

## فصل پنجم

### روش‌های تحلیلی برای مدیریت کیفی منابع آب

توسعه مدل‌های کیفی آب شامل ارتباط بخشیدن بین قیود فیزیکی سیستم (بخش هیدرولیک) و سینتیک واکنش‌های شیمیائی و بیولوژیکی حاکم بر محیط و عنصرسنجی با استفاده از تعادل مواد (جرم) می‌باشد. در این بخش، هدف کاربردی نمودن این مدل‌های پیش‌بینی برای تخمین عملکرد سیستم‌های پیچیده طبیعی می‌باشد. مدل‌های پیچیده به علت عدم وجود داده‌ها و اندازه‌گیری‌های مورد نیاز غیر قابل استفاده شده و مدل‌های ساده به علت آنکه از ارتباطات بین متغیرها صرف‌نظر گردیده، کاربرد مناسبی پیدا نکرده‌اند. این برای برنامه‌ریزان و مدیران فنی که باید تصمیم‌گیری خود را با ابزار مناسبی ارائه‌دهند مشکلاتی را ایجاد کرده است. هدف این بخش آشنائی دانشجویان مهندسی عمران با عنصرسنجی، سینماتیک واکنش و توازن جرمی که پایه و اساس مدل‌های زیست محیطی را تشکیل می‌دهند، می‌باشد.

در فصل قبل، ذکر گردید که تصفیه فاضلاب مستلزم یک سری واکنش‌ها و تبدیلات شیمیائی و بیولوژیکی بوده که سرعت وقوع این واکنش‌ها و تغییر و تبدیلات، بر روی اندازه تأسیسات تصفیه‌ای که باید تهیه شود، تأثیر می‌گذارد. در اثر مشاهدات تجربی، مشخص شده که نوع مخازنی (بعنوان مثال راکتور) که این واکنش‌ها و تغییر و تبدیلات در آنها صورت می‌پذیرد، نیز متأثر از درجه تکاملشان می‌باشد. بنابراین، هم سرعت واکنش‌ها و تبدیلات و هم نوع راکتورها در انتخاب مراحل تصفیه (شیمیائی و بیولوژیکی) مهم هستند. شرایط محیطی و سایر مسائل فیزیکی نیز باید مدنظر قرار گیرند. هدف این بخش بحث در مورد (۱) ماهیت واکنش‌های اصلی و سرعت آنها، (۲) کاربرد موازنه مواد در تجزیه و تحلیل اعمال تصفیه فیزیکی و شیمیائی و بیولوژیکی، (۳) انواع مختلف و مشخصات هیدرولیکی راکتورهایی که برای انجام واکنش‌ها و تغییر و تبدیلات مورد استفاده قرار می‌گیرند، (۴) عوامل مهمی که در بررسی مراحل تصفیه تأثیر دارند، (۵) رابطه بین واکنش‌ها و گزینش راکتورها و (۶) بعضی از جنبه‌های مهم عملی طرح مراحل تصفیه، می‌باشد.

هدف از اطلاعات موجود در این بخش ارائه مقدمه‌ای جهت بررسی مراحل تصفیه و اطلاعاتی که در بخش‌های بعدی موجود خواهد بود، می‌باشد. بدو با در نظر گرفتن جوانب اصلی، بکار گرفتن آنها (بدون تکرار جزئیات) در بخش‌های بعدی میسر خواهد بود. اطلاعات بیشتر در مورد نحوه بررسی مراحل تصفیه را می‌توان در مراجع ۱، ۲، ۳، ۶، ۷، ۱۰ و ۱۱ و مراجع متعددی که در این بخش عنوان شده، یافت.

## ۵-۱- عنصرسنجی

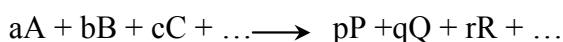
از جهت انتخاب و طراحی فرآیند، کنترل غلظت‌ها و نرخ واکنش از جمله مسائل اساسی مورد توجه می‌باشند. معمولاً تعداد مول جسم یا ماده‌ای که در یک واکنش شرکت نموده و تعداد مول جسم یا ماده تولید شده از طریق عنصرسنجی واکنش مشخص می‌شوند. این از پایه‌ترین مباحث در علم شیمی می‌باشد. در فصل چهارم استفاده از این ابزار در مطالعه تعادل شیمیایی نشان داده شد. مثال زیر کاربرد عنصرسنجی با توجه به اصل بقای جرم نشان داده شده است.

مثال ۵-۱. شکر دارای فرمول عمومی  $C_6H_{12}O_6$  می‌باشد. اگر این ماده به  $CO_2$ ،  $H_2O$  اکسیده گردد، نشان دهید که اصل بقای جرم برقرار است.

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O$$

جرم مولکولی، g	ضریب استوکیومتری	جرم واکنش، g	ترکیب
۱۸۰	۱	۱۸۰	$O_6H_{12}C_6$
۱۹۲	۶	۳۷۲	$O_2$
۲۶۴	۶	۱۰۸	$CO_2$
۱۰۸	۶	۳۷۲	$H_2O$

بنابراین به صورت کلی:



که در آن:

جزء واکنش دهنده = A, B, C

جزء محصول = P, Q, R

ضرایب عنصرسنجی = a, b, c, p, q, r

در صورتیکه برای هر جزء واکنش دهنده و محصول، واحد جرم بر مول انتخاب گردد و علامت منفی برای تمامی ضرایب استوکیومتری واکنش دهنده و ضرایب مثبت برای تمامی جزء، محصول داده شود، رابطه بالا را می‌توان بدین صورت نوشت که:

$$aA + bB + cC + \dots + pP + qQ + rR + \dots = 0$$

برای مثال قبلی می توان چنین نوشت که:

$$(-1 \text{ mole}) \left( \frac{180}{\text{mole}} \right) + (-1 \text{ mole}) \left( \frac{32}{\text{mole}} \right) + (1 \text{ mole}) \left( \frac{44}{\text{mole}} \right) + (1 \text{ mole}) \left( \frac{18}{\text{mole}} \right) = 0$$

کاربرد معادله بالا برای تعیین نرخي که مواد يايجاد شده و يا از بين مي روند در قسمت هاي بعدي نشان داده خواهد شد.

## ۵-۲- واکنش ها و سینتیک آنها

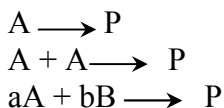
بسياري از واکنش هايي که در طبيعت و تصفيه فاضلاب رخ مي دهند، کند هستند. بنا بر اين سرعت تغيير غلظت يا نرخي که جزء واکنش دهنده ناپديد يا جزء محصول توليد مي گردد بسيار مهم است. به اين نرخ، نرخ واکنش گفته مي شود. از نقطه نظر گزينش مراحل تصفيه و طرح نيز، مبحث استوکیومتری (stochiomerty) و سرعت واکنش ها از مسائل مهم است. تعداد مولهای ماده ای که وارد یک واکنش شده و تعداد مولهای موادی که توليد می گردند، از طریق استوکیومتری واکنش مشخص می شوند. سرعتی که در آن یک ماده در هر واکنش استوکیومتری معلوم ناپديد شده و يا شکل می پذيرد، بعنوان سرعت واکنش شناخته می شود. در اين قسمت به بحث در مورد اين عناوين و ساير عناوين مربوطه پرداخته خواهد شد.

### انواع واکنش ها

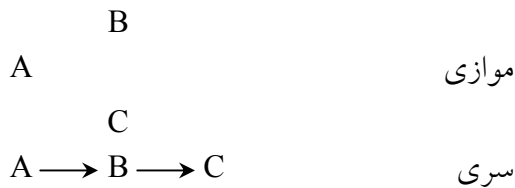
دو نوع واکنش اصلي در طبيعت اتفاق مي افتند که بصورت واکنش هاي همگن (Homogeneous) و غير همگن (NonHomogeneous) دسته بندي شده اند.

### واکنش های همگن

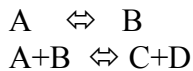
واکنش هايي که در درون یک فاز (مثلاً مایع، جامد يا گاز) اتفاق مي افتند به واکنش هاي همگن معروف هستند. درواکنش هاي همگن، موادی که در واکنش شرکت مي نمايند، بطور مداوم در مایع توزيع شده (نه بطور يکنواخت) بگونه ای که پتانسيل واکنش در هر نقطه یکسان است. واکنش هاي همگن ممکن است بصورت برگشت پذير و يا غير برگشت پذير باشند. مثال واکنش هاي غير برگشت پذير عبارت است از:



مثال واکنش‌های چندتایی غیر برگشت‌پذیر مانند:



مثال واکنش‌های برگشت‌پذیر عبارت است از:



### واکنش‌های ناهمگن

واکنش‌هایی که در سطح، بین فازها اتفاق می‌افتند به واکنش‌های غیرهمگن معروف هستند. معمولاً در این گونه واکنش‌ها که بین یک یا چند جزء تشکیل دهنده صورت می‌گیرد، در نقاط مشخصی مانند آنچه در رزین‌های تبادل یونی اتفاق می‌افتد قابل تشخیص می‌باشند. در واکنش‌هایی که نیاز به وجود یک کاتالیزور جامد داشته باشند نیز، جزو واکنش‌های ناهمگن به حساب می‌آیند. مطالعه و تحلیل این واکنش‌ها بخاطر مراحل وابسته به هم، بسیار دشوار می‌باشد. ترتیب اصلی این مراحل بصورت زیر است:

- 1- انتقال موادی که در واکنش شرکت می‌کنند، از حالت مایع به فاز بینابین مایع جامد (سطح خارجی ذرات کاتالیزور)
- 2- انتقال ذرات داخلی مواد واکنش‌دهنده به درون ذرات کاتالیزور (در صورتیکه متخلخل باشد).
- 3- جذب سطحی مواد واکنش‌دهنده در درون ذرات کاتالیزور
- 4- تبدیل شیمیائی مواد واکنش‌دهنده که جذب سطحی شده‌اند، به محصولات جذب شده (واکنش سطحی).
- 5- رهاشدن محصولات جذب شده.
- 6- انتقال محصولات از درون به سطح خارجی ذرات کاتالیزور
- 7- انتقال محصولات از فاز بینابینی مایع - جامد به حالت مایع

### سرعت واکنش

سرعت واکنش،  $I_i$  عنوانی است که برای شرح ناپدیدشدن یا تشکیل یک جسم یا ماده شیمیایی  $i$  بکار می‌رود. برای واکنش‌های همگن، واحد  $I_i$  برحسب مول (یا گرم) در واحد حجم و واحد زمانی بوده و برای واکنش‌های غیر همگن، سرعت تشکیل برحسب مول (یا گرم) در واحد سطح در زمان  $\left(\frac{\text{mole}}{\text{L.t}}\right)$

می باشد. واکنش دهنده‌ها دارای سرعت واکنش منفی و محصولات دارای سرعت واکنش مثبت هستند.

برای واکنش‌های همگن، سرعت واکنش  $r$  از رابطه زیر بدست می‌آید

$$r = \frac{1}{v} \frac{dN}{dT} = \frac{\text{مول}}{(\text{زمان})(\text{حجم مایع})} \quad (1-5)$$

برای واکنش‌های غیر همگن که  $S$  معرف سطح بوده، رابطه بصورت زیر در می‌آید:

$$r = \frac{1}{S} \frac{dN}{dT} = \frac{\text{مول}}{(\text{زمان})(\text{سطح})} \quad (2-5)$$

در واکنش‌هایی که دو یا چند ماده با ضرایب ترکیب نامساوی شرکت می‌کنند، سرعتی که برای یک ماده عنوان می‌شود، مشابه سایر مواردی که در واکنش شرکت می‌کنند، نخواهد بود. بعنوان مثال برای واکنش  $aA + bB \rightarrow cC + dD$  تغییرات غلظت مواد مختلف از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$-\left(\frac{1}{a}\right)\left(\frac{d[A]}{dt}\right) = -\left(\frac{1}{b}\right)\left(\frac{d[B]}{dt}\right) = \left(\frac{1}{c}\right)\left(\frac{d[C]}{dt}\right) = \left(\frac{1}{d}\right)\left(\frac{d[D]}{dt}\right) \quad (3-5)$$

بنابراین در واکنش‌هایی که ضرایب ترکیب مساوی نباشد، سرعت واکنش از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$r = \left(\frac{1}{C_i}\right)\left(\frac{d[C_i]}{dt}\right) \quad (4-5)$$

که در آن ضریب  $\frac{1}{C_i}$  برای موادی که در واکنش شرکت می‌کنند، منفی و برای مواد تولید شده، مثبت خواهد بود.

## انواع و درجه واکنش

انواع سرعت واکنش‌ها که برای تبدیل ماده تشکیل دهنده در فرآیند تصفیه فاضلاب‌ها و سرنوشت آلاینده‌ها در محیط می‌باشند به قرار زیر می‌باشد:

$r = \pm K$	(درجه صفر)
$r = \pm KC$	(درجه اول)
$r = \pm K(C - C_s)$	(درجه اول)
$r = \pm KC^2$	(درجه دوم)
$r = \pm KC_A C_B$	(درجه دوم)
$r = \pm \frac{KC}{K + C}$	(نوع اشباع شدن)

معادله کلی ارتباط سرعت تغییر غلظت با زمان با غلظت ماده واکنش گر را می توان به این صورت

بیان کرد:

$$\left(\frac{dC_A}{dt}\right) = \pm K C_A^n \quad (5-5)$$

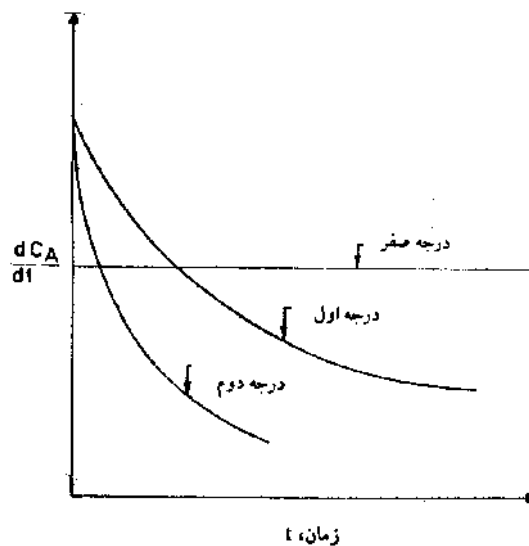
که:  $C_A$  = غلظت ماده واکنش گر

$K$  = ثابت سرعت واکنش

$n$  = درجه واکنش

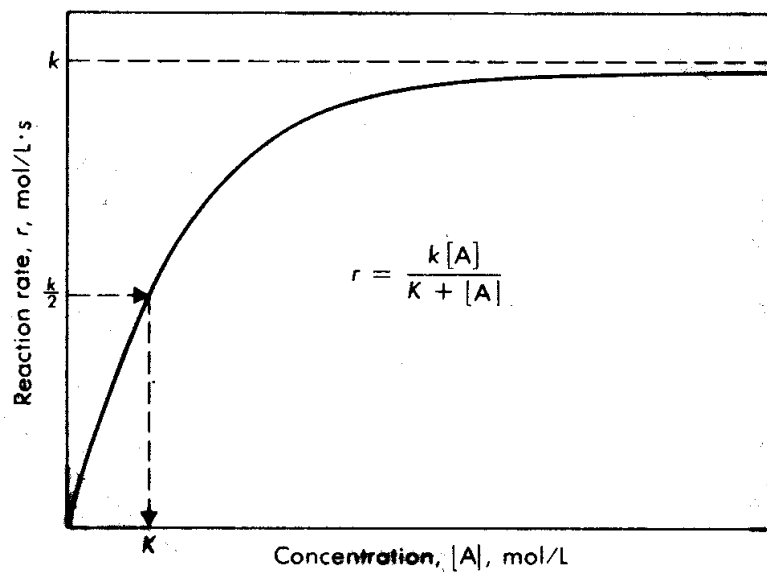
واکنش های درجه صفر ( $n=0$ )، مستقل از غلظت  $C_A$  هستند و بنابراین سرعت آنها همانگونه که

در شکل ۵-۱ آمده، ثابت است.



شکل ۵-۱. منحنی تغییر در سرعت حذف نسبت به زمان برای واکنش های مختلف

واکنش‌های درجه اول ( $n=1$ ) آنهایی هستند که سرعت تغییر غلظت ماده‌ای چون A با توان اول غلظت متناسب است. بمنظور مدل‌سازی مصرف اکسیژن در تجزیه مواد آلی و تباهی باکتری از این نوع واکنش استفاده می‌گردد. اگرچه معادله  $r = \pm K C_A C_B$  در مجموع، واکنش درجه دوم را نشان می‌دهد، اما یک درجه اول نسبت به هریک به تنهایی ( $C_B, C_A$ ) است. معادله ۶ معروف به معادله از نوع اشباع شدن است. در صورتیکه C بسیار بزرگ باشد، درجه واکنش صفر خواهد شد (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵. نمایش معادله از نوع اشباع بر حسب غلظت

### سرعت مخصوص واکنش

طبق قانون اثر جرم (mass action)، می‌توان نشان داد که سرعت واکنش در یک واکنش معلوم متناسب با غلظت باقیمانده مواد واکنش دهنده است. بنابراین، در یک واکنش که فقط جزء A در آن شرکت دارد ( $A \rightarrow P$ )، سرعت واکنش از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$r = \pm K C_A \quad (6-5)$$

که در آن K یک ضریب ثابت بوده و سرعت مخصوص واکنش خوانده می‌شود. واحد سرعت مخصوص واکنش بستگی به درجه واکنش دارد. بعنوان مثال برای واکنش درجه اول، واحد سرعت مخصوص واکنش به قرار زیر می‌باشد:

$$K = \frac{r}{C} = \frac{1}{C} \left( \frac{1}{V} \right) \left( \frac{dN}{dt} \right) = \frac{\text{mole}}{(\text{L/s})(\text{mole/L})} = \text{S}^{-1} \quad (7-5)$$

در عمل، سرعت واکنش ( $r$ )، اثرات غلظت، ثابت سرعت مخصوص واکنش، و اثر کلیه متغیرهای دیگری که ممکن است بر روی واکنش تأثیر بگذارند را در برمی گیرد. دما یکی از مهمترین این متغیرها می باشد.

### اثر دما بر روی ضریب ثابت سرعت مخصوص

اثر دما در ثابت سرعت مخصوص واکنش، به خاطر نیاز به استفاده از این ثابت‌ها در دیگر درجه حرارت‌ها بسیار مهم می باشد. بعنوان مثال، ثابت سرعت واکنش که برای واکنش BOD در  $20^\circ\text{C}$  محاسبه شده، باید اغلب برای سیستم هایی که دارای دمائی غیر از  $20^\circ\text{C}$  می باشند، نیز مورد استفاده قرار گیرد. برای تصحیح درجه حرارت از رابطه زیر استفاده می گردد.

$$K_t = K_{20} \theta^{t-20} \quad (8-5)$$

اگرچه در این رابطه مقدار  $\theta$  ثابت فرض شده ( $\theta = 1.047$ )، ولی اغلب با تغییر درجه حرارت،  $\theta$  بطور قابل ملاحظه‌ای تغییر می کند.

### تجزیه و تحلیل روابط سرعت

سرعت انجام واکنش معمولاً در مراحل تکمیل واکنش با اندازه‌گیری غلظت ماده‌ای که وارد واکنش شده و یا در آن تولید می شود، محاسبه می گردد. سپس نتایج حاصله، با نتایج انواع متعدد استانداردهای روابط سرعت که واکنش مطابق با آن در حال تکمیل است، مقایسه خواهد شد.

واکنش درجه اول، واکنشی است که در آن سرعت تکمیل واکنش با توان اول غلظت ماده‌ای که در واکنش شرکت می کند، نسبت مستقیم داشته باشد. بعنوان مثال، در واکنش



اگر بطور تجربی مشاهده شد که سرعت، متناسب با توان اول غلظت A است، واکنش نسبت به A درجه اول (First Order) خواهد بود. اگر مکانیسم واکنش شناخته نشده باشد، سرعت واکنش در رابطه (9-5)، را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$r = K C_A^a C_B^b \dots C_P^p = K C_A^n \quad (10-5)$$

که در آن a و b درجات واکنش نسبت به مواد A و B بوده و n درجه کلی واکنش است  $[2](n = a+b+\dots+P)$ . مباحث زیر در مورد واکنش‌های برگشت پذیر و نیز غیر برگشت پذیر، ارتباطاتی را که جهت مشخص نمودن واکنش‌ها در درجات مختلف مورد استفاده قرار می گیرد، نشان می دهد.



واکنش‌های غیر برگشت‌پذیر. واکنش‌هایی که در آن سرعت تشکیل مواد تولیدی مستقل از غلظت باشد، مرتبه‌صفر خوانده‌شده و مطابق زیر تعریف می‌شوند.

$$r_A = \frac{d[A]}{dt} = -K_0 \quad (11-5)$$

که انتگرال آن با توجه  $A = A_0$  در شرایط اولیه، بصورت زیر خواهد بود.

$$[A_t] = [A_0] - K_0 t \quad (12-5)$$

در یک واکنش مرتبه اول، سرعت از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$r_A = \frac{d[A]}{dt} = -K_1[A] \quad (13-5)$$

که انتگرال آن با توجه به  $A = A_0$  در شرایط ابتدایی بصورت زیر خواهد بود.

$$\ln \frac{[A_t]}{[A_0]} = -k_1 t \quad \text{یا} \quad [A_t] = [A_0] e^{-k_1 t} \quad (14-5)$$

سرعت سایر واکنش‌های غیر برگشت‌پذیر و فرم انتگرال‌گیری شده آن، در جدول ۱-۵، داده شده‌است.

با وجود اینکه مرتبه واکنش، یک کمیت تجربی بوده و هیچ تناسب الزامی با هیچیک از روابط Stoichiometric ندارد، واکنش‌هایی با درجات دیگر نیز بهمین ترتیب تعریف می‌شوند. نحوه محاسبه توان یک واکنش و ثابت‌های مربوطه را می‌توان در مثال ۲-۵، مشاهده نمود. واکنش‌های برگشت‌پذیر. در یک واکنش برگشت‌پذیر مطابق شکل زیر:



که در آن ثابت سرعت مخصوص واکنش برای تبدیل A به B،  $K_1$  و برای تبدیل B به A نیز  $K'_1$  می‌باشد، سرعت واکنش بصورت زیر خواهد بود.

$$r_A = \frac{d[A]}{dt} = -K_1[A] + k'_1[B] \quad (16-5)$$

شکل انتگرال‌گیری شده این واکنش و سایر واکنش‌های برگشت‌پذیر را میتوان در مرجع ۷ و سایر کتب مهندسی شیمی و شیمی فیزیک یافت.

جدول ۱-۵ روابط سرعت واکنش، برای واکنش‌های برگشت‌ناپذیر ساده [۷]

واکنش	مرتبه	رابطه سرعت واکنش	شکل انتگرال گیری شده
$A \rightarrow B$	صفر	$\frac{d[A]}{dt} = -k_0$	$[A] = [A]_0 - k_0 t$
$A \rightarrow B$	یک	$\frac{d[A]}{dt} = -k_1[A]$	$\ln \frac{[A]}{[A]_0} = -k_1 t$
			$t_{1/2} = \frac{1}{k_1} \ln 2$
$A + A \rightarrow P$	دو (نوع اول)	$\frac{d[A]}{dt} = -k_2[A]^2$	$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = k_2 t$
$aA + bB \rightarrow P$	دو (نوع دوم)	$\frac{d[A]}{dt} = -k_2[A][B]$	$\ln \frac{[A]_0 - [B]}{[B]_0 - b/a[X]} = \ln \frac{[A]}{[B]}$
			$= \frac{b[A]_0 - a[B]_0}{a} k_2 t + \ln \frac{[A]_0}{[B]_0}$
			$t_{1/2} = \frac{a}{k_2(b[A]_0 - a[B]_0)} \times \ln \frac{a[B]_0}{2a[B]_0 - b[A]_0}$

مثال ۲-۵ محاسبه درجه واکنش و ثابت سرعت. تحقیق کنید که آیا مشخصات زیر درباره حذف مواد اولیه، مربوط به یک واکنش درجه اول می‌باشد. اگر چنین است، ثابت سرعت مخصوص واکنش را بدست آورید.

زمان، ساعت	۰	۱	۲	۳	۴	۶
غلظت ماده ورودی واکنش mg / L	۵۰	۳۵/۶	۲۵/۸	۱۸/۵	۱۲/۸	۷/۳

حل

۱- با فرض اینکه  $C = 50 \text{ mg / L}$  باشد، با استفاده از رابطه ۵-۱۴، مقدار ثابت سرعت واکنش را در زمانهای مختلف بدست آورید.

زمان	$C / C_0$	$\ln C / C_0$	$K, h^{-1}$
۰	۱	۰	
۱	۰/۷۱	-۰/۳۴۲	-۰/۳۴۲
۲	۰/۵۲	-۰/۶۵۴	-۰/۳۲۷
۳	۰/۳۷	-۰/۹۹۴	-۰/۳۳۱
۴	۰/۲۷	-۱/۳۱۰	-۰/۳۲۸
۵	۰/۱۴	-۱/۹۶۶	-۰/۳۲۸

۲- تا مادامیکه ثابت سرعت مخصوص واکنش حدوداً ثابت بماند، میتوان نتیجه گرفت که واکنش درجه اول و مقدار میانگین ثابت سرعت حدوداً  $1-h^{-1} 0.331$ ، می‌باشد.

۳- ثابت سرعت واکنش را می‌توان با ترسیم  $\log(C_0 - X)$  برحسب  $t$  روی کاغذ محاسبه نیز بدست آورد، که در آن کمیت  $(C_0 - X)$  معرف مقدار موادی است که در هر پریود زمانی

## ۲-۵- بررسی موازنه - جرمی (MASS-BALANCE ANALYSIS)

بررسی موازنه - وزنی، اساسی‌ترین روشی است که برای مشخص نمودن تغییراتی که هنگام انجام یک واکنش در یک مخزن (راکتور) و یا در بخش معینی از حجم مایع بوقوع می‌پیوندد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این قسمت، به بحث دربارهٔ اصول کلی این بررسی و برخی از کاربردهای آن، پرداخته خواهد شد.

### موازنه جرمی

بخاطر اینکه جرم نه تولیدشده و نه از بین می‌رود. موازنهٔ جرمی طریقهٔ مناسبی برای تعریف اتفاقاتی است که بعنوان تابعی از زمان در محیط طبیعی و یا تصفیه‌خانه بوقوع می‌پیوندد. برای مشخص کردن مسائل اصلی، بررسی موازنه جرمی بر روی محتویات موجود در مخزنی که در تصویر ۳-۵، نشان داده شده است، صورت می‌پذیرد. نخست، باید مرزسیستم معین شود تا کلیهٔ مایعی که وارد و خارج سیستم می‌گردد، قابل تشخیص باشد. در تصویر ۳-۵، مرز سیستم توسط خط چین مشخص شده است. انتخاب صحیح مرزسیستم بسیار مهم است. زیرا، در بسیاری حالات این عمل باعث ساده شدن محاسبات موازنه جرمی می‌گردد.

هنگام انجام بررسی موازنه جرمی برای محتویات مایع مخزن تصویر ۳-۵، فرض خواهد شد که (۱) دبی حجمی ورودی و خروجی از مخزن ثابت باشد، (۲) مایع موجود در راکتور در معرض تبخیر قرار نداشته باشد (شرایط ایزوترمال)، (۳) مایع درون مخزن بخوبی مخلوط شده باشد، (۴) یک واکنش شیمیایی با شرکت مادهٔ C در داخل راکتور صورت پذیرفته است و (۵) میزان تغییر غلظت مادهٔ C در داخل راکتور از یک واکنش مرتبهٔ اول تبعیت کند ( $r = -kc$ ). برای مفروضات فوق موازنه جرمی را میتوان بصورت زیر فرمول‌بندی نمود:

۱- بیان بصورت کلی: (۱۷-۵)

میزان ناپدیدشدن (مصرف) مادهٔ واکنش‌دهنده در درون مرزسیستم + میزان جریان مادهٔ واکنش‌دهنده به خارج مرزسیستم - میزان جریان مادهٔ واکنش‌دهنده به درون مرزسیستم = میزان تجمع مادهٔ واکنش‌دهنده در درون مرزسیستم

۲- بیان صورت خلاصه:

مصرف + خروجی - ورودی = تجمع (۱۸-۵)

۳- بیان بصورت روابط ریاضی:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_0 - QC + V (r_c, \text{سرعت واکنش})$$

$$V \frac{dC}{dt} = QC_0 - QC + V(-KC) \quad (19-5)$$

که در آن  $V$  = حجم راکتور،  $L^3$

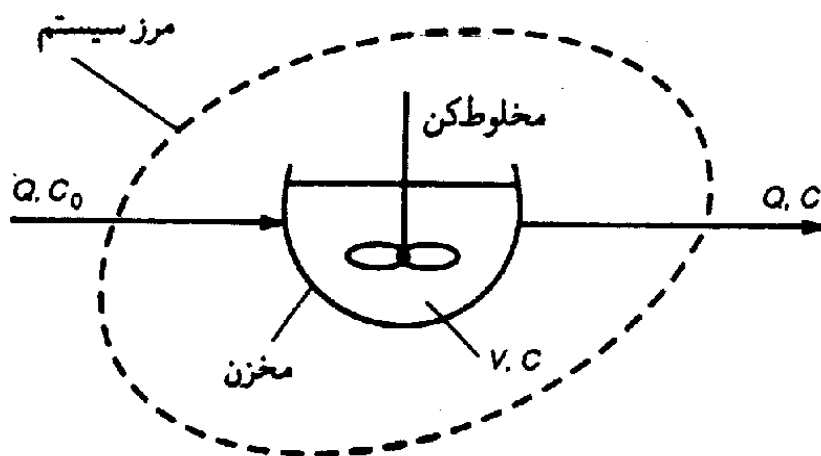
$dC/dt$  = سرعت تغییر غلظت ماده واکنش دهنده در درون مخزن،  $ML^{-3} T^{-1}$

$Q$  = میزان حجمی جریان بداخل و خارج مخزن،  $L^3 T^{-1}$

$C_0$  = غلظت ماده واکنش دهنده در جریان ورودی،  $ML^{-3}$

$K$  = ثابت سرعت واکنش مرتبه اول،  $T^{-1}$

$C$  = غلظت ماده واکنش دهنده در درون راکتور و جریان خروجی،  $ML^{-3}$



تصویر ۳-۵ نقشه کاربرد "بررسی موازنه جرمی" مواد

در رابطه ۵-۱۸، از علامت مثبت برای عبارت سرعت مصرف استفاده شده است، زیرا علامت منفی لازم، بخشی از عبارت سرعت بحساب می آید. اگر غلظت ماده واکنش دهنده بجای مصرف در راکتور افزایش یابد، رابطه موازنه جرمی مربوطه همانگونه باقی خواهد ماند، با این تفاوت که عبارت سرعت تولید، جایگزین سرعت مصرف خواهد شد. علامات تغییر نخواهد کرد.

قبل از جایگزینی مقادیر عددی در رابطه موازنه جرمی، باید واحدها کنترل شود، تا کلیه مقادیر واحدهای انتخاب شده، مناسب باشد. اگر واحدهای زیر در رابطه ۵-۱۹، گنجانده شوند،

$$V = L$$

$$\frac{dC}{dt} = mg / L.s$$

$$Q = L / S$$

$$C_0, C = mg/L$$

$$K = 1/s = s^{-1}$$

$$V \frac{dC}{dt} = QC_0 - QC + V(-KC)$$

$$L (mg / L / s) = L / s (mg / L) = L / s (mg / L) + L (-1/s) (mg / L)$$

$$mg/s = mg/s - mg/s - mg/s$$

در بعضی از حالات، دیده می شود که غلظت ماده درون رآکتور بطور متقابل هنگام تولید افزایش یافته و هنگام مصرف کاهش می یابد. این حالات مربوط به وقتی است که بخشی از ماده تولید شده، برای ثابت نگهداشتن شرایط انرژی در طول مرحله مورد استفاده قرار می گیرد. در این حالت، سرعتها معمولاً یکسان نمی باشند. رابطه موازنه جرم برای این حالت مطابق زیر است:

۱- بیان صورت کلی: (۲۰-۵)

میزان مصرف ماده واکنش دهنده در درون مرز سیستم + میزان تولید ماده واکنش دهنده در درون مرز سیستم + میزان جریان ماده واکنش دهنده به خارج مرز سیستم - میزان جریان ماده واکنش دهنده به درون مرز سیستم = میزان تجمع ماده واکنش دهنده در درون مرز سیستم

۲- بیان بطور خلاصه:

$$\text{مصرف} + \text{تولید} + \text{خروجی} - \text{ورودی} = \text{تجمع} \quad (21-5)$$

۳- روابط ریاضی:

$$= QC_0 - QC + V \frac{dC}{dt} \quad (r_g \text{ (میزان تولید)}, r_u \text{ (میزان مصرف)}) \quad (22-5)$$

### موازنه جرمی برای رآکتور ناپیوسته (BATCH)

قبل از ادامه بحث، لازم است، فرق بین عبارت "سرعت تغییر" (rate-of-change) که مشخص کننده بخشی از عبارت تجمع است با عبارت "سرعت تولید" یا عبارت اتلاف مشخص شود. بطور کلی، بجز در حالت خاصی که ورودی و خروجی در مخزنی که واکنش در آن صورت می پذیرد، صفر

باشد، این عبارات یکسان نخواهد بود. چنین مخزنی بعنوان یک رآکتور ناپیوسته شناخته خواهد شد (به قسمت ۵-۳، مراجعه کنید). در این حالت،  $Q$  مساوی صفر بوده و رابطه ۵-۱۹، بصورت زیر در می آید.

$$\frac{dC}{dt} = (r_u \text{ یا } r_g \text{ تولید}) \quad (23-5)$$

نکته اصلی اینست که هنگامیکه جریان صورت نمی پذیرد، غلظت در واحد حجم مطابق با عبارت سرعت بکار رفته، تغییر می کند. به عبارت دیگر، هنگام وجود جریان، غلظت درون رآکتور با ورودی و خروجی رآکتور مشخص می گردد. شکل رابطه ۵-۲۳، مانند سایر روابطی است که قبلاً در مبحث ۵-۱، و جدول ۵-۱، مورد بحث قرار گرفته است.

### روشهای حل

روشهای تجزیه و تحلیلی که برای حل معادلات تعادل جرمی مورد استفاده قرار می گیرد، معمولاً از شکل ریاضی آخرین تبعیت می کند. بعنوان مثال، حل کلی در حالت غیر پایدار برای معادله ۵-۱۹، با توجه باینکه این رابطه دارای فرم معادله دیفرانسیل خطی مرتبه اول استاندارد می باشد، صورت می پذیرد. روش حل چنین معادلاتی که در معادلات ۵-۲۵، تا ۵-۳۲، شرح داده شده، بخاطر استفاده مکررشان در رشته مهندسی محیط زیست و این کتاب، در این مبحث گنجانده شده است. اولین مرحله حل، جمع عبارات و دوباره نویسی معادله ۵-۱۹، بصورت زیر خواهد بود.

$$C' + \left( K + \frac{Q}{V} \right) C = \frac{Q}{V} C_0 \quad (24-5)$$

که در آن  $C'$  برای مشخص کردن مشتق  $\frac{dC}{dt}$  مورد استفاده قرار می گیرد. در مرحله بعد هر دو طرف رابطه درضرب  $e^{\beta T}$  ضرب شده که در آن  $\beta = (K + Q/V)$  می باشد.

$$e^{\beta T} (C' + \beta C) = Q/V C_0 e^{\beta T} \quad (25-5)$$

سمت چپ چنین معادله ای را می توان بصورت معادله دیفرانسیل زیر نوشت:

$$(C e^{\beta T})' = Q/V C_0 e^{\beta T} \quad (26-5)$$

علامت دیفرانسیل را می توان با انتگرال گیری از رابطه، از بین برد.

$$C e^{\beta T} = Q/V C_0 \int e^{\beta T} + K \quad (27-5)$$

با انتگرال گیری نتیجه می شود:

$$Ce^{\beta T} = Q/V \times C_0 / \beta e^{\beta T} + K \quad (28-5)$$

با تقسیم دو طرف به  $e^{\beta T}$ .

$$C = Q/V \times C_0 / \beta + Ke^{-\beta T} \quad (29-5)$$

هنگامیکه  $t=0$  و  $C = C_0$  باشد، بنابراین:

$$K = C_0 - Q/V \times C_0 / \beta \quad (30-5)$$

با جایگزین کردن مقدار  $K$  در رابطه ۲۸-۵، و ساده نمودن آن، رابطه زیر که حل رابطه ۱۹-۵، در حالت غیر پایدار بوده، بدست می آید.

$$C = Q/V \times C_0 / \beta \times (1 - e^{-\beta T}) + C_0 e^{-\beta T} \quad (31-5)$$

لازم به تذکر است که اگر، رابطه ۳۱-۵، بصورت زیر در خواهد آمد.

$$C = Q/V \times C_0 / \beta = \frac{C_0}{1 + K(V/Q)} \quad (32-5)$$

راه حل معادله ۱۹-۵، یکی از ساده ترین راه حل های موجود می باشد. حل حالت غیر پایدار روابط موازنه جرمی باید با استفاده از روش های عددی و کامپیوترهای دیجیتالی صورت پذیرد.

### ساده کردن محاسبات در حالت پایدار

خوشبختانه، در اکثر کاربردها در رشته تصفیه فاضلاب و محیط زیست، حل رابطه موازنه جرمی (مانند رابطه ۱۹-۵)، را می توان با توجه به اینکه غلظت دراز مدت (حالت پایدار) بیشتر مدنظر است، ساده تر نمود. فرض می شود که فقط غلظت پایدار پس آب موردنظر باشد. بنابراین، رابطه ۱۹-۵، را می توان با در نظر داشتن این مسئله که در این شرایط، میزان تجمع صفر خواهد بود ( $dC/dt = 0$ )، ساده تر کرد. با استفاده از این حقیقت، رابطه ۱۹-۵، را می توان بصورت زیر نوشت:

$$0 = QC_0 - QC - VKC \quad (33-5)$$

با حل رابطه ۳۳-۵، بر حسب  $C$ ، رابطه زیر بصورت رابطه ۳۲-۵، در می آید.

$$C = \frac{C_0}{1 + K(V/Q)}$$

### ۳-۵ رآکتورها و مشخصات هیدرولیکی آنها

همانطور که قبلاً اشاره شد، مخازن ظروف یا تانک هایی که واکنش های شیمیائی یا بیولوژیکی در آنها انجام می شود، معمولاً رآکتور نامیده می شوند. در این مبحث، به نوع رآکتورهای موجود و

مشخصات هیدرولیکی آنها اشاره شده است. نحوه گزینش رآکتورها در قسمت ۵-۶، شرح داده خواهد شد.

## انواع رآکتورها

انواع اصلی رآکتورهائی که در تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار می گیرند، عبارتند از (۱) رآکتور "batch" (ناپیوسته)، (۲) رآکتور "plug flow" (جریان قالبی) که رآکتور (جریان توربولار) نیز شناخته می شود، (۳) رآکتور "continuous-flow stirred tank" (مخزن با جریان دائم مجهز به همزن) که همچنین به رآکتور (با اختلاط کامل) نیز معروف است، (۴) رآکتور "arbitrary-flow" (جریان بی قاعده)، (۵) رآکتور "packed-bed" (بستر پوشیده) و (۶) رآکتور "fluidized-bed" (بستر سیال). شرح این رآکتورها در جدول ۵-۲، گنجانده شده است. طبقه بندی چهار رآکتور اول بر اساس مشخصات هیدرولیکی آنها می باشد. واکنش های همگن معمولاً در چنین رآکتورهائی صورت می پذیرد. واکنش های ناهمگن معمولاً در دو نوع رآکتور آخر انجام می شود.

در عمل، یک رآکتور با جریان قالبی یک مخزن مستطیلی بسیار طویل است. (تصویر ۵-۴) در بعضی مواقع، طول این مخازن از ۱۸۰m (۶۰۰ft) تجاوز می کند. برای استفاده هرچه مؤثرتر از فضا، اغلب این مخازن بصورت مارپیچ می باشند. از مخازن مستطیلی و مدور بعنوان رآکتورهای با جریان دائم و مجهز به همزن استفاده می شود. تر



تصویر ۵-۴ رآکتور خالی با جریان قالبی (plug) که برای انجام مرحله تصفیه  
لجن فعال مورد استفاده قرار می گیرد.

جدول ۵-۲ انواع اصلی رآکتورهای که در تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شرح و یا کاربرد	علائم مشخصه	نوع رآکتور
مایع نه وارد رآکتور شده و نه از آن خارج می‌گردد. محتویات مایع کاملاً مخلوط می‌شود. بعنوان مثال، آزمایش BOD که در بخش ۳ اشاره شد در یک رآکتور ناپیوسته شیشه‌ای صورت می‌پذیرد.		Batch (ناپیوسته)
مایع وارد مخزن شده و به همان اندازه از آن خارج می‌شود. هویت ذرات ثابت مانده و زمان ماند در مخزن به اندازه زمان تئوری ماند می‌باشد. این نوع جریان در مخازنی بسیار طولی که نسبت طول به عرض آن بسیار زیاد بوده و انحراف طولی آن اندک و یا صفر است، صورت می‌پذیرد.		Tubular-flow (plug-flow) جریان لوله ای (جریان قلبی)
اختلاط کامل هنگامی صورت می‌پذیرد که ذراتی که وارد مخزن می‌شوند، فوراً در مخزن پراکنده شوند. ذرات مخزن را متناسب با جمعیت آماری خود ترک می‌کنند. اگر ذرات درون مخزن بطور یکنواخت و مداوم پخش شوند، اختلاط کامل در مخازن مدور و مربع شکل امکان‌پذیر خواهد بود.		countinuous-flow stirred-tank با جریان دائم مجهز همزن (اختلاط کامل)
جریان بی‌قاعده هر درجه از اختلاط نسبی بین جریان قالبی و اختلاط کامل می‌باشد.		Arbitrary-flow (جریان بی‌قاعده)
رآکتورهای بستر پوشیده توسط موادی مانند سنگ، گدازه آتش‌فشانی، سرامیک یا پلاستیک پوشیده می‌شوند. با در نظر گرفتن جریان، می‌توان این رآکتورها را بطور کامل (صافی بی‌هوازی) یا بینابینی (صافی چکیده) پر کرد.		packed-bed (بستر پوشیده)
رآکتور بستر سیال از بسیاری لحاظ مشابه رآکتور بستر پوشیده می‌باشد، با این تفاوت که ذرات (packing medium) لایه مرکزی آن با حرکت روبه بالای سیال (آب یا هوا) در بستر باز می‌شوند. با کنترل دبی جریان می‌توان تخلخل بستر را تغییر داد.		Fluidized-bed (بستر سیال)

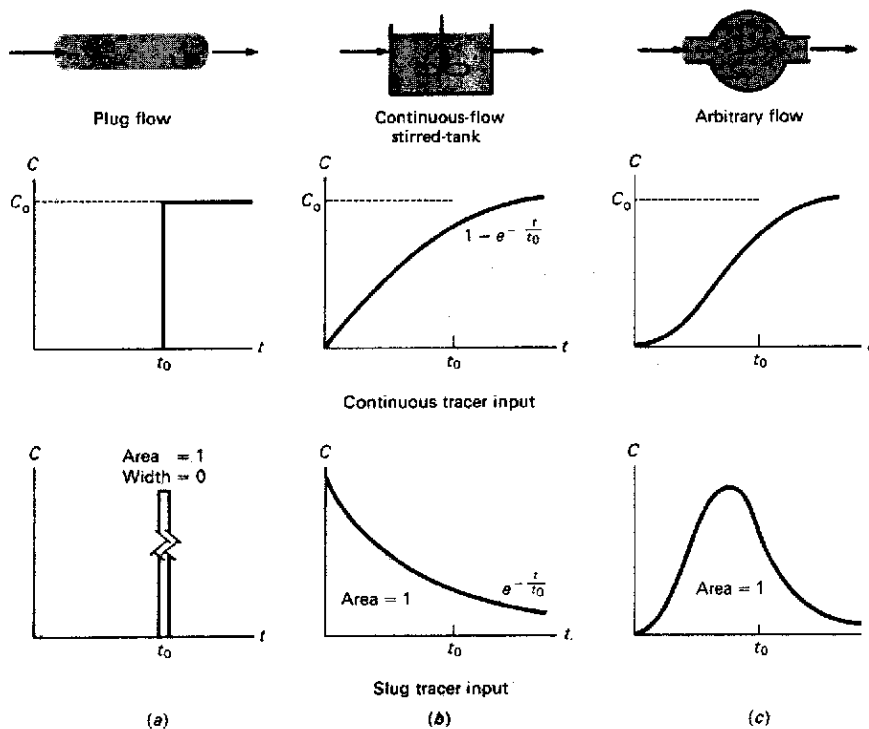
## مشخصات هیدرولیکی رآکتورها

رآکتورهای جریان قالبی، جریان دائمی مجهز به همزن و جریان بی‌قاعده بطور متداول‌تر در تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشخصات هیدرولیکی این رآکتورها در تصویر ۵-۵، که در آن منحنی‌های پاسخ موادردیاب رنگی برای نوسانات مرحله‌ای و نوسانی دیده می‌شود، مشخص شده است.

در یک رآکتور جریان قالبی، اگر مواد رنگی بطور مستمر برای ایجاد غلظت  $C_0$ ، در رآکتور تزریق شوند، شکل این مواد در پساب مطابق تصویر ۵-۵، خواهد بود ( $t$  مساوی زمان ماند عملی و  $t_0$  مساوی زمان ماند تئوری  $V/Q$  خواهد بود). تحت شرایط جریان قالبی ایده آل  $t_0$  مساوی  $t$  می باشد. اثر اغتشاشات نوسانی، مانند آنچه در اثر تزریق یک ماده ردیاب حاصل می شود، نیز در تصویر ۵-۵، مشخص شده است.

در یک رآکتور با جریان دائمی مجهز به همزن، اگر یک ماده ردیاب (tracer) واکنش ناپذیر با غلظت  $C_0$  به ورودی تزریق شود، نمایش این ماده در خروجی شبیه تصویر ۵-۵، خواهد بود. پاسخ به ورودی لحظه ای (slug input) ماده ردیاب نیز در تصویر ۵-۵، عرضه شده است.

جریان بی قاعده معرف هر اندازه از اختلاط نسبی بین جریان قالبی و جریان با اختلاط کامل می باشد. این نوع جریان مکرراً در مخازن ته نشینی و هوادهای عملی دیده می شود. تشریح ریاضی این نوع جریان بسیار مشکل است. بنابراین، در بررسی ریاضی مراحل بیولوژیکی و شیمیایی که در رآکتورها صورت می پذیرد، معمولاً مدل های ایده آل جریان با اختلاط کامل یا جریان قالبی در نظر گرفته می شوند. بررسی عملی منحنی های بدست آمده برای یک رآکتور با جریان دائم مجهز به همزن و یک رآکتور جریان قالبی (plug flow) در مبحث زیر آمده است.



تصویر ۵-۵ منحنی های پاسخ مواد ردیاب رنگی برای نوسانات مرحله ای و نوسانی (a) جریان، (b) جریان مستمر، (c) جریان بی قاعده

رآکتور با جریان دائم مجهز به همزن (Continuous - flow stirred - tank reactor). با استفاده از موازنه جرمی مواد برای یک ماده ردیاب در اطراف رآکتور، غلظت پسآب را می توان بصورت تابعی از زمان محاسبه نمود.

۱- بیان صورت کلی: (۳۴-۵)

میزان جریان ماده ردیاب بخارج رآکتور - میزان جریان ماده ردیاب بدرون رآکتور = میزان تجمع ماده ردیاب درون رآکتور

۲- بیان صورت خلاصه:

خروجی - ورودی = تجمع (۳۵-۵)

۳- روابط ریاضی:

$$V \frac{dC}{dt} = QC_0 - QC \quad (36-5)$$

با بازنویسی و ساده کردن رابطه (۳۶-۵)، بدست می آید،

$$\frac{dC}{dt} = Q/V(C_0 - C) \quad (37-5)$$

که با انتگرال گیری بین حدهای  $C_0$  و  $C$  و  $0$  و  $t$ ، رابطه زیر بدست می آید،

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C_0 - C} = Q/V \int_0^t dt \quad (38-5)$$

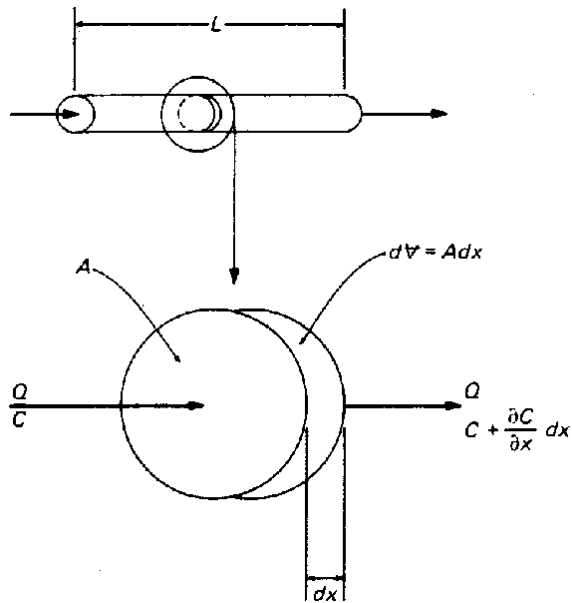
که با حل آن، حاصل می شود،

$$C = C_0(1 - e^{-t(Q/V)}) = C_0(1 - e^{-t/t_0}) = C_0(1 - e^{-\theta}) \quad (39-5)$$

که در آن  $t_0$  مساوی زمان ماند تئوریک  $V/Q$  و  $\theta$  مساوی  $t/t_0$  می باشد. عبارت مربوط به غلظت پسآب یک رآکتور که از مواد ردیاب پاک شده است، بطور مشابه و از روابط زیر بدست می آید:

$$C = C_0 e^{-t(Q/V)} = C_0 e^{-t/t_0} = C_0 e^{-\theta} \quad (40-5)$$

رآکتور جریان قالبی. با استفاده از علامت مشخصه ای که برای رآکتور جریان قالبی در تصویر ۶-۵، نشان داده شده است، غلظت ماده ردیاب پسآب را می توان با نوشتن رابطه موازنه جرمی بصورت تابعی از زمان بدست آورد.



تصویر ۶-۵ نمای مشخصه برای تجزیه و تحلیل یک رآکتور جریان قالبی

۱- بیان صورت کلی: (۴۱-۵)

میزان جریان ماده ردیاب به خارج المان - میزان جریان ماده ردیاب بدرون المان = میزان تجمع ماده ردیاب درون المان

۲- خلاصه بیان فوق:

$$\text{خروجی} - \text{ورودی} = \text{تجمع} \quad (۴۲-۵)$$

۳- روابط ریاضی:

$$\frac{dV d[(C + C + (\partial C / \partial X) dX) / 2]}{dt} = QC - Q\left(C + \frac{\partial C}{\partial X} dX\right) \quad (۴۳-۵)$$

با حذف عبارت مرتبه ۲ و رعایت قوانین ریاضی، رابطه ۴۳-۵، را میتوان بصورت زیر ساده نمود.

$$dV \frac{\partial C}{\partial t} = -Q \frac{\partial C}{\partial X} dX \quad (۴۴-۵)$$

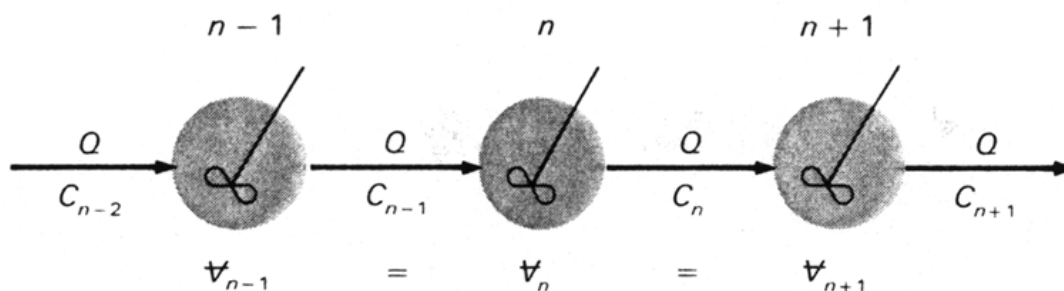
اگر  $AdX$  را جایگزین  $dV$  و  $AV$  را جایگزین  $Q$  کنیم، که در آن  $V$  سرعت می باشد، رابطه بصورت زیر در می آید.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial X} \quad (۴۵-۵)$$

چون هر دو طرف رابطه فوق بجز علامت منفی موجود در سمت راست یکسان می باشد (توجه:  $\partial t = \partial X / V$ )، پس تنها در صورتی رابطه فوق دارای جواب است که تغییرات غلظت نسبت به فاصله صفر باشد. بنابراین، غلظت در ورودی و در پساب یکسان خواهد بود.

روش دیگری که اغلب در بدست آوردن رابطه تعادل جرم در رآکتور جریان قالبی مورد استفاده قرار می گیرد، در نظر گرفتن یک المان حجم  $\Delta V$  روی کل سطح مقطع رآکتور بوده که در آن سمت ورودی المان در  $X$  و سمت خروجی آن در  $X + \Delta X$  واقع شده است. سپس رابطه موازنه جرمی برای پریرود زمانی  $\Delta t$  نوشته شده، معادله ۵-۴، با ساده کردن و گرفتن حد مشتقها بدست می آید.

رآکتورهای جریان مستمر مجهز به همزن بصورت سری. در قسمت ۴-۵، که مربوط به بررسی مراحل است، دیده خواهد شد که استفاده از رآکتورهای جریان مستمر بصورت سری در امر تصفیه، بسته به سرعت واکنش، دارای فوایدی می باشد. بنابراین، شناخت مشخصات هیدرولیکی رآکتورها بصورت سری مانند تصویر ۵-۷، حائز اهمیت است.



تصویر ۵-۷ نمای مشخصه رآکتورهای جریان مستمر مجهز به همزن بصورت سری.

فرض کنید که در اولین رآکتور از یک سری رآکتور هم اندازه، مقداری ماده رنگی قرار گرفته تا غلظت ماده رنگی در این رآکتور  $C_0$  شود. حجم کل تمامی رآکتورها  $V$  و حجم هر یک از رآکتورها  $V/n$  می باشد. با نوشتن رابطه تعادل مواد برای رآکتور دو، نتیجه می شود که:

$$1 - \text{بیان بصورت کلی:} \quad (5-6)$$

میزان جریان ماده ردیاب بخارج رآکتور ۲ - میزان جریان ماده ردیاب بدرون رآکتور ۲ =

میزان تجمع ماده ردیاب در رآکتور ۲

۲- خلاصه بیان فوق:

$$(5-7) \quad \text{خروجی} - \text{ورودی} = \text{تجمع}$$

۳- روابط ریاضی:

$$\frac{V}{n} \frac{dC_2}{dt} = QC_1 - QC_2 \quad (48-5)$$

$$\frac{dC_2}{dt} + \frac{nQ}{V} C_2 = \frac{nQ}{V} C_1 \quad \text{یا } (49-5)$$

با استفاده از تساوی ۴۹-۵، غلظت پساب در اولین رآکتور بصورت زیر خواهد بود،

$$C_1 = C_0 e^{-n(Q/V)t} = C_0 e^{-nt/t_0} = C_0 e^{-n\theta} \quad (50-5)$$

با جایگزین کردن مقدار  $C_1$  در رابطه (۴۹-۵) حاصل می‌شود،

$$\frac{dC_2}{dt} + \frac{nQ}{V} C_2 = \frac{nQ}{V} C_0 e^{-n(Q/V)t} \quad (51-5)$$

رابطه ۵۱-۵، را می‌توان دقیقاً مانند رابطه ۱۹-۵، حل نمود. با انجام مراحل لازم، نتیجه نهائی که

بر حسب  $\theta$  بیان شده، مطابق زیر می‌باشد،

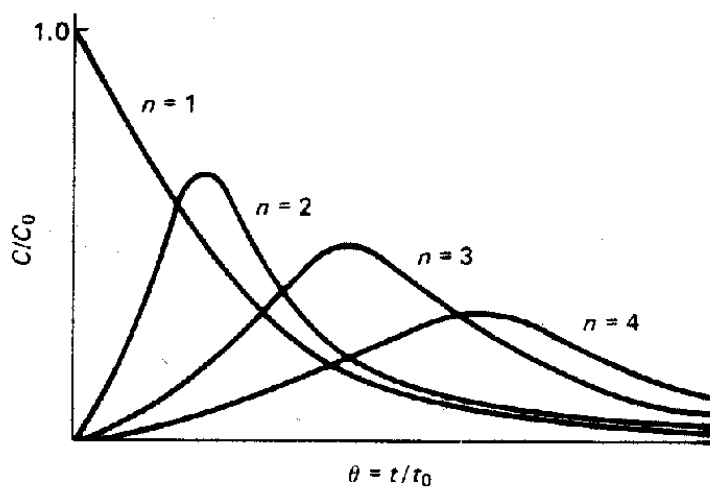
$$C_2 = C_0 n \theta e^{-n\theta} \quad (52-5)$$

بیان کلی برای غلظت پساب رآکتور  $i$  ام، بصورت زیر است،

$$C_i = \frac{C_0}{(n-1)!} (n\theta)^{i-1} e^{-n\theta} \quad (53-5)$$

منحنی‌های غلظت پساب که با استفاده از رابطه ۵۳-۵، بدست آمده، برای یک، دو، سه یا چهار

رآکتور که بصورت سری باشند، در تصویر ۵-۶، نمایش داده شده است.



تصویر ۵-۸ منحنی‌های غلظت پساب برای هر یک از چهار رآکتور که بصورت سری قرار دارند.

رآکتور جریان قالبی غیرایده‌آل در اکثر رآکتورهای جریان قالبی عملی، معمولاً جریان بخاطر وجود اغتشاشات در ورودی و خروجی جریان و انتشار محوری غیرایده‌آل می‌باشد. بسته به مقدار این تأثیرات، ممکن است منحنی ایده‌آل مادهٔ ردیاب پس‌آب شبیه منحنی‌های تصویر ۵-۹، شود. چون مشخص نمودن این اثرات دشوار می‌باشد، ترکیب این اثرات غیرایده‌آل اغلب از نظر تجزیه و تحلیلی شبیه آن می‌ماند که یک سری رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن، جایگزین رآکتور جریان قالبی گردد (شکل ۸-۵). در این حالت، مشخصات هیدرولیکی این رآکتور جریان قالبی غیر واقعی، با ترسیم بخشی از مواد که در رآکتورهای جریان مستمر مجهز به همزن باقی مانده‌اند، برحسب پارامتر بدون بُعد زمان ماند،  $\theta$  مشخص می‌گردد. بخش موادردیابی که در سیستم باقیمانده  $F$ ، در هر زمان  $t$ ، مساوی مقدار زیر خواهد بود.

$$F = \frac{(V/n)C_1 + (V/n)C_2 + \dots + (V/n)C_n}{(V/n)C_0} \quad (5-54)$$

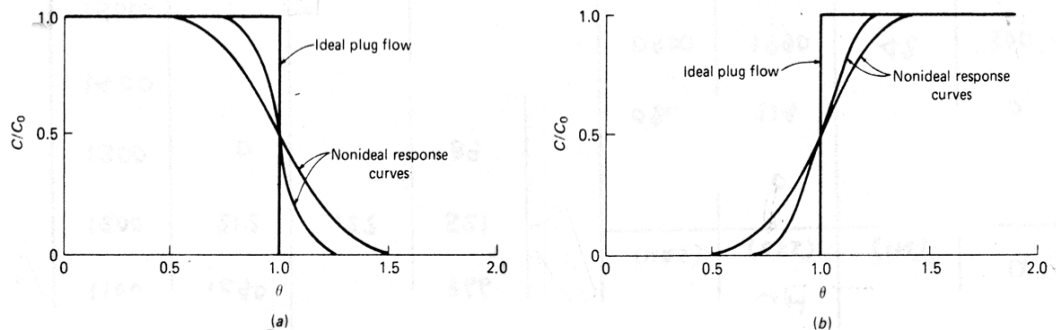
$$F = \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_n}{C_0}$$

در صورت استفاده از رابطهٔ ۵-۵۴، برای بدست آوردن غلظت در پس‌آب سه رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن که بصورت سری قرار دارند، رابطه بصورت زیر خواهد بود.

$$F_{30} = \frac{C_0 e^{-3\theta} + C_0 (3\theta) e^{-3\theta} + C_0 (3\theta)^2 e^{-3\theta} / 2}{C_0} \quad (5-55)$$

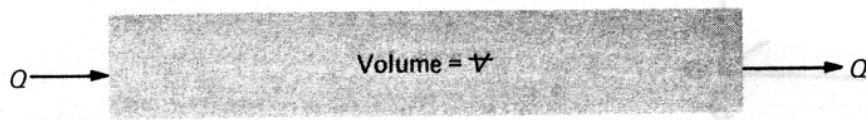
$$F_{30} = \left[ 1 + 3\theta + \frac{(3\theta)^2}{2} \right] e^{-3\theta}$$

منحنی بخش مواد ردیاب باقیمانده در رآکتورهای جریان مستمر مجهز به همزن و سری یک، سه و یا شش تائی در تصویر ۹-۵، مشخص گردیده است. بعنوان مثال، در صورت استفاده از شش رآکتور، حدود ۹۱ درصد جریان برای زمان لااقل  $\theta = 0.5$  درون سیستم رآکتورها باقی خواهد ماند.

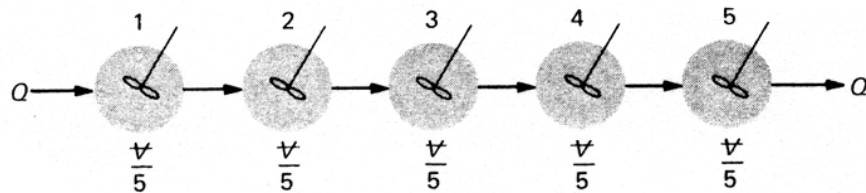


تصویر ۹-۵ منحنی‌های علمی و عمومی پاسخ غیرایده‌آل برای رآکتورهای جریان قالبی.  
(a) زدودن دائم مادهٔ ردیاب. (b) ورودی دائم مادهٔ ردیاب.



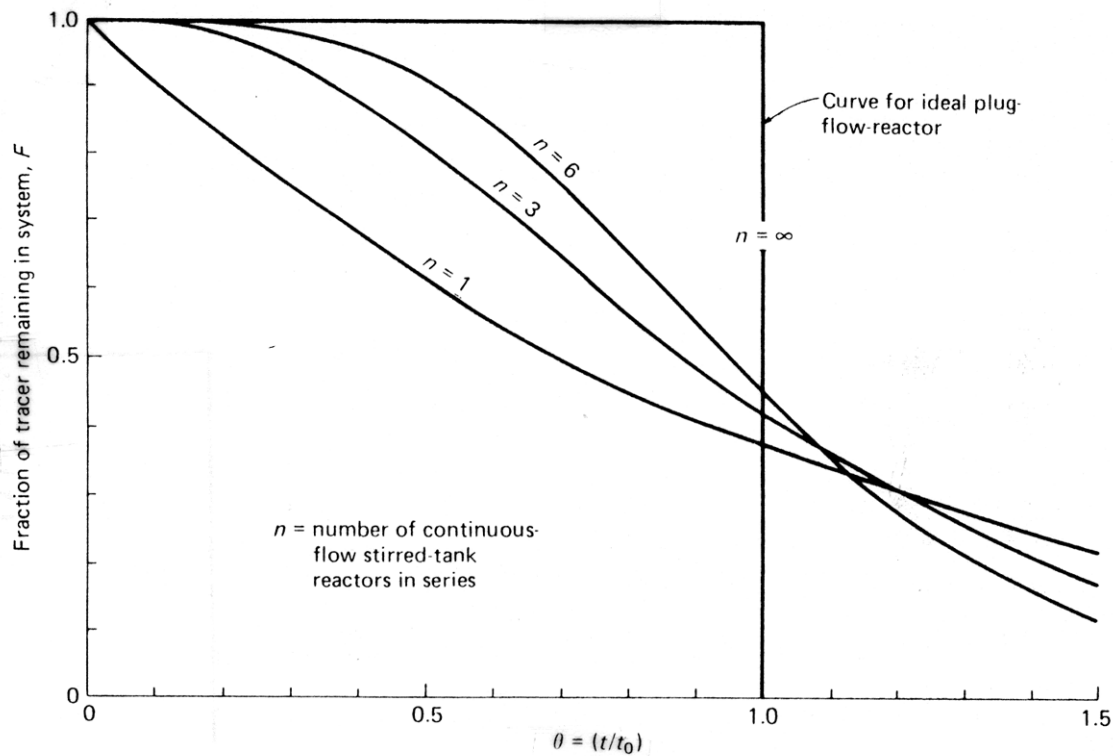


(a)



(b)

تصویر ۵-۱۰ نمای مشخصه مربوط به تجزیه و تحلیل هیدرولیکی یک رآکتور جریان قالبی با انتشار، که از رآکتورهای جریان مستمر مجهز به همزن و بصورت سری استفاده شده است. (a) رآکتور جریان قالبی اصلی (b) رآکتور جانشینی که از یک سری رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن تشکیل یافته است.



تصویر ۵-۱۱ منحنی‌های پاسخ برای رآکتورهای جریان مستمر مجهز به همزن و بصورت سری.

## ۴-۵ تجزیه و تحلیل مراحل

تجزیه و تحلیل مراحل، مستلزم ارزیابی جامع عوامل مختلفی است که باید هنگام گزینش مراحل تصفیه فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی و سایر روشهای تصفیه برای رسیدن به اهداف یاد شده طرح در نظر گرفت. هدف بررسی مراحل تصفیه، انتخاب مناسبترین روشهای تصفیه فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی و عملیترین معیارهای ممکن می باشد.

مهمترین عواملی که باید مدنظر قرار گیرند، در جدول ۳-۵، مشخص شده اند. این عوامل در اینجا مشخص گشته اند تا ماهیت متفاوت اطلاعاتی که باید برای انجام ارزیابی دقیق مراحل تصفیه فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی در امر تصفیه فاضلاب، در دسترس باشد را نمایان سازد.

جدول ۳-۵. عوامل مهمی که باید هنگام گزینش و ارزیابی مراحل تصفیه فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در نظر گرفت.

عامل	شرح
۱- مناسب بودن روش تصفیه	مناسب بودن روش تصفیه را می توان بر اساس تجارب گذشته، مشخصات تصفیه خانه های کامل و اطلاعات ناشی از مطالعات درون تصفیه خانه، ارزیابی کرد. در صورت مشاهده شرایط جدید و غیر متعارف، انجام مطالعات تجربی ضروری خواهد بود.
۲- مناسب بودن دبی جریان	روش تصفیه باید با میزان جریان سازگار باشد. بعنوان مثال، استفاده از استخرهای تثبیت فاضلاب برای جریانهای بسیار بزرگ مناسب نخواهد بود.
۳- مناسب بودن تغییرات جریان	اگرچه تغییرات کوچک مجاز می باشد، ولی در صورت ثابت بودن دبی جریان راندمان کار مراحل مختلف تصفیه بهتر خواهد شد. در صورتیکه تغییرات جریان زیاد باشد، یکنواخت کردن جریان امری ضروری است.
۴- مشخصات فاضلاب ورودی	مشخصات فاضلاب ورودی بر روی انواع روشهایی که باید مورد استفاده قرار گیرد (بعنوان مثال، شیمیایی یا بیولوژیکی) و شرایط لازم برای عملکرد بهتر آنها، تأثیر می گذارد.
۵- مواد بازدارنده و غیر مؤثر در امر تصفیه	چه موادی و تحت چه شرایطی مانع امر تصفیه می گردند؟ چه ذراتی در امر تصفیه مؤثر نمی باشند؟
۶- محدودیت های اقلیمی	درجه حرارت بر روی سرعت واکنش اکثر مراحل شیمیایی و بیولوژیکی تصفیه تأثیر می گذارد. وجود یخبندان بر روی مراحل فیزیکی تصفیه مؤثر می باشد.
۷- سینتیک واکنش و گزینش رآکتور	تعیین اندازه رآکتور بر اساس سینتیک واکنش خواهد بود. مشخصات مربوط به میزان این سینتیک معمولاً از تجربه، کتب منتشره، و نتایج مطالعات خصوصی هر تصفیه خانه بدست می آید. اثر سینتیک - واکنش در گزینش رآکتور را می توان در قسمت ۵-۵، ملاحظه کرد.

شرح	عامل
نحوه عمل یک روش را اغلب با کیفیت پسآب، که باید متناسب با استانداردهای تخلیه پسآب باشد، می‌سنجند.	۸- نحوه عملکرد
انواع و مقدار مواد جامد، مایع و یا گازی که تولید می‌شوند باید شناخته‌شده و یا تخمین زده شوند، اغلب از مطالعات تجربی و در تصفیه‌خانه برای مشخص کردن صحیح این مواد استفاده می‌شود.	۹- موادی که در اثر تصفیه ایجاد می‌شوند
آیا محدودیت‌هایی وجود دارد که حمل لجن را گران یا ناممکن سازد؟ در اکثر موارد، یک روش تصفیه را فقط باید بعد از اینکه روشهای تصفیه و حمل لجن در آن مشخص شد، برگزید.	۱۰- محدودیت‌های حمل لجن
مقدار مواد غذایی غیرآلی باید در مراحل تصفیه بیولوژیکی مدنظر قرار گیرد. عوامل محیطی مانند بادهای شدید و جهت بادهای ممکن است، محدودیت‌هایی در استفاده از بعضی روشها، بویژه هنگامیکه بوهائی تولید شود، ایجاد نماید.	۱۱- محدودیت‌های زیست محیطی
چه منابعی و به چه مقداری باید برای یک دوره طولانی کار مراحل تصفیه بصورت موفقیت‌آمیز مورد استفاده قرار گیرند؟	۱۲- نیاز به مواد شیمیائی
اگر سیستم بخواهد مقرون به صرفه باشد، میزان نیاز انرژی و مخارج محتمل بعدی آن باید مشخص باشد.	۱۳- نیاز به انرژی
چه منابع دیگری را باید برای تکمیل سیستم مورد نظر تصفیه که از روشهای مختلف تصفیه فیزیکی و شیمیائی و بیولوژیکی پیشنهادی استفاده می‌کند، مورد استفاده قرار داد؟	۱۴- سایر منابع لازم
بیشترین مقدار انعطاف‌پذیری هریک از روشهای فیزیکی، شیمیائی و بیولوژیکی مورد نظر چقدر بوده است؟ آیا این روشها به آسانی قابل تغییر می‌باشند؟ آیا می‌توانند راندمان خود را هنگام بارهای لحظه‌ای حفظ کنند؟ اگر چنین است، این پدیده‌ها چه اثراتی بر روی کیفیت پسآب خواهند گذاشت.	۱۵- انعطاف پذیری
تحت شرایط متعارفی و شرایط اضطراری مانند بارهای لحظه‌ای چه پیچیدگی‌هایی در کار سیستم دیده می‌شود؟ اپراتوری که در این سیستم کار می‌کند، چه دوره‌هایی را باید گذرانده باشد؟	۱۶- پیچیدگی
به چه مراحل کمکی نیاز هست؟ این مراحل بویژه هنگامیکه بصورت غیرعملی در می‌آیند، چه تأثیری بر روی کیفیت پسآب می‌گذراند؟	۱۷- مراحل فرعی ضروری
آیا می‌توان از مراحل تصفیه فیزیکی و شیمیائی و بیولوژیکی در تأسیسات "Compatibility" فعلی استفاده نمود؟ آیا گسترش تصفیه‌خانه به آسانی میسر است؟ آیا می‌توان نوع رآکتور را اصلاح نمود؟	۱۸- مطابقت

## گزینش روابط سرعت - واکنش با معیار بارگذاری

تعیین روابط مناسب سرعت واکنش بر اساس تجربه و یا مطالعات محلی در تصفیه‌خانه، برای شرح مرحله‌ای که باید طرح‌ریزی گردد، الزامی است. چنین روابطی معمولاً دارای شکل روابط سرعت که در جدول ۱-۵، ارائه شده، می‌باشند. روابط مختلف سرعت که برای تصفیه بیولوژیکی تهیه گردیده‌اند، در بخش ۹ مدنظر قرار گرفته و کاربرد آنها در بخش ۱۰ مشخص گردیده‌است. در صورتیکه تهیه روابط مناسب امکان پذیر نباشد، می‌توان از معیارهای بارگذاری استفاده نمود. چنین معیارهایی معمولاً نتیجه مشاهدات تجربی چندین ساله می‌باشند. بعنوان مثال، اگر در روشی که میزان بارش  $10 \text{ Kg/m}^3$  است، کیفیت پساب قابل قبول شده و در روشی که میزان بارش  $20 \text{ Kg/m}^3$  است، کیفیت پساب مطلوب نباشد، احتمال وقوع مجدد این تجربه موفقیت‌آمیز فراوان خواهد بود. متأسفانه، گزارشات اغلب بر پایه صحیحی نبوده و حدود این معیارهای بارگذاری بندرت مشخص شده‌است.

## انتخاب نوع رآکتور

یکی از مهمترین مسائلی که باید در طرح هر روش شیمیائی و بیولوژیکی در نظر گرفت، نوع رآکتور یا رآکتورهای است که باید برای این مرحله تصفیه مورد استفاده قرارگیرد. عوامل عملی که باید مدنظر قرارداد، عبارتند از (۱) ماهیت فاضلابی که باید مورد تصفیه قرارگیرد، (۲) سینتیک واکنش در مراحل تصفیه، (۳) نیازهای هر مرحله تصفیه و (۴) شرایط منطقه‌ای. در عمل، مخارج ابتدائی ساختمانی و هزینه بهره‌برداری و نگهداری در گزینش رآکتور تأثیر می‌گذارند. بخاطر اینکه اهمیت خاص هر یک از این عوامل با هر کاربرد تغییر می‌کند، هر عامل را باید بطور مجزا هنگامیکه نوع رآکتور انتخاب شد، مورد ارزیابی قرار داد. اثرات سینتیک واکنش در گزینش رآکتور، درمبحث ۵-۵، ارزیابی می‌شود.

## ۵-۵ سینتیک واکنش و گزینش رآکتور

هدف این قسمت، ارائه نوع تجزیه و تحلیل‌هایی است که در تعیین اثر سینتیک واکنش هنگام گزینش رآکتور که شامل (۱) یک سری رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن مشخص و (۲) یک رآکتور جریان قالبی با پراکندگی محوری و شرایط ورود و خروج دلخواه باشد، صورت خواهد گرفت.

## رآکتورهای جریان مستمر مجهز به همزن و بصورت سری با تبادل

به منظور نمایش، با فرض اینکه حذف مواد مصرفی (ورودی واکنش) از یک واکنش درجه اول تبعیت کند،  $(r_c = -KC)$  نخست فرض می شود که جریان در رآکتورهای سری جریان مستمر و مجهز به همزن، ایده آل باشد. در این رآکتورها پس آب یکی از رآکتورها، ورودی دیگری محسوب می شود (تصویر ۵-۱۰). رابطه موازنه جرمی برای  $n$  آمین رآکتور، بصورت زیر خواهد بود.

۱- بیان صورت کلی: (۵۶-۵)

میزان مصرف ماده ورودی در رآکتور  $n$  ام + میزان جریان ماده ورودی بخارج رآکتور  $n$  ام - میزان جریان ماده ورودی بدرون رآکتور  $n$  ام = میزان تجمع ماده ورودی در رآکتور  $n$  ام

۲- خلاصه بیان فوق:

$$\text{مصرف} + \text{خروجی} - \text{ورودی} = \text{تجمع} \quad (57-5)$$

۳- نمایش ریاضی:

$$\frac{V}{n} \frac{dC_n}{dt} = QC_{n-1} - QC_n + V/n(-KC_n) \quad (58-5)$$

در حالت پایدار  $(dC_n/dt = 0)$ ، رابطه ۵-۵۸، را می توان بصورت زیر ساده نمود.

$$\frac{C_n}{C_{n-1}} = \frac{1}{1 + kV/nQ} \quad (59-5)$$

اگر رابطه ۵-۵۹، را برای  $n$  رآکتور سری بکار بگیریم، حاصل می شود.

$$\frac{C_n}{C_0} = \frac{1}{(1 + kV/nQ)^n} \quad (60-5)$$

که در آن:

$$V = \text{حجم کلیه رآکتورهای سری}$$

$$n = \text{تعداد رآکتورهای سری}$$

$$C_0 = \text{غلظت مواد در ورودی}$$

با نوشتن مجدد رابطه ۵-۶۰، بصورت زیر، می توان  $V$  کل حجم لازم برای راندمان های مختلف حذف مواد را بر حسب دبی جریان  $(Q)$  و ثابت سرعت مخصوص واکنش  $(K)$  بیان داشت:

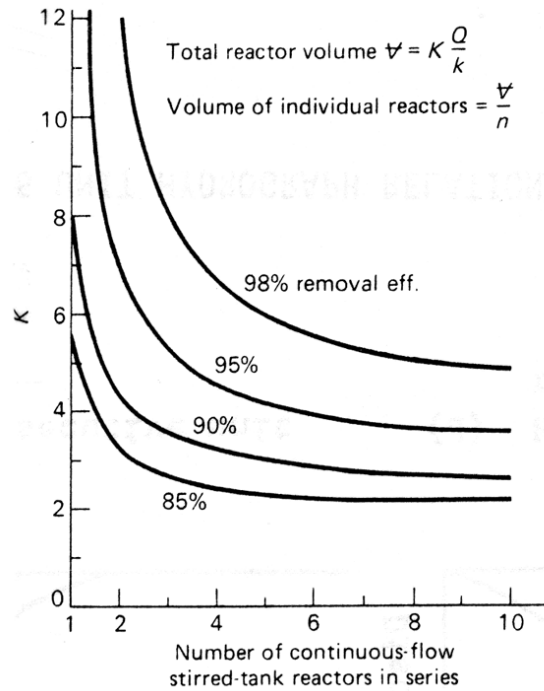
$$V = \frac{nQ}{k} \left[ \left( \frac{C_0}{C_n} \right)^{1/n} - 1 \right] \quad (61-5)$$

حجم کل مورد نیاز برای راندمان‌های مختلف حذف مواد در واکنش درجه یک برای ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۲۸، ۳۰، ۳۲، ۳۴، ۳۶، ۳۸، ۴۰، ۴۲، ۴۴، ۴۶، ۴۸، ۵۰، ۵۲، ۵۴، ۵۶، ۵۸، ۶۰، ۶۲، ۶۴، ۶۶، ۶۸، ۷۰، ۷۲، ۷۴، ۷۶، ۷۸، ۸۰، ۸۲، ۸۴، ۸۶، ۸۸، ۹۰، ۹۲، ۹۴، ۹۶، ۹۸، ۱۰۰ درصد، به ترتیب در جدول ۵-۴، مشخص شده است (به تصویر ۵-۱۰، توجه کنید). این مقادیر بصورت ترسیمی در تصویر ۵-۱۲، مشخص گردیده‌اند. در مثال ۵-۲، به بررسی واکنش‌های درجه دوم پرداخته شده است.

**جدول ۵-۴ حجم مورد نیاز رآکتورهای سری جریان مستمر مجهز به همزن و رآکتورهای جریان قالبی بر حسب  $Q/K$ ، برای راندمان‌های مختلف حذف در واکنش‌های درجه یک<sup>a</sup>.**

حجم رآکتور $V = K(Q/k)$				تعداد رآکتورها که بصورت سری قرار گرفته‌اند
راندمان حذف	راندمان حذف	راندمان حذف	راندمان حذف	
٪۹۸	٪۹۵	٪۹۰	٪۸۵	
۴۹/۰۰	۱۹/۰۰	۹/۰۰	۵/۶۷	۱
۱۲/۱۴	۶/۹۶	۴/۳۲	۳/۱۸	۲
۶/۶۴	۴/۴۸	۳/۱۰	۲/۴۸	۴
۵/۵۰	۳/۹۰	۲/۸۲	۲/۲۲	۶
۵/۰۴	۳/۶۰	۲/۶۴	۲/۱۶	۸
۴/۸۰	۳/۵۰	۲/۶۰	۲/۱۰	۱۰
۳/۹۱	۳/۰۰	۲/۳۰	۱/۹۰	جریان قالبی

a حجم هریک از رآکتورها را می‌توان با تقسیم عدد موجود در تابلو بر تعداد رآکتورها بدست آورد.



تصویر ۵-۱۲ مقادیر  $K$  که برای محاسبه کل حجم مورد نیاز برای راندمان‌های مختلف حذف مواد در واکنش‌های درجه یک ( $r_c = -kC$ ) در رآکتورهای سری جریان مستمر مجهز به همزن، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### رآکتور جریان قالبی با تبادل (Conversion)

در نهایت، اگر تعداد رآکتورهای جریان مستمر مجهز به همزن در تصویر ۵-۱۰، افزایش یابد، حجم لازم به مقداری نزدیک می‌شود که برای یک رآکتور جریان قالبی مورد نیاز است. حجم لازم را می‌توان با نوشتن رابطه موازنه جرمی مواد برای المان تصویر ۵-۶، محاسبه نمود.

۱- بیان بصورت کلی: (۵-۶۲)  
 میزان مصرف ماده ورودی واکنش در رآکتور  $n$  ام + میزان جریان ماده ورودی به خارج رآکتور  $n$  ام -  
 میزان جریان ماده ورودی بدرون رآکتور  $n$  ام = میزان تجمع ماده ورودی واکنش در رآکتور  $n$  ام

۲- خلاصه بیان فوق:

(۵-۶۳) مصرف + خروجی - ورودی = تجمع

۳- روابط ریاضی:

$$dV \frac{d[C + C + (\partial C / \partial X)dX / 2]}{dt} = QC - Q \left( C + \frac{\partial C}{\partial X} dX \right) + dV(-K) \left[ \frac{C + C + (\partial C / \partial X)dX}{2} \right] \quad (64-5)$$

با حذف عبارات درجه دوم، رابطه ۶۴-۵، را می توان بصورت زیر ساده نمود.

$$dV \frac{\partial C}{\partial t} = -Q \frac{\partial C}{\partial X} dX - dV \quad kC \quad (65-5)$$

در شرایط پایدار

$$\partial C / \partial t = 0 \quad (66-5)$$

$$dV = -Q / K \quad dC / C \quad (67-5)$$

با قراردادن  $AdX$  بجای  $dV$ ، می توان از رابطه ۶۷-۵، بین دو محدوده 0 و  $L$  و  $C_0$  و  $C$  انتگرال گرفت،

$$A \int_0^L dX = -\frac{Q}{K} \int_{C_0}^C C \frac{dC}{C} \quad (68-5)$$

$$AL = V = -\frac{Q}{K} \ln \frac{C}{C_0} \quad (69-5)$$

$$\frac{C}{C_0} = e^{-k(V/Q)} \quad \text{یا} \quad (70-5)$$

که این رابطه مشابه همان رابطه ای است که قبلاً برای رآکتور ناپیوسته بدست آمد. حجم لازم برای رسیدن به سطحی از تصفیه که در جدول ۳-۵، با استفاده از یک رآکتور جریان قالبی با واکنش درجه اول بدست آمده، نیز در جدول ۳-۵، مشخص شده است. باید توجه شود، که در کتب مهندسی شیمی، رابطه حالت باید از برای یک رآکتور جریان قالبی اغلب بصورت زیر نوشته می شود،

$$V = Q \int_r \frac{dC}{r} \quad (71-5)$$



مثال ۳-۵ مقایسه حجم لازم راکتورها برای واکنشهای درجه دوم. با فرض اینکه واکنش از درجه دو ( $r_C = -kC^2$ ) باشد، حجم لازم برای یک راکتور جریان مستمر مجهز به همزن با حجم لازم برای یک راکتور جریان قالبی را برای بدست آوردن ۹۰٪ کاهش در غلظت مواد، مقایسه کنید ( $C_e = 0.1$  و  $C_0 = 1$ ).

حل

۱- حجم لازم برای راکتور جریان مستمر مجهز به همزن را برحسب  $Q/K$  بدست آورید.  
الف: در حالت پایدار، رابطه موازنه جرمی برای راکتور جریان مستمر مجهز به همزن بصورت زیر می باشد (به رابطه ۵-۵۸ توجه کنید).

$$0 = QC_0 - QC_e - V k C_e^2$$

ب: با ساده کردن و جایگزین نمودن مشخصات موجود

$$V = \frac{Q}{K} \frac{C_0 - C_e}{C_e^2} = \frac{Q}{K} \frac{1 - 0.1}{(0.1)^2} = 90 \frac{Q}{K}$$

۲- حجم لازم برای یک راکتور جریان قالبی را برحسب  $Q/K$  بدست آورید.  
الف: در حالت پایدار، رابطه موازنه جرمی برای راکتور جریان قالبی بصورت زیر می باشد (به رابطه ۵-۶۵ توجه کنید).

$$0 = -Q \frac{dC}{dX} dX + AdX(-kC^2)$$

ب: شکل انتگرالی رابطه حالت پایدار بصورت زیر است،

$$V = \frac{Q}{K} \int_{C_0}^{C_e} C_e \frac{dC}{C^2} = \frac{Q}{K} \frac{1}{C} \int_{C_0}^{C_e} C_e = \frac{Q}{K} \left( \frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_0} \right)$$

ج: رابطه زیر با جایگزین نمودن مقادیر غلظت، بدست می آید،

$$V = \frac{Q}{K} \left( \frac{1}{0.1} - \frac{1}{1} \right) = \frac{9Q}{K}$$

$$\frac{V_{CFSTR}}{V_{PFR}} = \frac{90Q/K}{9Q/K} = 10$$

۳- نسبت حجم را بدست آورید.

### مقایسه رآکتورهای جریان مستمر مجهز به همزن و جریان قالبی

از مباحث قبلی می‌توان استنباط کرد که، در واکنشهای درجه یک، حجم کل مورد نیاز برای یک سری رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن (چهار یا بیشتر) نسبتاً کمتر از حجم کل لازم برای یک رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن واحد بوده و اختلاف حجم هنگام افزایش راندمان حذف بیشتر محسوس می‌باشد. اختلاف حجم هنگام افزایش درجه واکنش نیز افزایش می‌یابد. بعنوان مثال، همانطور که در مثال ۳-۵، دیده شد، اگر واکنش از درجه دو باشد، نسبت حجم‌های لازم (رآکتور تک مرحله‌ای جریان مستمر مجهز به همزن به جریان قالبی) برای ۹۰٪ حذف مساوی ۱ : ۱۰ خواهد بود. از سوی دیگر، اگر واکنش‌های حذف مواد ورودی واکنش درجه صفر باشد، نسبت حجم‌های لازم مساوی ۱ خواهد بود. بنابراین، نوع سینتیک واکنش می‌تواند در حجم لازم، تأثیرات فراوانی داشته باشد.

### رآکتورهای جریان قالبی با پراکندگی محوری و تبادل

در صورت در نظر گرفتن یک رآکتور با پراکندگی محوری (جریان غیرایده‌آل) طریقه دیگری برای شرح مشخصات جدول ۵-۴، بدست خواهد آمد. می‌توان فرض نمود که مقادیر میانی جدول ۵-۴، معرف حجم لازم برای یک رآکتور جریان قالبی با تغییر شرایط پراکندگی باشد. بعنوان مثال، اگر محتویات یک رآکتور جریان قالبی کاملاً پراکنده شده بود، نتیجه حاصل معادل یک رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن می‌بود. با شناخت این مطلب که نه یک رآکتور جریان مستمر نه یک رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن مطابق آنچه فرض شده عمل نمی‌کنند، "Wilhelm" و "Wehner" رابطه زیر را برای یک رآکتور با پراکندگی محوری، و سینتیک درجه اول و شرایط ورود و خروج دلخواه، بدست آوردند:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{4a \exp(1/2d)}{(1+a)^2 \exp(a/2d) - (1-a)^2 \exp(-a/2d)} \quad (۷۲-۵)$$

که در آن  $S$  = غلظت ماده در پساب

$S_0$  = غلظت ماده در فاضلاب ورودی

$$a = \sqrt{1 + 4ktd}$$

$d = \text{ضریب پراکندگی} = D / uL$

$D = \text{ضریب پراکندگی محوری، } m^2/h$

$u = \text{سرعت سیال، } m/h$

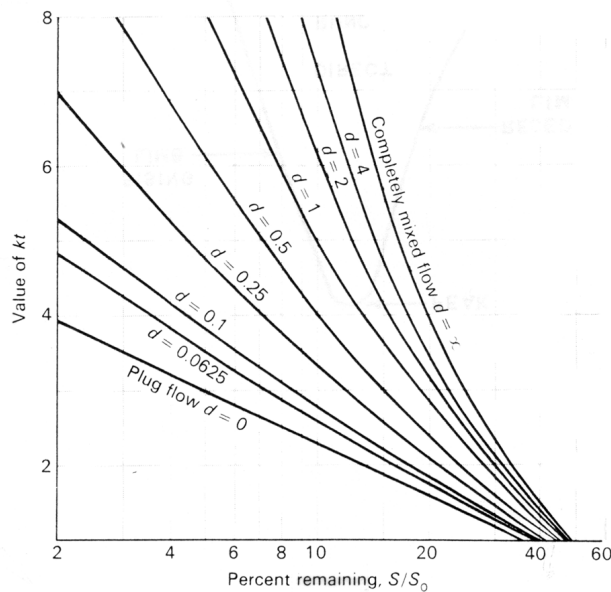
$L = \text{طول، } m$

$k = \text{ثابت واکنش درجه اول } 1/h$

$t = \text{زمان ماند، } h$

برای تسهیل کاربرد رابطه ۵-۷۲، Thirumurthi هنگام تحقیق بر روی استخرهای تثبیت فاضلاب [۹]، تصویر ۵-۱۳، را بدست آورد، که در آن عبارت  $kt$  برحسب  $S / S_0$  با تغییر ضرایب پراکندگی از صفر در یک رآکتور جریان قالبی ایده‌آل تا بی‌نهایت ( $\infty$ ) در یک رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن، ترسیم گشته است. ضرایب پراکندگی برای رآکتورهای متداول لجن فعال - جریان قالبی معمولاً بین دامنه ۰ تا ۰/۲ می‌باشد. در رآکتورهای مجهز به هوادهای مکانیکی که به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا مانند سیستم‌های "اختلاط - کامل" عمل کنند، مقادیر  $d$  احتمالاً بین دامنه ۴ تا  $\infty$  متغیر خواهد بود. اکثر استخرهای تثبیت بین دامنه ۰/۱ تا ۲ می‌باشند.

رابطه بین مقادیر  $kt$  که از مدل پراکندگی بدست آمده، با مقادیر داده شده در جدول ۵-۴، بصورت زیر خواهد بود. برای راندمان حذف ۹۰٪ (۱۰ درصد باقیمانده) و ضریب پراکندگی ۰/۶۲۵، مقدار  $kt$ ، ۲/۶ می‌باشد (به تصویر ۵-۱۳ توجه کنید). اگر  $kt$  بصورت  $(V / Q) k$  نوشته شود، حجم  $V$  مساوی  $(Q / k) ۲/۶$ ، خواهد شد. بامقایسه این مقدار با مشخصات جدول ۵-۴، دیده می‌شود که عملکرد یک رآکتور جریان قالبی با ضریب پراکندگی ۰/۶۲۵ معادل ۱۰ رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن و سری می‌باشد. بنابراین، اگر ضریب پراکندگی یک مخزن مشخص باشد، یافتن معادل آن برحسب یک سری رآکتور و مقایسه حجم لازم آن با حجم یک رآکتور تک مرحله‌ای ایده‌آل جریان مستمر مجهز به همزن یا رآکتور جریان قالبی امکان‌پذیر خواهد بود. برای بررسی بیشتر این عناوین می‌توان به مراجع ۵، ۳، ۲، مراجعه نمود. نحوه استفاده تصویر ۵-۱۳، نیز در مثال ۵-۳، مشخص شده است.



تصویر ۵-۱۳ مقادیر  $kt$  در رابطه **wilhelm** و **wehner** برحسب درصد مواد جذب نشده با ضرایب پراکندگی مختلف

مثال ۳-۵ نابودی باکتریها در استخرهای سری تثبیت فاضلاب. ضریب مشاهده شده نابودی E.coli در استخرهای بیولوژیکی تثبیت فاضلاب را می توان با تحولات درجه اول قابل توجیه دانست. با فرض اینکه ثابت سرعت مخصوص واکنش  $1-d^{-1}$  باشد، غلظت E.coli در پساب سه استخر سری، با غلظت ورودی  $10^6$  ارگانیزم در هر میلی لیتر و دبی متوسط  $5000 m^3/d$ ، را حساب کنید. استخرها مستطیل شکل و دارای عمق متوسط  $1.5 m$  می باشند. سطح استخرها به ترتیب ۱ و ۲ و ۱ هکتار است.

حل

۱- فرض کنید که ضریب پراکندگی در استخرهای کوچکتر  $0.5$  و در استخر بزرگتر  $0.25$  باشد.

۲- مقادیر  $kt$  را برای هر یک از استخرها بدست آورید.

a برای استخرهای کوچکتر:

$$kt = k \frac{V}{Q} = k \frac{A \times d}{Q}$$

$$kt = 1 \frac{1 (1 \text{ Ha} \times 10.000 \text{m}^2 / \text{Ha})(1.5 \text{m})}{5000 \text{m}^3 / \text{d}} = 3$$

b برای استخر بزرگتر:

$$kt = k \frac{V}{Q} = k \frac{A \times d}{Q}$$

$$kt = 1 \frac{1 (2 \text{ Ha} \times 10.000 \text{m}^2 / \text{Ha})(1.5 \text{m})}{5000 \text{m}^3 / \text{d}} = 6$$

۳- مقادیر  $S/S_0$  را از تصویر ۱۱-۵، بدست آورید.

$$S/S_0 = 0.15$$

a استخرهای کوچکتر:

$$S/S_0 = 0.03$$

b استخر بزرگ:

۴- غلظت ارگانیزمها (موجودات زنده) در پساب را بدست آورید.

$$N/N_0 = (0.15)(0.03)(0.15)$$

$$N = 106 \text{ organisms/mL} \times (6.75 \times 10^{-4})$$

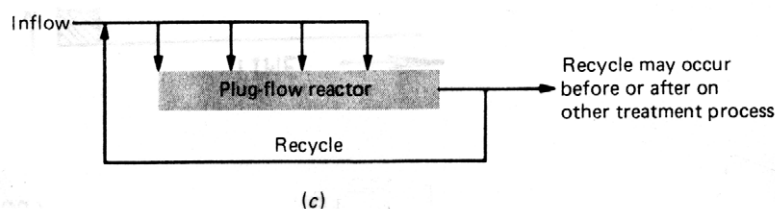
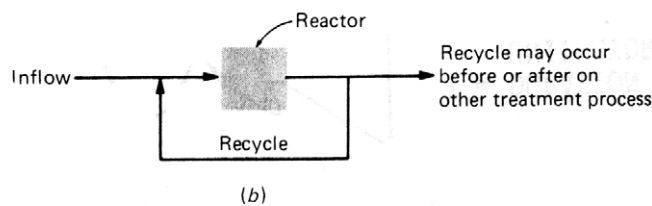
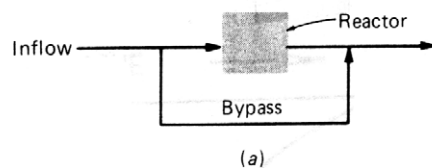
$$N = 675 \text{ organisms/mL}$$

### سایر رآکتورها و ترکیب رآکتورهای گوناگون

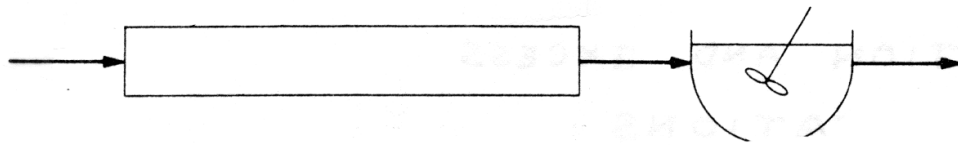
در مباحث قبلی مربوط به رآکتورهای جریان قالبی و جریان مستمر مجهز به همزن، برای تجزیه و تحلیل های مورد نظر از یک نمودار جریان مستقیم استفاده شد. در عمل، از انواع دیگر جریان و ترکیبات مختلف رآکتورها نیز استفاده می شود.

نمودار چند نوع متداولترین رژیم‌های جریان در تصویر ۵-۱۴، دیده می‌شود. رژیم جریان ۵-۱۴a، با مخلوط کردن مقادیر متفاوت فاضلاب تصفیه شده و تصفیه نشده برای حصول سطوح متوسط تصفیه، مورد استفاده قرار می‌گیرد. رژیم جریان تصویر ۵-۱۴b، اغلب برای کنترل بیشتر هر مرحله بوده و در بخش‌های بعدی دقیقاً مورد بررسی قرار خواهد گرفت. رژیم جریان تصویر ۵-۱۴c، برای کاهش بار مواد در هر مرحله بکار گرفته می‌شود. هریک از این جریان‌ات هیدرولیکی بعداً در بخش‌های آینده مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت.

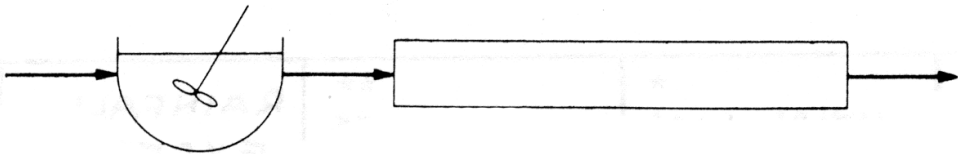
از بین تعداد بیشمار ترکیب همگن و مورد استفاده رآکتورها دو ترکیب با استفاده از یک رآکتور جریان قالبی و یک رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن را می‌توان در تصویر ۱۳-۵، مشاهده نمود. در تصویر ۵-۱۵a، اختلاط کامل در مرحله دوم و در تصویر ۵-۱۵b، در مرحله اول صورت می‌پذیرد. اگر هیچ واکنشی صورت نگرفته و بعنوان مثال، رآکتورها فقط برای یکنواخت کردن دما مورد استفاده قرار گیرند، نتیجه مشخص خواهد بود [۲]. اگر واکنشی بوقوع بپیوندد، بهر حال، محصول دو سیستم رآکتور می‌تواند متفاوت باشد (به مسئله ۵-۱۴، مراجعه کنید). استفاده از چنین سیستم‌های ترکیبی بستگی به شرایط ویژه محصول مورد نیاز دارد. اطلاعات بیشتر راجع به بررسی چنین روش‌هایی را می‌توان در مراجع ۵، ۳، ۲ و ۱ یافت.



تصویر ۵-۱۴ رژیم‌های جریان که معمولاً در تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. (a) جریان بای پاس (فرعی) (رآکتور جریان قالبی یا رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن). (b) با جریان برگشتی (رآکتور جریان قالبی و یا رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن). (c) ورودی مرحله‌ای همراه و یا بدون برگشت جریان (رآکتور جریان قالبی).



(a)



(b)

تصویر ۵-۱۵ سیستم‌های ترکیبی (Hybrid reactor). (a) جریان قالبی و سپس اختلاط کامل. (b) اختلاط کامل و سپس جریان قالبی.

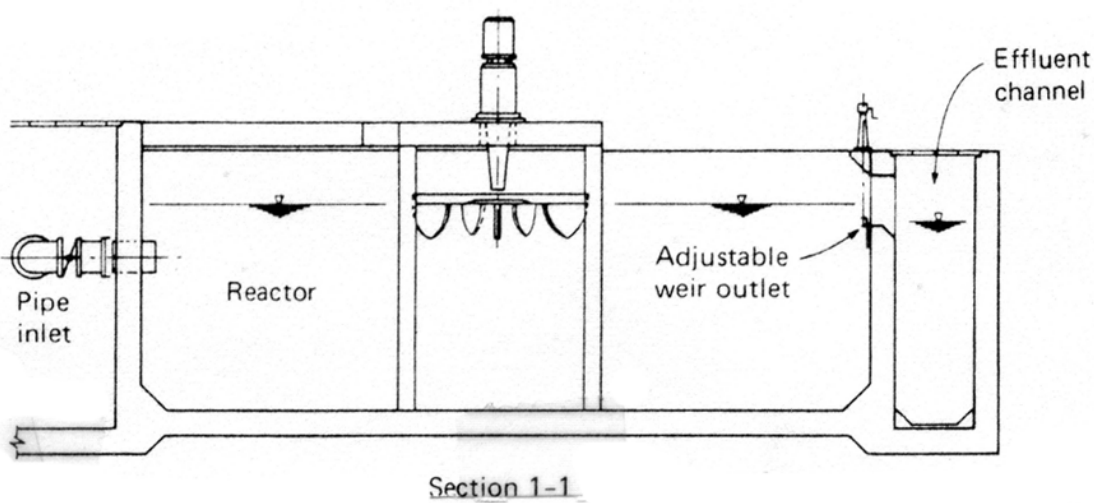
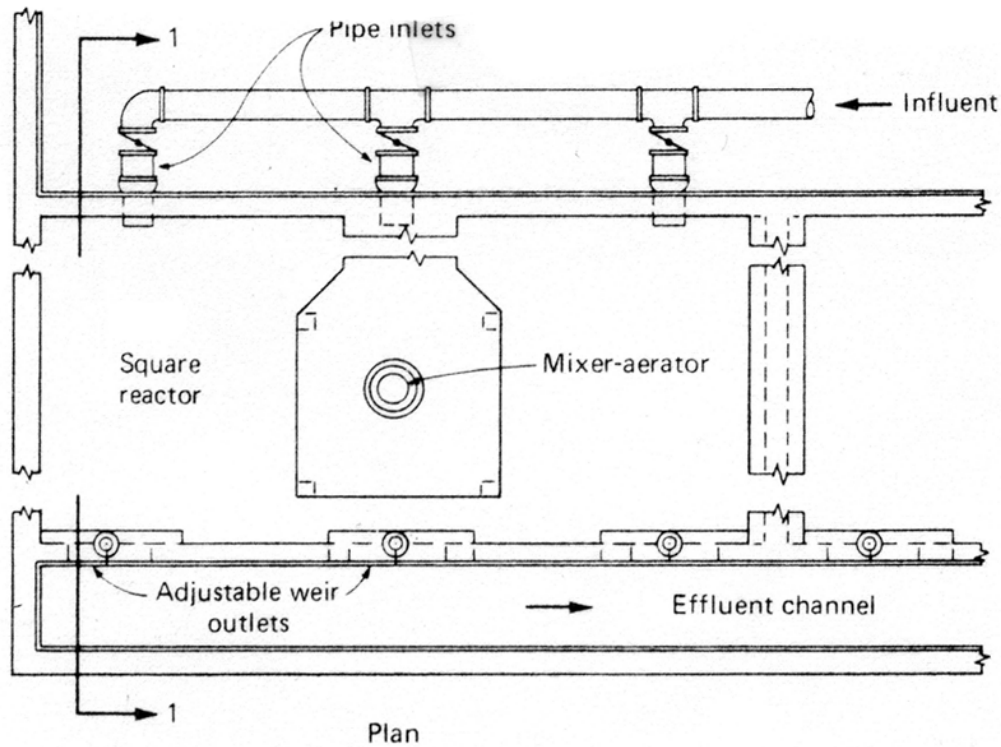
### جنبه‌های عملی طرح رآکتور

اگر چه بسیاری از جوانب عملی طرح بطور مشروح در این بخش مورد بحث قرار گرفته، ولی برخی از جوانب عملی طرح رآکتورها باید در اینجا تذکر داده شود. توجه به این مطلب بسیار حائز اهمیت است، زیرا اکثراً به باد فراموشی سپرده شده و یا کمتر مدنظر قرار می‌گیرد. به همین خاطر بسیاری از تصفیه‌خانه‌ها از نظر هیدرولیکی همانطور که طراحی شده‌اند، کار نمی‌کنند.

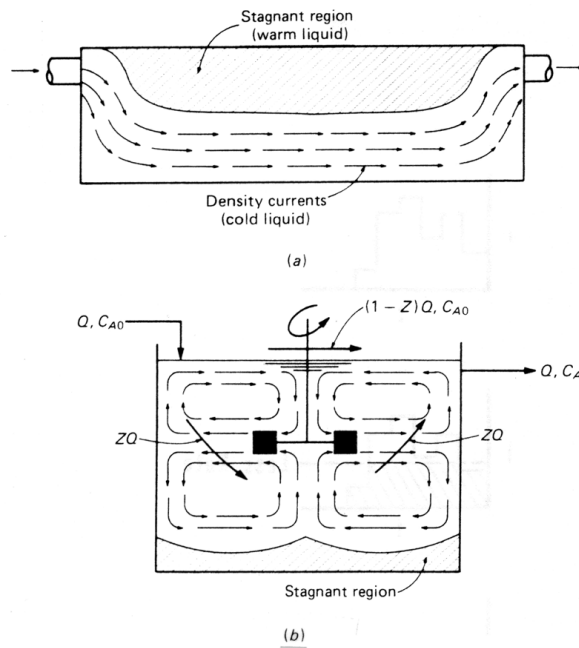
یکی از مهمترین مسائل علمی در طرح رآکتور چگونگی رسیدن به شرایط مطلوبی است که در بررسی نحوه عملکردشان تصریح شده است. بعنوان مثال، هنگامیکه یک رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن طراحی می‌شود، چگونگی ورود جریان باید مشخص شده تا شرایط تئوریک در مورد پراکندگی سریع و کامل برآورده شود. باید توجه داشت که عملاً شرایط ایده‌آل همیشه حاصل نشده و باید اقداماتی بعمل آورد تا این اثرات مهم بحداقل تقلیل یابند. در تصویر ۵-۱۶، نمونه‌ای برای ورودی و خروجی یک رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن دیده می‌شود.

جریان کوتاه (short circuit) از جمله مسائل متداولی است که در عملکرد رآکتور تأثیر می‌گذارد. اگر فاضلاب ورودی سردتر و یا گرمتر از مایعی باشد که درون رآکتور موجود است، جریانهای غلیظ (density currents) سبب ایجاد جریان کوتاه در رآکتورهای جریان قالبی می‌شوند (تصویر ۵-۱۷a). در مناطق گرمسیر، عملکرد مخازن ته‌نشینی بزرگ نیز می‌تواند تحت تأثیر جریانهای غلیظ باشد. برای اصلاح این اشکال در رآکتورهای جریان قالبی می‌توان از صفحات غوطه‌ور انحراف‌کننده که ممکن است، در کف و یا بالای مخزن نصب شوند، استفاده نمود. در روش دیگر،

برای متعادل کردن دما ممکن است، به اشکال مختلف انرژی نیاز باشد. برای این منظور، از مخلوط کردن‌های مکانیکی و هوای تزریق شده، استفاده می‌شود. استفاده غیر مؤثر از حجم رآکتور و وقوع جریان کوتاه که بخاطر اختلاط کم صورت می‌پذیرد (تصویر ۱۷b-۵)، نیز می‌تواند از جمله مشکلات موجود در رآکتورهای مخلوط کننده، بویژه هنگامیکه از مخازن مستطیل استفاده می‌شود، باشد.



تصویر ۱۷-۵ نمونه‌ای برای ورودی و خروجی رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن



تصویر ۵-۱۷ وقوع جریان کوتاه بخاطر جریانهای غلیظ و عدم اختلاط کافی، (a) جریان کوتاه بخاطر جریانهای غلیظ در رآکتورهای جریان آرام (b) (plug-flow) جریان کوتاه بخاطر عدم اختلاط کافی در رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن.

#### مسائل

۵-۱. مشخصات زیر برای واکنش  $A \rightarrow B + C$  داده شده است. درجه واکنش و مقدار ثابت سرعت واکنش  $K$  را بدست آورید.

حد اقل $t$	۰	۱۰	۲۰	۴۰	۶۰
$A, \text{mg/L}$	۹۰	۷۲	۵۷	۲۶	۲۳

۵-۲. واکنش دو مولکولی  $A + B \rightarrow P$  در عرض ۱۰ دقیقه بمیزان ۱۰٪ کامل می شود. اگر غلظت اولیه  $A$  و  $B$   $1 \text{ mol/L}$  باشد، ثابت سرعت واکنش را بدست آورده، زمانی که واکنش بمیزان ۹۰٪ کامل گردد را تعیین نمایید.

۵-۳. مقادیر زیر برای ثابت سرعت واکنش، در واکنش  $A + B \rightarrow P$  بدست آمده است.

$$K_{25^\circ\text{C}} = 1.5 \times 10^{-2} \text{ L/mol.min}$$

$$K_{45^\circ\text{C}} = 1.5 \times 10^{-2} \text{ L/mol.min}$$

با استفاده از این مشخصات، انرژی اکتیواسیون  $E$  و مقدار سرعت واکنش در  $15^\circ\text{C}$  بدست آورید.



۴-۵. یک واکنش آبی در یک CFSTR آزمایشگاهی (راکتور جریان مستمر مجهز به همزن)، به حجم ۵L، مورد بررسی می‌باشد. stoichiometry (نحوه ترکیبات شیمیائی) واکنش بصورت  $A \rightarrow 2R$  بوده و غلظت ورودی A در راکتور  $1 \text{ mol/L}$  می‌باشد. با استفاده از نتایج جدول، رابطه سرعت این واکنش را بیابید. فرض کنید که جریان بحالت پایدار باشد.

غلظت R در پس‌آب Mol/L	دما °C	میزان ورودی Cm <sup>3</sup> /s	وحله
۱/۸	۱۲	۲	۱
۱/۵	۱۳	۱۵	۲
۱/۸	۸۴	۱۵	۳

۵-۵. سرعت واکنش برای یک ماده ورودی با کاتالیست آنزیم در یک راکتور ناپیوسته (batch) را می‌توان با رابطه زیر، بیان داشت.

$$r_c = -\frac{kC}{K + C}$$

که در آن:

$$k = \text{حداکثر سرعت واکنش، mg/L.min}$$

$$C = \text{غلظت ماده، mg/L}$$

$$K = \text{ثابت، mg/L}$$

با استفاده از رابطه فوق یک تساوی بدست آورید که بتوان آنرا برای پیش‌بینی کاهش غلظت ماده ورودی در طول زمان در یک راکتور ناپیوسته مورد استفاده قرارداد. اگر  $K = 40 \text{ mg/L.min}$  و  $K = 100 \text{ mg/L}$  باشد، زمان لازم برای کاهش غلظت ماده از  $1000 \text{ mg/L}$  به  $100 \text{ mg/L}$ ، را بدست آورید.

۶-۵. می‌خواهیم فاضلاب در یک راکتور جریان مستمر مجهز به همزن تصفیه شود. با فرض اینکه واکنش برگشت‌ناپذیر و درجه اول بوده  $r_c = -kc$  و سرعت واکنش مساوی  $0.15 \text{ d}^{-1}$  باشد، دبی فاضلابی که می‌تواند در این راکتور (با حجم  $20 \text{ m}^3$ ) مورد تصفیه قرار گیرد، را بدست آورید. راندمان تصفیه باید ۹۸٪ باشد. اگر راندمان تصفیه ۹۲٪ باشد، چه حجمی برای تصفیه دبی فوق لازم خواهد بود؟

۷-۵. در واکنش‌های درجه اول حذف مواد، نشان دهید که حداکثر راندمان تصفیه در یک سری رآکتور جریان‌مستمر مجهز به همزن هنگامی بدست می‌آید، که کلیه رآکتورها هم اندازه باشند.

۸-۵. چه تعداد مخزن کلرزی بصورت سری با اختلاط کامل و هر کدام با زمان ماند ۳۰ دقیقه لازم است، تا باکتری‌ها از  $10^6$  ارگانیزم در هر میلی‌لیتر به  $14/5$  ارگانیزم در هر میلی‌لیتر تنزل یابند. ثابت سرعت واکنش درجه اول  $6/1 h^{-1}$  می‌باشد. اگر از یک حوض کلرزی جریان قالبی با زمان ماند مشابه حالت سری فوق استفاده شود، مقدار ارگانیزم‌ها بعد از عمل تصفیه چقدر خواهد بود؟

۹-۵. غلظت BOD نهائی در یک رودخانه که به دریاچه اول از دو دریاچه متصل می‌ریزد،  $20 \text{ mg/L}$  می‌باشد. اگر ثابت سرعت واکنش درجه اول BOD ( $K_1$ )، مساوی  $0/35 \text{ d}^{-1}$  بوده و در هر دریاچه اختلاط بصورت کامل صورت‌پذیرد، غلظت BOD نهائی در خروجی هر دریاچه چقدر خواهد بود؟ جریان رودخانه  $4000 \text{ m}^3/\text{d}$  و حجم دریاچه اول و دوم بترتیب  $20000$  و  $12000$  مترمکعب می‌باشد. فرض کنید که شرایط حالت پایدار باشد.

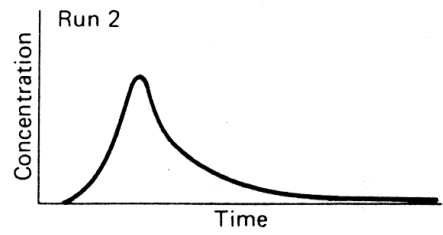
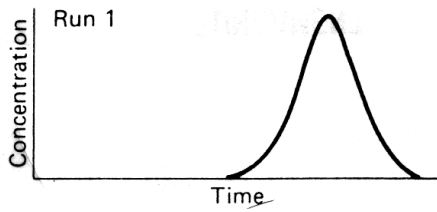
۱۰-۵. در مسئله ۹-۵، اگر طول رودخانه بین دو دریاچه ۳ کیلومتر و سرعت رودخانه  $0/4 \text{ m/s}$  باشد، غلظت BOD نهائی در پساب دریاچه دوم، چقدر خواهد بود؟

۱۱-۵. نسبت حجم مخزنی لازم برای یک رآکتور جریان قالبی آرام به حجم رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن ( $V_{PFR} / V_{CFSTR}$ ) برحسب بخشی از ماده مصرفی اصلی که با سرعت‌های زیر تبدیل می‌شود را ترسیم نمایید.

$$\begin{aligned}r &= -k \\r &= -kC^{0.5} \\r &= -kC \\r &= -kC^2\end{aligned}$$

اگر  $C_0 = 1 \text{ mg/L}$  و  $C = 0/25 \text{ mg/L}$  باشد، نسبت حجم لازم برای هر یک از این سرعت‌ها چقدر خواهد بود؟

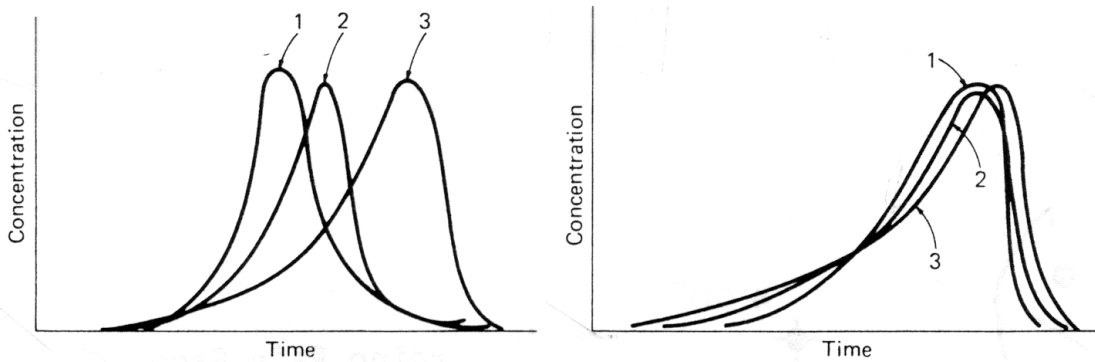
۱۲-۵. چه شرحی می‌توانید راجع به منحنی‌های مواد ردیاب در تصویر ۵-۱۸، که از یک مخزن کلرزی جریان قالبی بدست آمده، بدهید.



تصویر ۱۸-۵ منحنی‌های مواد ردیاب در یک حوض کلرزی جریان قالبی برای مسئله ۵-۱۲.

۱۳-۵. چه نتایجی می‌توان از عملکرد رآکتورهای با مشخصات هیدرولیکی تصویر ۵-۱۹،

کسب کرد؟



تصویر ۱۹-۵ منحنی‌های مواد ردیاب برای دو رآکتور جریان قالبی مختلف با حجم کلی و شکل هندسی یکسان (مسئله ۵-۱۳).

۱۴-۵. اگر سینتیک واکنش از درجه دوم باشد ( $r_c = -kC^2$ )، غلظت پساب را برای هر یک از سیستم

های رآکتور در تصویر ۵-۱۵، محاسبه کنید. برای تسهیل محاسبات از مشخصات زیر استفاده نمایید.

$$k = 1 \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{d}$$

$$Q = 1 \text{ m}^3/\text{d}$$

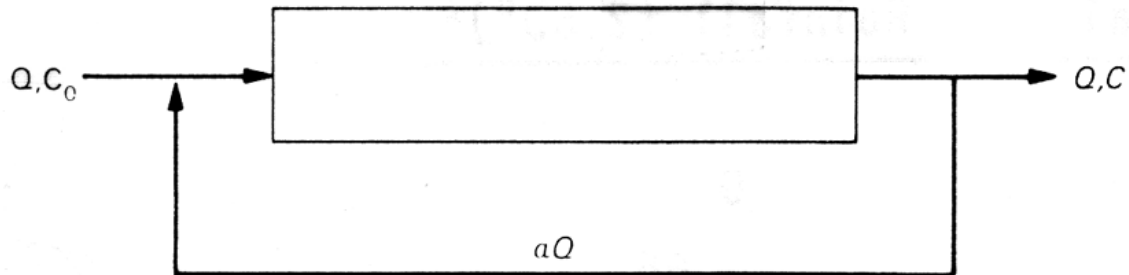
$$V_{\text{PFR}} = 1 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{CFSTR}} = 1 \text{ m}^3$$

$$C_0 = 1 \text{ kg/m}^3$$

نتایج بدست آورده را مورد بررسی قرار دهید. اگر تحولات از درجه صفر یا یک باشد، نتیجه چه خواهد بود؟

۵-۱۵. بخشی از خروجی یک رآکتور جریان قالبی ایده آل مطابق شکل برگشت داده می شود  
 ( $\alpha \geq 0$ ). فرض کنید که سرعت تبدیل را بتوان با  $r_c = -kC$  مشخص نمود.



- (a) منحنی کلی تبدیل را بر حسب نسبت برگشت، رسم کنید.
- (b) یک سری منحنی که اثر نسبت برگشت  $\alpha$  را روی گرادیان غلظت طولی نشان دهد، ترسیم کنید.
- (c) اگر یک رآکتور جریان مستمر مجهز به همزن جایگزین رآکتور جریان قالبی گردد، برگشت جریان چه تأثیری بر روی تبدیل خواهد گذاشت؟
- (d) نسبت برگشت  $\alpha$  چه تأثیری بر روی زمان ماند خواهد داشت؟