

# طراحی راکتور پیشرفته

مرجع: طراحی راکتورهای شیمیایی، لون اشپیل

**Ref.: Chemical Reaction Engineering, Levenspiel**

مدرس: یگانه داودبیگی

## فصل نهم: جریان غیر کامل

نوع جریان و سینتیک واکنش در راکتور دو عامل مهم برای تعیین رفتار یک راکتور با ابعاد و شرایط عملیاتی معین می‌باشد. راکتورهایی که تا کنون با آنها آشنا شدیم راکتورهای ایده‌آل بودند.

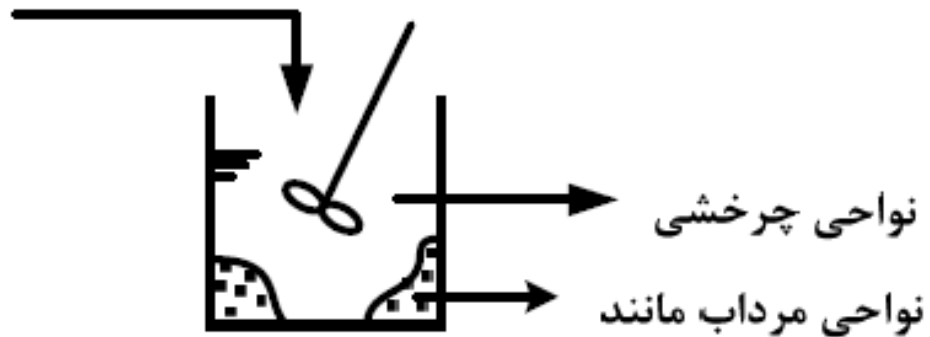
شرط لازم و کافی برای یک جریان Plug این است که زمان اقامت برای تمام اجزای سیال یکسان باشد، یعنی اجزای سیال با هم مخلوط نشوند و به صورت بسته‌ای با هم حرکت کنند.

جریان mixed با فرض اختلاط کامل ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط غلظت در خروجی با غلظت در داخل راکتور یکسان است.

در عمل بنا بر دلایلی خاص، راکتورها از حالت ایده‌آل انحراف پیدا می‌کنند. در این صورت باید میزان انحراف از حالت ایده‌آل مشخص باشد تا بتوان راکتور را طراحی کرد.

## عواملی که موجب انحراف از حالت ایده آل می شوند:

- نواحی ساکن یا نواحی مردابی، جزیی از سیال که اطراف مخزن باقی بماند و خارج نشود،
- جزیی از سیال که بدون هم خوردن از راکتور خارج شود یعنی اصطلاحاً یک مسیر کوتاه بوجود می آید که باعث میشود سیال به هم نخورد،
- در مورد راکتورهای آکنده، قسمتی از جریان که بدون تماس با پکینگ خارج شود،
- پدیده کانالیزه شدن که باعث می شود سیال از یک قسمت خارج شود.



## جریان ایده آل و غیرایده آل قالبی

خصوصیات جریان ایده آل قالبی:

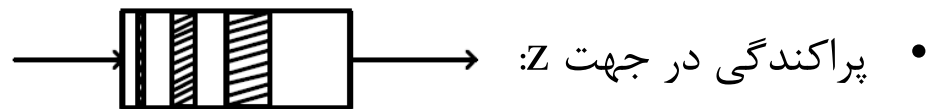
- پروفایل سرعت در تمام مقاطع در طول راکتور ثابت است. به این معنی که نمودار سرعت در سطح مقطع به صورت تخت می باشد و توزیع سرعت در جهت شعاع در طول راکتور ثابت است.
- ضریب اختلاط محوری یا نفوذ در جهت Z صفر است.
- ضریب پراکندگی محوری به سمت بی نهایت میل می کند. در واقع در جهت شعاع اختلاط کامل وجود دارد.

Plug Flow

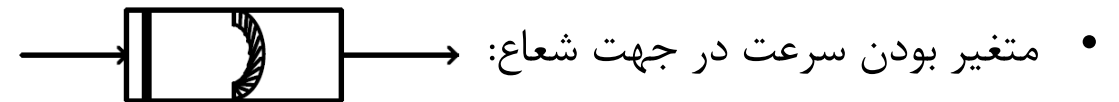


هر جریانی که یک یا چند خصوصیت فوق را نداشته باشد، جریان غیرایده آل است.

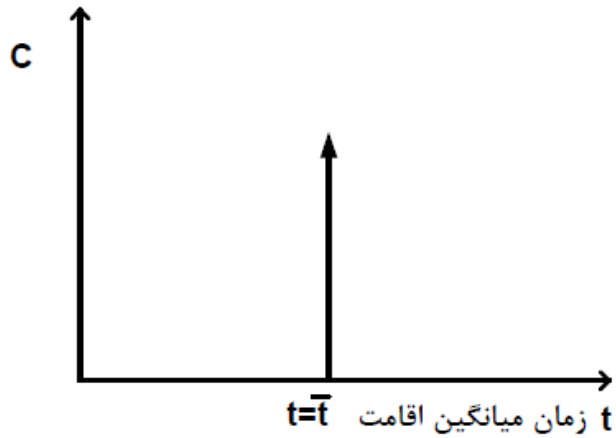
\* نمونه هایی از جریان های غیرایده آل در راکتور قالبی:



• پراکندگی در جهت Z:

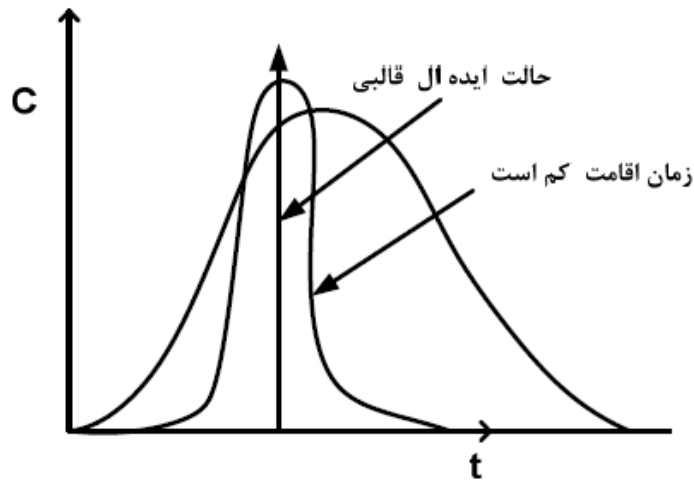


• متغیر بودن سرعت در جهت شعاع:



اگر در راکتور ایده‌آل قالبی یک قطره ردیاب بصورت لحظه‌ای (ضربه‌ای) وارد شود در این صورت در خروجی پس از گذشت زمان معین (زمان اقامت) ردیاب با همان غلظت اولیه مشاهده می‌شود. در واقع در خروجی نیز ماده ردیاب به صورت لحظه‌ای خارج می‌شود و سپس هیچ ماده دیگری دیده نمی‌شود.

نمودار خروج لحظه‌ای ماده ردیاب از راکتور ایده‌آل قالبی



اگر جریان در داخل ظرف غیرایده‌آل باشد، ماده ردیاب در یک لحظه خاص (زمان اقامت) خارج نمی‌شود بلکه به صورت تدریجی از ظرف خارج خواهد شد. به این صورت که قبل از رسیدن به زمان اقامت متوسط ( $\bar{t}$ ) مقداری ماده را در خروجی می‌بینیم، مقداری از ماده ردیاب پس از زمان اقامت خارج می‌شوند و مقداری از آن در زمان اقامت متوسط خارج می‌شود.

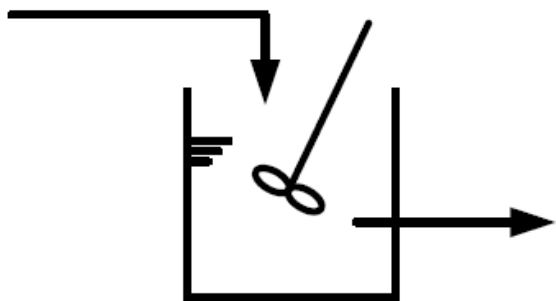
نمودار نحوه خارج شدن ماده ردیاب از ظرف غیر ایده‌آل

## جریان ایده آل و غیرایده آل اختلاط کامل

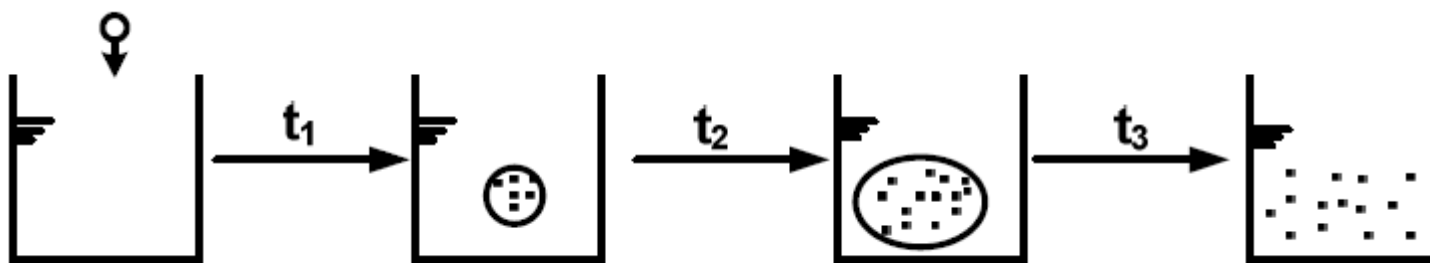
ویژگی جریان اختلاط کامل ایده آل آن است که زمان اختلاط صفر است.

اگر یک قطره رنگی به ظرف وارد شود، بلافاصله تمام ظرف رنگی می‌شود.

در واقع در راکتور اختلاط کامل ایده آل، غلظت ماده ردیاب در تمام ظرف از جمله در خروجی از ظرف در همان لحظه اول برابر  $M/V$  (تعداد مول‌های ماده ردیاب و  $V$ : حجم ظرف) خواهد بود.



در جریان غیرایده آل اختلاطی، پس از گذشت مدت زمانی ماده رنگی در تمام ظرف پخش خواهد شد، نه در لحظه اول.

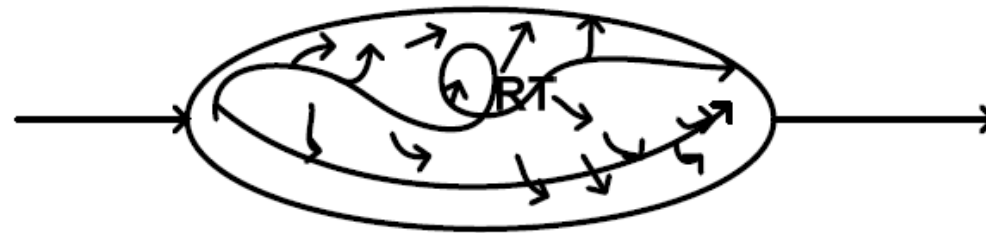


## بررسی جریان‌های غیرایده‌آل:

برای بررسی راکتورهای غیرایده‌آل و تعیین درصد تبدیل در خروجی بایستی زمان اقامت یا زمان ماند سیال را بدست آورده تا بتوان توزیع درصد تبدیل را در خروجی مشخص نمود.

فرض کنید می‌خواهیم با یک راکتور غیرایده‌آل کار کنیم. اگر ظرفی داشته باشیم و بخواهیم رفتار آن را به عنوان یک راکتور پیش‌بینی کنیم باید از نحوه توزیع سرعت سیال در داخل آن آگاهی داشته باشیم. زیرا سیالی که وارد راکتور می‌شود مسیرهای متفاوتی را در داخل آن طی می‌کند.

از آنجا که بررسی توزیع سرعت سیال در راکتور پیچیده است، توزیع زمان اقامت هر جزء در داخل راکتور را بررسی می‌کنیم. بنابراین حداقل اطلاعات لازم آگاهی از زمان اقامت هر جزء سیال در داخل راکتور است که چون مسیرهای متفاوتی را طی می‌کنند، زمان‌های متفاوتی دارند.



**زمان اقامت برای ماده ردیاب** عبارت است از مدت زمان لازم برای مقدار مشخصی از ماده از ظرف بدون توجه به اینکه ماده چه مسیری را در ظرف طی کرده باشد. احتمال مقدار زمان اقامت هر کدام از قسمت‌های سیال صفر تا بی‌نهایت می‌باشد. بعضی مواقع مولکول‌ها جذب سطح راکتور می‌شوند (بی‌نهایت واقعی)، یا در گوشه‌هایی از راکتور حرکت مولکول‌ها بسیار کند است.

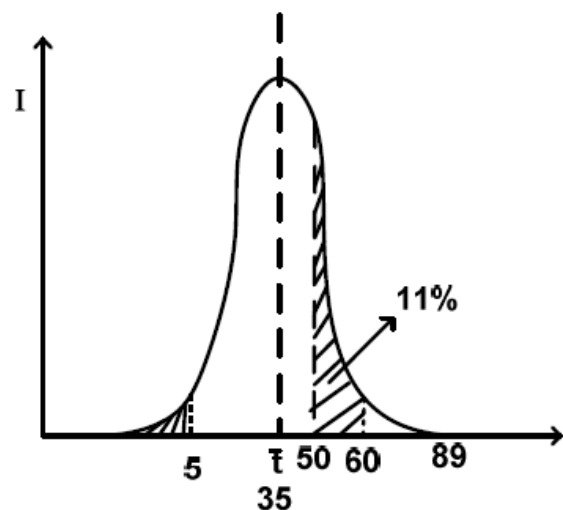
در جریان غیرایده‌آل قالبی، زمان اقامت قسمت‌های مختلف سیال با هم متفاوت می‌باشند. وقتی که جریان غیرایده‌آل از جریان ایده‌آل قالبی فاصله بگیرد، زمان اقامت قسمت‌های مختلف سیال با یکدیگر متفاوت خواهد شد و هر اندازه فاصله میزان غیرایده‌آلی جریان از حالت ایده‌آل بیشتر شود شکل توزیع زمان اقامت جریان از جریان قالبی دورتر و به شکل توزیع زمان اقامت جریان ایده‌آل اختلاطی نزدیکتر می‌شود.

به منظور طراحی راکتور غیرایده‌آل لازم است که زمان اقامت سیال را بدانیم. در واقع بایستی تابع توزیع زمان اقامت (RTD) برای هر راکتور تعیین شود.



## توزیع زمان اقامت (RTD) سیال در راکتور:

یکی از روش‌های بدست آوردن توزیع زمان اقامت روش آماری است.



مثال: توزیع سن افراد جامعه:

شکل روبرو منحنی توزیع سن یک جامعه خاص را نشان می‌دهد. حداکثر سن در این جامعه ۸۹ سال می‌باشد.

محدوده تغییرات از مقدار سن حداقل تا ۸۹ سال می‌باشد (مانند صفر تا بی‌نهایت برای زمان اقامت). شکل کلی منحنی توزیع به این صورت است که از مقدار حداقل شروع می‌شود و به یک مقدار ماکزیمم رسیده و دوباره کاهش پیدا می‌کند.

سطح کل زیر منحنی توزیع برابر ۱ می‌باشد.  $\int_0^{89} I dt = 1$

با محاسبه سطح زیر منحنی توزیع بین دو مقدار خاص می‌توان درصدی از کل را که بین آن دو مقدار قرار دارند محاسبه نمود. به عنوان مثال در شکل بالا، افرادی که سنشان بین ۵۰ تا ۶۰ سال است ۱۱٪ از کل افراد جامعه را شامل می‌شوند. هر منحنی یک میانگین دارد که الزاماً در وسط قرار نمی‌گیرد.

## بدست آوردن الگوی جریان در یک ظرف:

یک جامعه آماری از جریان موجود در ظرف را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این جامعه آماری (ردیاب) می‌تواند ماده‌ای رنگی باشد که به ظرف تزریق می‌شود.

**فرض:** رفتار این تعداد مولکول رنگی از نظر نحوه حرکت در ظرف مانند مولکول‌های جریان اصلی است.

### معیارهای انتخاب ردیاب:

- بی اثر باشد،
- با جریان اصلی هم‌فاز باشد،
- دانسیته یا ویسکوزیته آن با جریان اصلی یکسان باشد،
- ارزان باشد،
- به راحتی قابل اندازه‌گیری باشد.

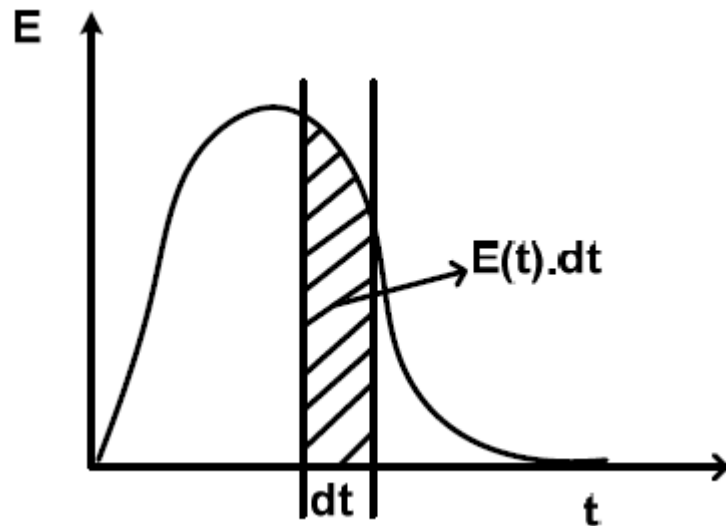
**تحقیق:** چند ماده ردیاب معرفی کنید و روش اندازه‌گیری آن‌ها را بنویسید.

➤ از داده‌های غلظت خروجی نسبت به زمان می‌توان به RTD یا  $E(t)$  رسید.

➤  $E(t)$  نشان می‌دهد که چه مقدار از مولکول‌ها چه زمان اقامتی دارند.

➤ سطح زیر نمودار  $E(t)$  برابر ۱ است. چون تمام مولکول‌ها بالاخره زمان اقامتی بین صفر تا  $t$  دارند.

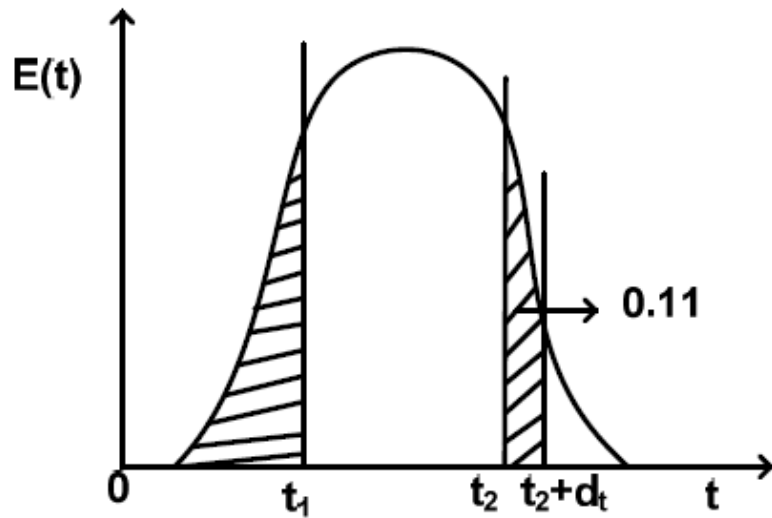
زمان اقامت اجزای سیال را با منحنی توزیع زمان اقامت (RTD) نشان می‌دهند. این تابع به تابع سن یا Age function نیز معروف است.



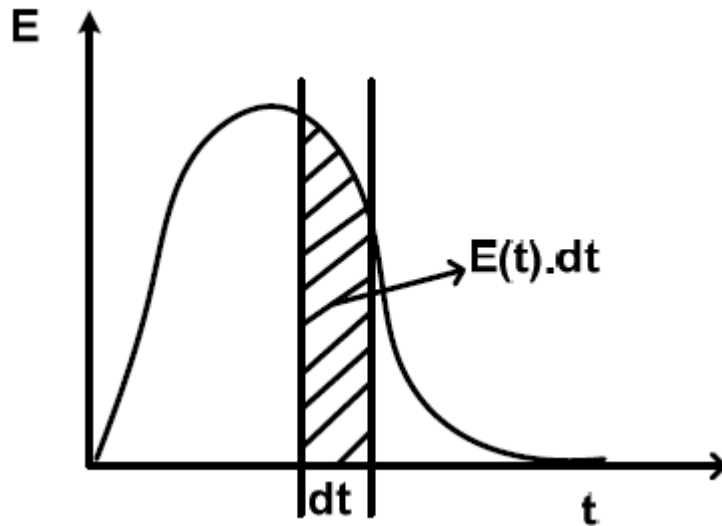
$$E(t) = \text{Residence Time Distribution} = \text{Age function}$$

به عنوان مثال از منحنی RTD نشان داده شده در شکل، میتوان اطلاعات زیر را بدست آورد:

- سطح زیر منحنی در فاصله 0 تا  $t_1$  مشخص می کند چند درصد از اجزای سیال ورودی زمان اقامت بین 0 تا  $t_1$  دارد.
- سطح زیر منحنی در فاصله  $t_2$  تا  $t_2+dt$  مشخص می کند چند درصد از اجزای سیال ورودی زمان اقامت بین  $t_2$  تا  $t_2+dt$  دارند. به عنوان مثال این احتمال در شکل، ۱۱٪ نشان داده شده است.



## منحنی توزیع زمان اقامت (Residence Time Distribution) RTD:



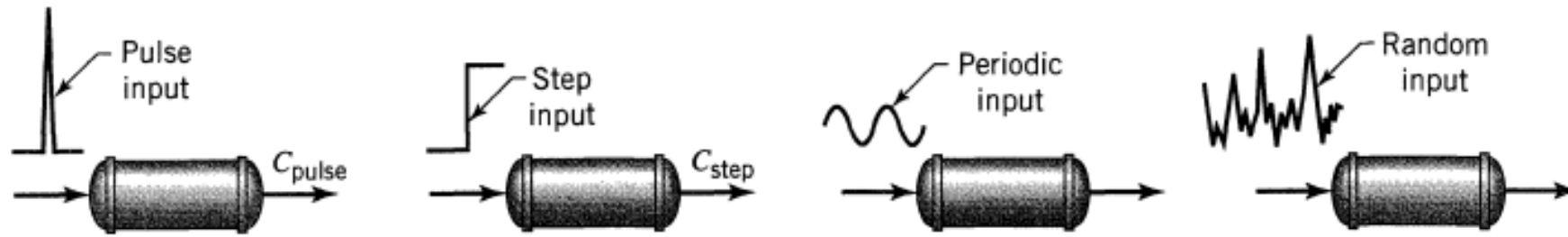
$E$ : تابع سن یا عمر.

واحد  $E$ : معکوس زمان

- منحنی مربوط به سیال خروجی از راکتور است.

روش محاسبه  $E$ :

به منظور محاسبه  $E$  از تکنیک تحریک و پاسخ استفاده می‌کنیم. یعنی تغییری در ورودی ایجاد می‌کنیم و عکس‌العمل سیستم را بررسی می‌کنیم. پاسخ، تابعی از نوع ورودی و اتفاقاتی است که در داخل راکتور می‌افتد.

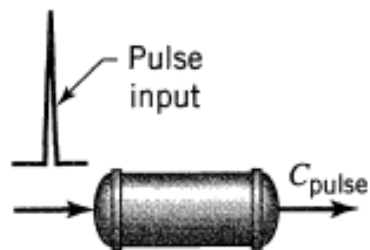


ورودی راکتور را به چه صورت می توان تحریک کرد؟

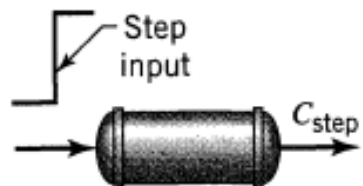
- تحریک پالس
- تحریک پله ای
- تحریک پریودیک
- تحریک تصادفی

از آنجا که بررسی روش تزریق ضربه‌ای و پله‌ای نسبت به روش‌های دیگر آسان‌تر می‌باشد، در ادامه این دو حالت را بررسی می‌کنیم:

- **تحریک پالس:** در این نوع تحریک ماده ردیاب را به صورت ناگهانی وارد راکتور می‌کنیم. اگر ماده ردیاب را ماده‌ای قرمز رنگ فرض کرده و سیال جاری در راکتور را ماده‌ای سفید رنگ در نظر بگیریم، بعد از تزریق ماده ردیاب به صورت تابع ضربه‌ای، در خروجی ابتدا به آرامی مقداری رنگ قرمز دیده می‌شود سپس غلظت رنگ قرمز بالا رفته و بعد کم شده و در نهایت خروجی به رنگ سفید دیده خواهد شد.

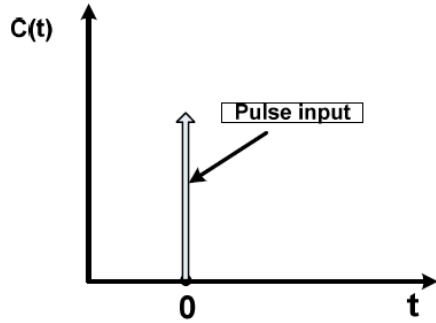


- تحریک پله‌ای: به طور مثال در یک لحظه مشخص جریان سفید را می‌بندیم و شیر جریان قرمز را باز کرده و در یک مقدار ثابت قرار می‌دهیم. جریان سفید با قرمز جایگزین می‌شود و در نهایت جریان کاملاً قرمز خواهد شد.

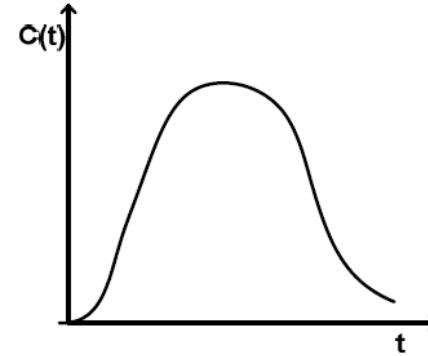


\* پاسخ ناشی از ردیاب تابع نوع تحریک و رفتار جریان در داخل سیستم است.

اگر ورودی را بصورت **ضربه‌ای** تحریک کنیم: (تحریک ضربانی یا پالس ایده‌آل)



t	c <sub>1</sub>
0	0
t <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>
t <sub>2</sub>	c <sub>2</sub>
⋮	⋮
t <sub>n</sub>	c <sub>n</sub>
⋮	⋮
∞	0



در لحظه  $t=0$  ورودی را به صورت پالس تحریک کرده‌ایم. از لحاظ ریاضی  $\int_0^\infty c \cdot dt$  سطح زیر منحنی بر حسب زمان می‌باشد. اگر سطح زیر منحنی را با  $Q$  نشان دهیم و غلظت را بر سطح زیر منحنی تقسیم کنیم داریم:

$$\int_0^\infty \frac{c}{Q} \cdot dt = 1$$

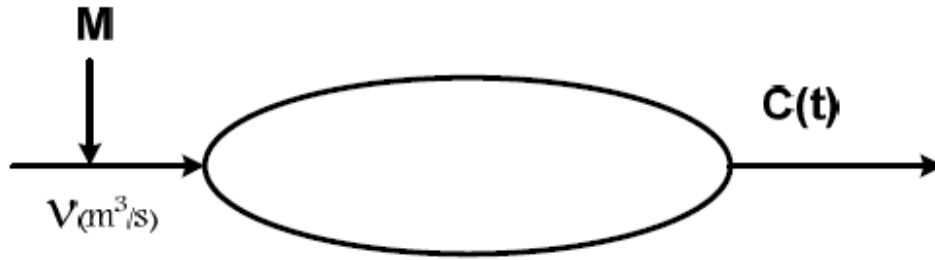
$$\int_0^\infty C \cdot dt = 1$$

$$\int_0^\infty E \cdot dt = 1 \quad \text{از طرفی}$$

$$E = C$$

شرط تساوی انتگرال‌ها برابری توابع آنهاست پس:





میزان مول خروجی از ظرف در واحد زمان  $C(t)(\text{mol}/\text{m}^3) \cdot v(\text{m}^3/\text{s}) = \frac{\text{mol}}{\text{s}}$

(۱) تعداد مولهایی که در یک فاصله زمانی  $dt$  از ظرف خارج می شود  $C(t) \cdot v \cdot dt = (\text{mole})$

کسری از مولکولهای ظرف که زمان اقامت آنها در فاصله  $dt$  است  $E(t) \cdot dt =$

(۲) تعداد مولهای ردیاب خروجی از ظرف که زمان اقامت آنها در فاصله  $dt$  است  $E(t) \cdot dt \cdot M =$

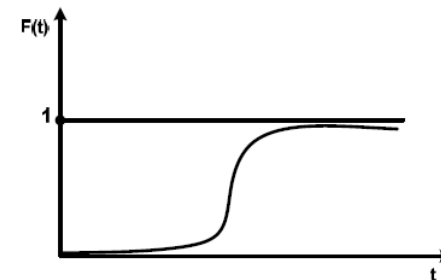
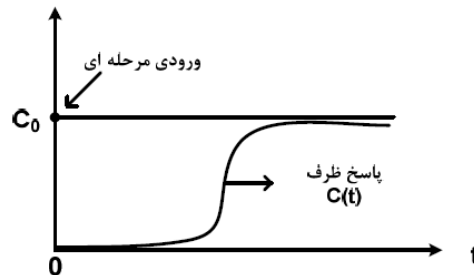
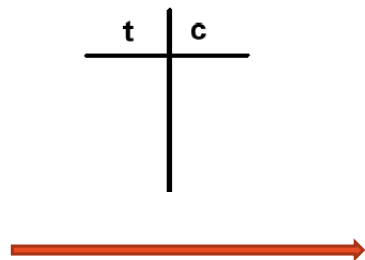
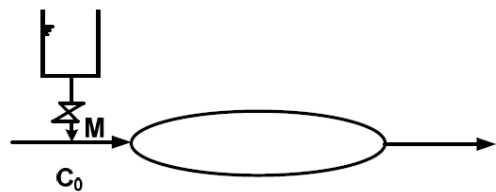
$$(۱) \text{ و } (۲) \longrightarrow E(t) \cdot M \cdot dt = C(t) \cdot v \cdot dt \longrightarrow E(t) = \frac{C(t)}{M/v}$$

$$M = \int_0^\infty C(t) \cdot v \cdot dt \longrightarrow \frac{M}{v} = \int_0^\infty C(t) dt$$

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t) dt}$$

فرض می‌کنیم یک راکتور همزده داریم که در لحظه  $t=0$  هیچگونه ردیابی در داخل سیستم وجود ندارد. جریان ناگهانی ردیاب را با غلظت  $C_0$  به صورت **پله‌ای** در ورودی راکتور اعمال می‌کنیم. تغییرات غلظت ردیاب بر حسب زمان در خروجی را اندازه می‌گیریم و تابعی به نام  $F$  به صورت زیر بدست می‌آوریم.

$$F = \frac{C}{C_0}$$



بیشترین مقدار  $F$  برابر ۱ می‌باشد یعنی لحظه‌ای که  $C=C_0$  (انتها) و کمترین مقدار  $F$  در لحظه برابر ۰ می‌باشد یعنی لحظه‌ای که  $C=0$  (ابتدا)

رابطه بین  $F$  و  $E$ :

$$F(t) = \frac{c}{c_0} = \int_0^t E \cdot dt \quad \longrightarrow \quad F = \int_0^t E \cdot dt \quad \longrightarrow \quad \boxed{E = \frac{dF}{dt}}$$

کسری از سیال خروجی که زمان عمر آن کمتر از  $t$  است.