنالات، پتاسیم دی کرومات برای تهیه محلول‌های هضم و کاتالیست به منظور اندازه‌گیری COD.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱ بررسی تاثیر ارتفاع ورودی و خروجی بر رژیم

#### هیدرولیکی برکه و وقوع جریان میان بر

نتایج آزمایشهای ردیابی به صورت شکل عینی شده غلظت- زمان برای تعیین میزان تاثیر ارتفاع ورودی و خروجی بر رژیم جریان برکه در شکل (۴) مشاهده می‌شود.



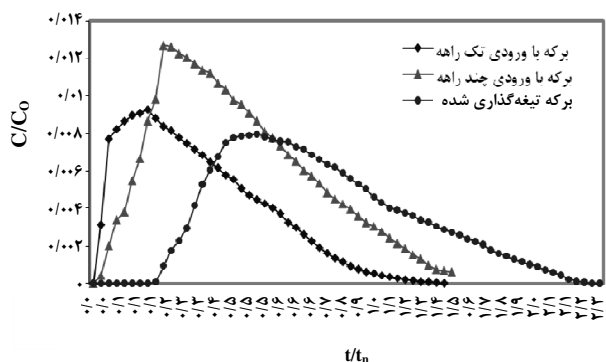
شکل ۴. نتایج آزمایش ردیابی به منظور تعیین اثر ارتفاع ورود جریان بر وضعیت هیدرولیکی برکه.

تشابه رفتاری توابع توزیع مدت زمان ماند، نشان می‌دهد که ارتفاع تاثیر زیادی در تغییر نوع رژیم حاکم بر جریان برکه ندارد مگر این که جریان دقیقاً از مجاورت کف برکه وارد شود که در حیطه این تحقیق نبوده است. با مقایسه دقیق تر توابع توزیع زمان ماند برای ترازهای مختلف ورودی، ملاحظه می‌شود که زمان وقوع جریان میانبر برای ورودی‌های پایین، وسط، بالا و ترکیب ورودی‌ها در سه تراز به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۴۲، ۰/۳ و ۰/۴ زمان ماند است. بنابراین، در ورودی‌های تراز بالا (که ورودی و خروجی در یک ارتفاع قرار داشتند) زمان ظهور غلظت بیشینه ردیاب در خروجی کمتر است و در نتیجه جریان میانبر زودتر از حالت‌های دیگر اتفاق می‌افتد. از این رو، به منظور به تعویق انداختن زمان وقوع جریان میانبر بهتر است از قرار دادن ورودی و خروجی برکه در یک تراز ارتفاعی

آزمایش شد. با توجه به محدوده بارگذاری حجمی برکه‌های بی‌هوای  $160 \text{ grCOD/m}^3 \cdot \text{d}$  تا  $500 \text{ grCOD/m}^3 \cdot \text{d}$  [۱۷]، برای هر سه نوع برکه (شکل (۳)) فاضلابی با بار حجمی معادل  $160 \text{ grCOD/m}^3 \cdot \text{d}$  به برکه وارد شد. همچنین، به منظور بررسی توانایی این نوع برکه‌ها در مقابله با بیشترین بار مجاز، بار حجمی  $530 \text{ grCOD/m}^3 \cdot \text{d}$  اعمال شد و راندمان حذف COD در این شرایط نیز مقایسه شد. با توجه به این که فاضلاب به کار گرفته شده شباهت زیادی به فاضلاب شهری داشت، همزمان با پایدار شدن جریان ورودی و تعادل سیستم (حدود ۱/۵ تا ۲ روز)، مدت زمان لازم برای سازگاری ریزاندامگانه‌ها نیز تامین شد. در ادامه، برای بررسی روند تصفیه فاضلاب و تعیین میزان حذف COD از خروجی برکه در فواصل زمانی مشخص، نمونه‌گیری انجام شد. هر یک از آزمایشهای زیستی به مدت زمان ۶ تا ۷ روز طول کشید و بازده حذف COD روزانه اندازه‌گیری شد. باید گفت که کلیه آزمایشها براساس روش‌های استاندارد انجام شد [۱۸]. همچنین، تجهیزات به کار گرفته شده برای انجام آزمایشها و تعیین پارامترهای اصلی در این تحقیق به شرح زیر بودند: COD راکتور هک<sup>۱</sup> با ۱۶ جا لوله ای به منظور اندازه گیری COD، طیف- نورسنج DR4000 ساخت شرکت هک، طیف- نورسنج مدل Conc-Varian50 ساخت شرکت کری<sup>۲</sup> برای تعیین میزان جذب نمونه‌ها، pH متر مترام<sup>۳</sup> و سانترفوژ مدل CE145 ساخت شرکت شیمی فن برای جداسازی ذرات معلق و کلوئیدی از محلول، پمپ پرستالتیک 5001sp-quick ساخت شرکت هایدولف برای ورود جریان پیوسته به برکه و شیلنگ از جنس تایگون<sup>۴</sup> با ضخامت دیواره ۳ و قطر ۱/۶ میلی‌متر، ترازو مدل PLS360 ساخت شرکت کرن<sup>۵</sup> برای توزین مواد، آون برای خشک کردن مواد و قیف بوخنر به منظور اندازه گیری TSS لجن.

ترکیبات شیمیایی محصول مرک<sup>۶</sup> به کار رفته در این تحقیق عبارتند از: متیل اورانژ (ماده ردیاب)، قند (منبع کربن)، اوره (منبع نیتروژن)، فسفات دی هیدروژن پتاسیم (منبع فسفر)، جیوه سولفات، نقره سولفات، سولفوریک اسید، هیدروژن پتاسیم

1. Hach
2. Cary
3. Metrohm
4. Tygon
5. Kern
6. Mreck



شکل ۶. توابع توزیع مدت زمان ماند ۵ ساعته برکه‌های مختلف.

در مجموعه سوم آزمایشها، برکه توسط چهار تیغه عرضی به طول تقریبی ۲۰ سانتیمتر (معادل ۷۰ درصد عرض برکه) به قسمتهای مساوی تقسیم شد و با در نظر گرفتن دو مدت زمان ماند ۳ ساعته و ۵ ساعته، آزمایشها ردیابی انجام شد. باید گفت که ورودی در این حالت به صورت چند راهه در نظر گرفته شد. همانطور که ملاحظه می‌شود، بیشینه غلظت در حالت تیغه‌گذاری شده، پس از گذشت مدت زمانی حدود نصف مدت زمان ماند واقعی برکه در خروجی ظاهر شده است.

### ۳-۳ بررسی زمان وقوع جریان میان‌بر و اختلاف مدت زمان

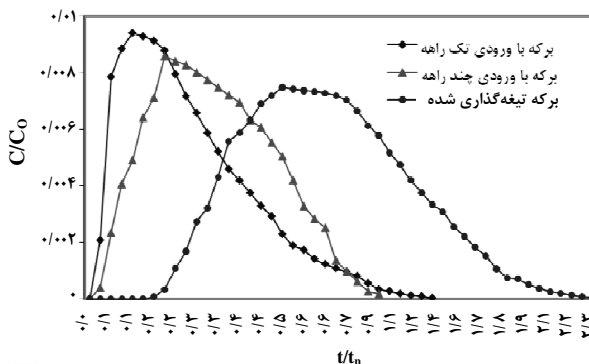
#### ماند واقعی و نظریه برکه با هندسه و زمان‌های ماند متفاوت

از مقایسه توزیع مدت زمان ماند برای سه برکه با هندسه‌های مختلف (و با دو مدت زمان ماند متفاوت) اولین پارامتر مورد بررسی، مدت زمان رسیدن غلظت بیشینه ماده ردیاب به خروجی برکه، یا به عبارتی زمان وقوع جریان میان‌بر است که نتایج حاصل در شکل (۷) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که اتصال کوتاه در برکه با ورودی تک راهه برای مدت زمان ماند ۳ ساعته، پس از گذشت ۲۰ دقیقه و برای مدت زمان ماند ۵ ساعته، پس از گذشت ۳۵ دقیقه از اعمال ردیاب اتفاق افتاده است. در برکه با ورودی چند راهه نیز تحقق اتصال کوتاه برای زمان ماند ۳ ساعته، پس از گذشت ۲۶ دقیقه و برای زمان ماند ۵ ساعته، پس از گذشت ۴۵ دقیقه و در برکه تیغه‌گذاری شده برای زمان ماند ۳ ساعته، پس از گذشت ۸۹ دقیقه، و برای مدت زمان ماند ۵ ساعته، پس از گذشت ۱۵۵ دقیقه از اعمال ردیاب، اتصال کوتاه ایجاد شده است. از سوی دیگر، مقایسه هندسه برکه‌ها نشان می‌دهد که زمان وقوع جریان میان‌بر در برکه تیغه‌گذاری شده، نسبت به برکه‌ای با ورودی چند راهه و تک راهه بیش از ۱۱۵ دقیقه (در مدت زمان ماند ۵ ساعته)

خودداری شود. تحقیقات آگونوامبا<sup>۱</sup> [۱۹] نیز نشان داده که قرارگیری ورودی و خروجی در یک تراز ارتفاعی، به وقوع زود هنگام جریان میان‌بر می‌انجامد. بنا بر نتایج مطالعات خان<sup>۲</sup> و همکاران [۲۰] فاصله فیزیکی محل ورودی و خروجی تاثیر زیادی بر وقوع جریان میان‌بر می‌گذارد.

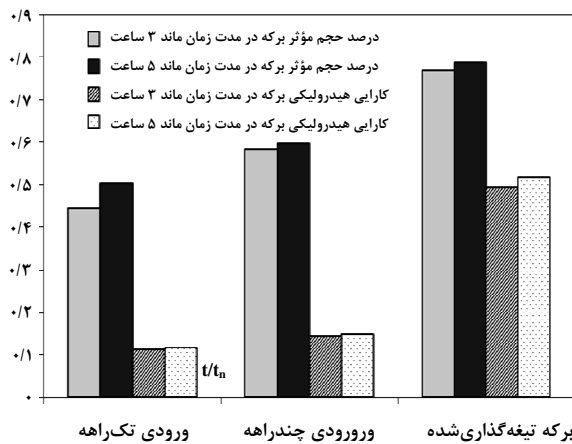
### ۲-۳ بررسی توابع توزیع زمان ماند برکه‌های مختلف

برای سه حالت برکه در سه مجموعه، آزمایش ردیابی با دبی‌های ۱۵۸ mL/min (زمان ماند ۳ ساعت) و ۹۵ mL/min (زمان ماند ۵ ساعت) در تراز ارتفاعی وسط (محل ورودی با توجه به نتیجه بخش ۳-۱) انجام شد که توابع توزیع زمان ماند برای سه برکه در دو زمان به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. در مجموعه اول آزمایشها، ورودی برکه بصورت تک راهه در عرض آن در نظر گرفته شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مدت زمان کوتاهی پس از اعمال ردیاب، بیشینه غلظت آن در خروجی ظاهر و سپس با روند کاهشی در مدت زمانی بیشتر از ۲ برابر زمان ماند واقعی برکه از آن خارج شده است. نتایج بیشتر در خصوص اطلاعات شکل (۵) از جمله زمان اتصال کوتاه، مدت زمان ماند واقعی، حجم موثر برکه و سایر پارامترهای هیدرولیکی در ادامه به تفصیل ارائه و بحث شده است. در مجموعه دوم آزمایشها، ورودی برکه به صورت چند راهه در نظر گرفته شد که نسبت به ورودی تک راهه باعث توزیع یکنواخت‌تر جریان در عرض برکه شد. به همین ترتیب، آزمایش ردیابی برای دو مدت زمان ماند ۳ و ۵ ساعت انجام شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ظهور بیشینه غلظت ردیاب در خروجی، با تأخیر زمانی بیشتری نسبت به ورودی تک راهه صورت گرفته است.



شکل ۷. توابع توزیع مدت زمان ماند ۳ ساعته برکه‌های مختلف.

1. Agunwamba
2. Khan

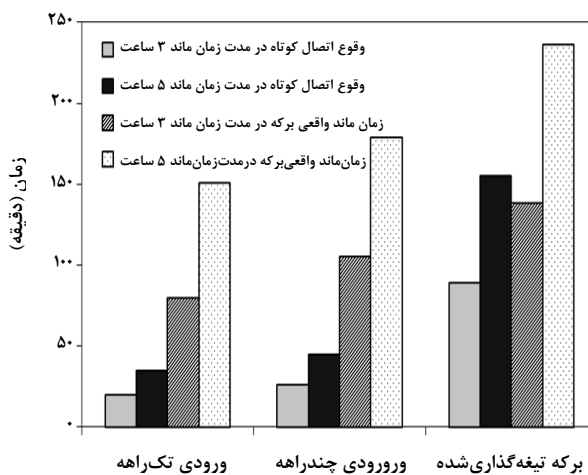


شکل ۸. درصد حجم مؤثر و کارایی هیدرولیکی برکه‌ها با هندسه و مدت زمان‌های ماند متفاوت.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، آشکار می‌شود که در برکه تیغه‌گذاری شده، حدود ۷۵ تا ۸۰ درصد حجم برکه مؤثر و مابقی آن راکد بوده است. همچنین، کمترین میزان حجم مؤثر برای برکه با ورودی تک راهه به دست آمده (حدود ۴۵ تا ۵۰ درصد) که بیانگر ازدیاد مناطق مرده در برکه است. برای برکه با ورودی چند راهه نیز میزان حجم مؤثر برکه حدود ۶۰ درصد به‌دست آمده است. نتایج به‌دست آمده توسط کادلک و همکاران [۲۳]، پرسون و همکاران [۱۴]، پرسون [۱۲] و پرسون و همکاران [۲۴] نیز مشابه مورد بالا است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، پرسون و همکاران [۱۲] رابطه (۵) را برای کارایی هیدرولیکی برکه‌ها ارائه دادند که در آخرین مرحله از فاز هیدرولیکی، با سودجستن از این رابطه و اطلاعات حاصل از آزمایش‌های ردیابی، بازده هیدرولیکی برای تمامی حالت‌های مورد آزمایش محاسبه شد (شکل ۸). بازده هیدرولیکی برای دو مدت زمان ماند ۳ و ۵ ساعت در برکه تیغه‌گذاری شده، به ترتیب، ۰/۴۹ و ۰/۵۱، برای برکه با ورودی چند راهه ۰/۱۴ و ۰/۱۵، و برای برکه‌ای با ورودی تک راهه ۰/۱۱ و ۰/۱۲ به‌دست آمد. با توجه به نتایج بالا، برکه تیغه‌گذاری شده حدود ۴۰ درصد نسبت به برکه با ورودی چندراهه و تک راهه افزایش بازده هیدرولیکی داشته است. در تحقیقات انجام شده توسط پرسون و همکاران [۱۴] و پرسون [۱۲] بازده هیدرولیکی برکه با ورودی چندراهه و برکه تیغه‌گذاری شده تقریباً برابر بوده و نسبت به برکه‌ای با ورودی تک راهه حدود ۶۰ درصد افزایش بازده حاصل شده است.

به تعویق افتاده است که این مقدار در مدت زمان ماند ۳ ساعت بیش از ۶۵ دقیقه بوده است. محققانی مانند شیلتون<sup>۱</sup> [۲۱]، پرسون (۲۰۰۰) [۱۲] و صفی‌الدین<sup>۲</sup> [۲۲] نیز نتایج مشابهی را به دست آورده‌اند.

با توجه به توزیع زمان ماند حاصل از آزمایش‌های ردیابی، زمان ماند واقعی هر کدام از برکه‌ها از رابطه (۱) به دست آمده که نتایج آن در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کمترین اختلاف مدت زمان ماند واقعی و نظری در حالت تیغه‌گذاری شده رخ داده و بیشترین آن مربوط به برکه‌ای با ورودی تک راهه بوده است به طوری که در مدت زمان ماند ۵ ساعت اختلاف زمان ماند واقعی و نظری برای برکه تیغه‌گذاری شده، برکه با ورودی چندراهه و برکه‌ای با ورودی تک راهه به ترتیب ۱۲۰، ۶۴ و ۱۴۸ دقیقه بوده است، و در مدت زمان ماند ۳ ساعت این مقادیر به ترتیب ۷۴، ۴۱ و ۱۰۰ به‌دست آمد. محققانی مانند کادلک<sup>۳</sup> و همکاران [۲۳] و پرسون [۱۲] نیز نتایج مشابهی را ذکر کرده‌اند.



شکل ۷. مدت زمان وقوع جریان میان‌بر و مدت زمان ماند واقعی برکه‌ها با هندسه و زمان‌های ماند متفاوت.

### ۳-۴ مقایسه حجم مؤثر و بازده هیدرولیکی برکه‌ها با هندسه و زمان‌های ماند متفاوت

پس از محاسبه زمان ماند واقعی برکه در حالت‌های مختلف، بر اساس رابطه (۴)، میزان حجم مؤثر در هر کدام از حالت‌ها تعیین شد که نتایج حاصل را در قالب شکل (۸) مشاهده می‌کنند.

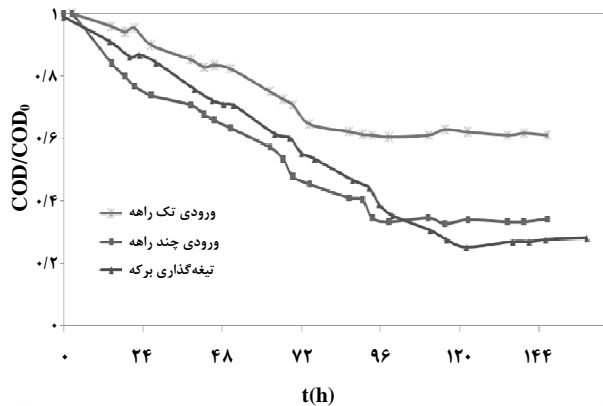
1. Shilton  
 2. Safieddine  
 3. Kadlec

## ۳-۵ مقایسه تعداد CSTR ها و عدد پراکندگی در برکه ها با هندسه و زمان‌های ماند متفاوت

تیغه‌گذاری شده نزدیکترین رژیم به جریان قالبی و برکه با ورودی تک راهه نزدیکترین رژیم به جریان با اختلاط کامل را داشته است. بررسی‌های کادلک و همکاران [۲۳]، شیلتون [۲۱]، شیلتون و همکاران [۲۵] نیز به همین نتایج منتهی شده است.

### ۳-۶ نتایج آزمایشهای بیولوژیکی (زیستی)

پس از بررسی کارایی هیدرولیکی برکه‌ها، عملکرد آنها در فاز زیستی نیز با ورودی‌ها و هندسه‌های متفاوت بررسی شد. در ابتدا، هر سه برکه تحت بارگذاری  $160 \text{ gr COD/m}^3 \cdot \text{d}$  آزمایش شد. فاضلاب سنتز شده به صورت پیوسته به برکه وارد و بازده حذف COD با نمونه‌گیری از خروجی برکه و آزمایش COD اندازه‌گیری شد. نتیجه ناشی از این مرحله تحقیق در شکل (۹) ارائه شده است.



شکل ۹. نتایج آزمایشهای بیولوژیکی (زیستی) با ورودی تک راهه، چندراهه و تیغه‌گذاری برکه ( $160 \text{ mg/L}$  ورودی COD).

همانطور که مشاهده می‌شود، برای برکه‌ای با ورودی تک راهه حذف COD تا روز سوم صورت گرفته و پس از آن به تدریج ثابت و در نهایت حدود ۴۰ درصد از COD اولیه در این شرایط حذف شده است. با توجه به نتایج حاصل از فاز هیدرولیکی و نامناسب بودن جریان در برکه‌ای با ورودی تک راهه، به دست آوردن چنین بازده حذفی دور از انتظار نبوده و خود دلیلی بر نامناسب بودن شکل هندسی برکه و رژیم آن است. برای برکه‌ای با ورودی چندراهه روند حذف COD تا روز چهارم ادامه داشته و پس از آن تقریباً ثابت مانده است. بازده نهایی حذف COD در این شرایط به ۶۶ درصد رسید که نسبت به حالت قبل تفاوت با معنایی داشته و حدود ۲۶ درصد ارتقا

از آنجا که تعداد CSTRها به عنوان پارامتری جهت تعیین نوع رژیم برکه محسوب می‌شود لذا با استفاده از اطلاعات آزمایشات ردیابی و رابطه (۶) تعداد واکنشگاههای بهم پیوسته در هر کدام از برکه‌ها محاسبه شد که نتایج حاصل در جدول (۱) ارائه شد است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تعداد CSTRها در برکه تیغه‌گذاری شده به نسبت سایر حالتها بیشتر بوده و در نتیجه رژیم آن بیشتر به جریان قالبی نزدیک شده و برکه با ورودی تک راهه به دلیل کمترین تعداد CSTR نامناسب ترین نوع جریان (جریان شبیه به جریان اختلاط دار) را داشته است. در مراجع [۲۴، ۱۴ و ۱۲] نیز نتایج مشابهی در این زمینه گزارش شده است.

جدول ۱. عدد پراکندگی و تعداد CSTRها در برکه‌ها با هندسه و مدت زمان‌های ماند متفاوت.

انواع برکه	برکه با ورودی تک راهه	برکه با ورودی چند راهه	برکه تیغه‌گذاری شده
عدد پراکندگی در مدت ماند ۳ ساعت	۱/۲۵	۰/۷۴	۰/۲۵
عدد پراکندگی در مدت ماند ۵ ساعت	۱/۴۱	۰/۹۷	۰/۱۹
تعداد CSTRها در مدت ماند ۳ ساعت	۴۱۴۰۱	۴۷۹۸۴	۱۰۶۸۱۰
تعداد CSTRها در مدت ماند ۵ ساعت	۱۱۲۹۰۵	۱۲۳۱۳۶	۲۳۳۲۱۲

علاوه بر تعداد CSTRها، از عدد پراکندگی نیز به منظور تعیین نوع رژیم برکه استفاده می‌شود که با تعداد CSTRها تناسب عکس دارد. یعنی، هر چه مقدار عدد پراکندگی کمتر باشد جریان به حالت قالبی نزدیکتر و تعداد CSTRها بیشتر خواهد بود. در این مرحله، با بهره‌گیری از رابطه‌های (۲) و (۳) مقدار عدد پراکندگی برای تمامی حالت‌های آزمایش انجام شد (جدول (۱)). از آنجا که هر چه عدد پراکندگی کمتر باشد، رژیم حاکم در برکه به جریان قالبی نزدیکتر خواهد بود، می‌توان نتیجه گرفت که در این مورد نیز حالت

#### ۴- نتیجه‌گیری کلی

با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده، ورودی چند راهه نسبت به ورودی تک راهه به دلیل برخورداری از حجم موثر بیشتر، باعث افزایش کارایی برکه شده بدون این‌که هزینه هنگفتی در برداشته باشد. همچنین، اتصال کوتاه در ورودی چند راهه با تاخیر زمانی بیشتری نسبت به تک راهه رخ داده که این مهم در کیفیت فاضلاب خروجی نقش زیادی دارد. در حالتی که برکه تیغه‌گذاری شده، مقادیر قابل قبول تری برای تمامی پارامترها به نسبت دو حالت دیگر بدست آمده است. نتیجه آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از تیغه در برکه، جریان را به حالت قالبی نزدیکتر کرده و حجم موثر برکه و مدت زمان ماند واقعی آن را افزایش می‌دهد. همچنین، در این شرایط، زمان اتصال کوتاه به تعویق افتاده و در نهایت رژیم هیدرولیکی مناسب‌تری به منظور عمل تصفیه در برکه فراهم می‌آورد. بنابراین، با بهره‌گیری از ورودی چند راهه و قرار دادن تیغه (برای افزایش طول مسیر فاضلاب) در برکه‌های تثبیت می‌توان حجم موثر برکه را بالا برده و میزان مناطق مرده و راکد را محدود کرد تا عمل تصفیه فاضلاب طی مدت زمان بیشتری انجام شود.

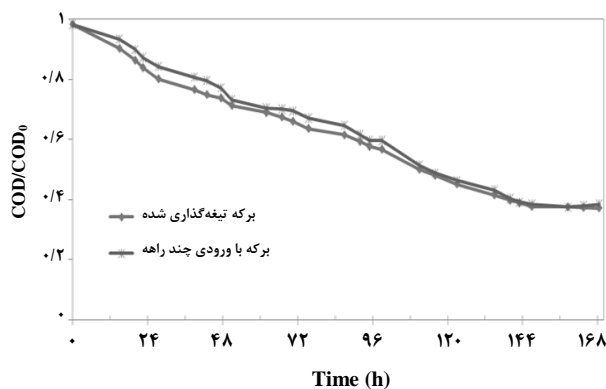
#### ۵- فهرست نمادها

t	زمان نمونه برداری
C	غلظت ماده ردیاب در خروجی برکه
C <sub>0</sub>	غلظت اولیه ماده ردیاب در ورودی برکه
t <sub>mean</sub>	مدت زمان ماند واقعی
σ	واریانس شکل نرمال غلظت - زمان
D	عدد پراکندگی
t <sub>n</sub>	زمان ماند نظری
e	درصد حجم موثر
λ	کارایی هیدرولیکی
N	تعداد واکنشگاههای به هم پیوسته CSTR

#### مراجع

- [1] Mara, D. D., Johnson, M. L., "Waste Stabilization Ponds and Rock Filters: Solutions for Small Communities", Water Sci. Technol. 55 (7): 103-107, (2007).

یافته است. در برکه تیغه‌گذاری شده، بازده حذف COD حدود ۷۲ درصد بوده که نسبت به برکه‌ای با ورودی چندراهه در حدود ۶ درصد و نسبت به برکه با ورودی تک راهه حدود ۳۲ درصد افزایش بازده داشته است. البته، کم بودن نسبی بازده حذف را می‌توان به پایین بودن دمای محیط (فصل زمستان) نسبت داد. باید گفت که نسبت طول به عرض برکه با قرار دادن تیغه از ۳/۵ به ۱، به تقریباً ۵ به ۱ افزایش یافته است. براچو<sup>۱</sup> و همکاران [۲۶] نیز برای ارتقای حذف کلیفرم در برکه‌های تثبیت، از تیغه استفاده کردند و نسبت طول به عرض را از ۹ به ۱ به ۷۹ به ۱ افزایش دادند و به بازدهی حدود ۹۹/۸۴٪ دست یافتند. از آنجا که تفاوت نسبت طول به عرض قبل و بعد از تیغه‌گذاری بسیار بیشتر از این تحقیق بوده، بنابراین تاثیر تیغه‌گذاری در بازده بدست آمده بیشتر نمود داشته است. تحقیقات انجام شده توسط موتامارا<sup>۲</sup> و همکاران [۲۷] و لوید<sup>۳</sup> و همکاران [۲۸] نتایج مشابهی را به بار آورده است. در ادامه، به منظور تعیین قابلیت برکه با ورودی چندراهه و تیغه‌گذاری شده در مواجهه با افزایش بار آلی، آزمایش دیگری با شرایط یکسان و بارگذاری ۵۳۰ gr COD/ m<sup>3</sup>.d انجام شده که نتیجه حاصل را در قالب شکل (۱۰) مشاهده می‌کنید. ملاحظه می‌شود که بازده حذف COD برای برکه‌ای با ورودی چندراهه به ۶۲ درصد و برای برکه‌ای تیغه‌گذاری شده به ۶۳ درصد محدود شده که اختلاف محسوسی نداشته است. دلیل این امر، احتمالاً نحوه طراحی سیستم و نیز شرایط عملکرد مانند دما بوده است.



شکل ۱۰. نتایج آزمایش‌های بیولوژیکی (زیستی) برکه با ورودی چندراهه و تیغه‌گذاری (COD ورودی ۵۳۰ mg/L).

1. Bracho
2. Muttamara
3. Lloyd

- [2] Sweeney, D. G., Nixon, J. B., Cromar, N. J., Fallowfield, H. J., "Temporal and Spatial Variation of Physical, Biological, and Chemical Parameters in a Large Waste Stabilization Pond, and the Implications for WSP Modeling", *Water Sci. Technol.*, 55(11): 1–9, (2007).
- [3] Thackston, E. L., Shields Jr. F. D., Schroeder, P. R., "Residence Time Distributions of Shallow Basins", *Journal of Environmental Engineering*, 113(6):1319-1332, (1987).
- [4] Sah, L., Rousseau, D. P. L., Hooijmans, C., Lens, P., "3D Model for a Secondary Facultative Pond", *Ecological Modeling*, 222(9), 1592-1603, (2011).
- [5] Somes, N. L. G., Bishop, W., Wong, T. H. F., "Numerical Simulations of wetland Hydrodynamics", *Environment International*, 27(6-7):773-779, (1999).
- [6] Adamsson, A., Persson, J., Lyngfelt, S., "Numerical Simulation and Large-Scale Physical Modeling of Flow in a Detention Basin", *Proceedings of the Eighth International Conference on Urban Storm Drainage*, 30 August±3 September 1999, Sydney, Australia.
- [7] Moahheb, S. A., Ghaneian, M. T., Ghanizadeh, Gh., Maghsoudlou, B., Fallahzadeh, M., "Evaluation of the Stabilization Ponds Performance for Municipal Wastewater Treatment in Yazd-Iran", *International Journal of Environmental Science and Technology (IJEST)*, 6(1): 76-82, (2010).
- [8] Abbassi, R., Khan, F., Hawboldt, K., "A Methodology of Finding Dispersion Coefficient using Computational Fluid Dynamics (CFDs)", *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 2(5): 114-120, (2010).
- [9] Polprasert, C., Bhattaria, K. K., "Dispersion Model for Waste Stabilization Ponds", *J. Environ. Eng.*, 111(45): 45-58, (1985).
- [10] Shaw, J. K. E., Watt, W. E., Marsalek, J., Anderson, B. C., "Flow Pattern Characterization in an Urban Storm Water Detention Pond and Implications for Water Quality", *Journal of Water Quality Research*, 32(1):53-71, (1997).
- [11] Torres, J. J., Soler, A., Saez, J., Ortuno, J. F., "Hydraulic Performance of a Deep Wastewater Stabilization Pond", *Water Research*, 31(4): 679-688, (1997).
- [12] Persson, J., "The Hydraulic Performance of Ponds of Various Layouts", *Urban Water*, 2 (3): 243-250, (2000).
- [13] Fogler, H. S., "Elements of Chemical Reaction Engineering", (2nd ed.), NJ: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, (1992).
- [14] Persson, J., Somes, N. L. G., Wong, T. H. F., "Hydraulics Efficiency of Constructed Wetlands and Ponds", *Water Science and Technology*, 40(3): 291-300, (1999).
- [15] Levenspiel, O., "Chemical Reaction Engineering", 2nd ed., John Wiley, (1972).
- [16] Shilton, A., "Pond Treatment Technology", IWA Publishing (Intl Water Assoc), London, UK, (2005).
- [17] PeñaVarón, M., Mara, D., "Waste Stabilization Ponds", International Water and Sanitation Center, Netherlands, (2004).
- [18] APHA, AWWA, WEF., "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 20th edition, American Public Health Association, Washington, DC, USA, (2005).
- [19] Agunwamba, J. C., "Effect of the Location of the Inlet and Outlet Structures on Short-Circuiting: Experimental Investigation", *Water Environment Research*, 78(6):580-9, (2006).
- [20] Khan, S., Melville, B. W., Shamseldin, A. Y., Sharma R., Nokes, R., "Effect of Vertical Locations of Inlet and Outlet on Hydraulics of Storm Water Retention Ponds using Numerical Modeling", 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment by International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR), 9-14 August, Vancouver, Canada, (2009).
- [21] Shilton, A., "Studies into the Hydraulic of Waste Stabilization Ponds", Ph.D. Thesis, Department of Environmental Engineering, Massey University, New Zealand, (2001).
- [22] Safieddine, T., Hydrodynamics of Waste Stabilization Ponds and Aerated lagoons, PhD Thesis, Department of Bioresource Engineering, McGill University, Montreal, Canada, (2007).
- [23] Kadlec, R., Knight, R., "Treatment Wetlands", Lewis Publishers, Michigan, USA, (1996).
- [24] Persson, J., Wittgren, H. B., "How Hydrological and Hydraulic Conditions Affect Performance of Ponds", *Ecological Engineering*, 21(4-5): 259-269, (2003).
- [25] Shilton, A., Stefan Kreegher, S., Grigg, N., "Comparison of Computation Fluid Dynamics Simulation against Tracer Data from a Scale Model and Full-Sized Waste Stabilization Pond", *Journal of Environmental Engineering*, 134(10): 845-850, (2008).
- [26] Bracho, N., Loyda, B., Aldana, G., "Optimization of Hydraulic Performance to Maximize Fecal Coliform Removal in Maturation Ponds", *Water Research*, 40(8):1677 – 1685, (2006).
- [27] Muttamara, S., Puetpaiboon, U., "Roles of baffles in waste stabilization ponds", *Water Sci. Tech.*, 35 (8): 275–284, (1997).
- [28] Lloyd, B., Vorkas, C., Guganesharajah, K., "Reducing Hydraulic Short-circuiting in Maturation Ponds to Maximize Pathogen Removal Using Channels and Wind Breaks", 5th International IWA Specialist Conference on Waste Stabilization Ponds, New Zealand, vol. 2, pp. 445–458, *Water Sci. Tech.*, 48(2): 153–162, (2002).