



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ

نمونه سوالات درس مدلسازی

استاد درس

دکتر هادی شیرعلی

نگارنده

بردیا افسرده

بهمن 1403

## فهرست

5	فصل اول
6	سوال 1
7	حل سوال 1
9	سوال 2
10	حل سوال 2
11	سوال 3
11	حل سوال 3
13	سوال 4
13	حل سوال 4
15	سوال 5
15	حل سوال 5
17	سوال 6
17	حل سوال 6
18	سوال 7
18	حل سوال 7
19	سوال 8
20	حل سوال 8
21	سوال 9
21	حل سوال 9
23	سوال 10
23	حل سوال 10
25	سوال 11
26	حل سوال 11
27	سوال 12
27	حل سوال 12
29	سوال 13
29	حل سوال 13
30	مراحل تشخیص المان:
30	توضیحات بیشتر:
30	بخش اول:
31	بخش دوم:
31	بخش سوم:

32	بخش چهارم:
33	فصل 2
34	سوال 1
34	حل سوال 1
36	سوال 2
36	حل سوال 2
40	سوال 3
40	حل سوال 3
43	سوال 4
43	حل سوال 4
44	فصل 6
45	سوال 1
45	سوال 2
46	فصل 7
47	سوال 1
47	حل سوال 1
48	سوال 2
49	حل سوال 2
49	سوال 3
49	حل سوال 3
53	سوال 4
54	حل سوال 4
54	سوال 5
54	حل سوال 5
54	سوال 6
54	حل سوال 6:
57	سوال 7
58	حل سوال 7
59	سوال 8
60	حل سوال 8
63	سوال 9
64	حل سوال 9

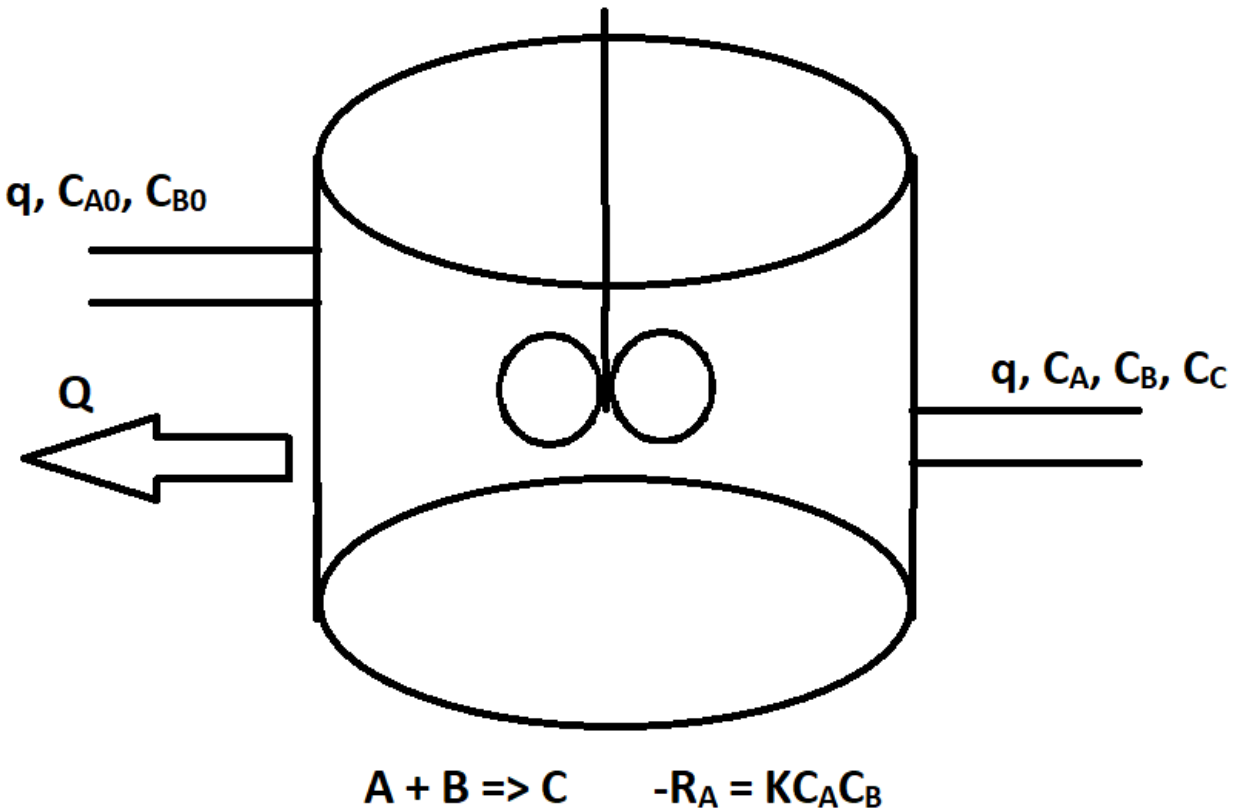
67	.....	فصل 8
68	.....	سوال 1
68	.....	حل سوال 1
75	.....	سوال 2
75	.....	حل سوال 2
78	.....	سوال 3
78	.....	حل سوال 3
80	.....	سوال 4
81	.....	حل سوال 4
82	.....	سوال 5
83	.....	حل سوال 5

# فصل اول

سوال 1. راکتوری در شرایط زیر در حال کار می‌باشد.  $Q$  دبی حجمی،  $CX$  غلظت ماده  $X$  می‌باشد،  $Q$  نیز گرمایی است که برای فرایند خنک سازی و کنترل دما از راکتور گرفته می‌شود.

(الف) موازنه جرم و انرژی برای اجزای راکتور زیر را بدست آورید. (آنتالپی واکنش را  $\Delta H$  در نظر بگیرید.)

(ب) اگر در لحظه  $t = 0$  غلظت به اندازه  $\Delta A$  تغییر کند معادلات مورد نیاز برای بررسی تغییرات غلظت و دما در راکتور را بدست آورید.



حل سوال 1.

(الف)

سوالات راکتور همیشه با معادلات جزئی جرم حل می‌شوند چرا که با غلظت تک تک اجزا سر و کار داریم.

با توجه به اینکه حرفی از تغییرات در قسمت الف زده نشده شرایط را پایدار در نظر می‌گیریم و ترم تجمع برای این قسمت صفر می‌باشد.

موازنه‌های جزئی جرم:

مصرف - تولید + خروجی - ورودی = تجمع

$$0 = q * C_{A0s} - q * C_{As} - K * C_{As} * C_{Bs} * V$$

$$0 = q * C_{B0s} - q * C_{Bs} - K * C_{As} * C_{Bs} * V$$

$$0 = 0 - q * C_{Cs} + K * C_{As} * C_{Bs} * V$$

اندیس‌های S در معادلات بالا به دلیل اینکه شرایط در این قسمت پایدار است قرار داده شده‌اند.

برای در نظر گرفتن اثر دما در معادلات بالا باید برای K از رابطه آرنیوسی استفاده شود:

$$K = A * \exp(-E_a / (RT))$$

که دما در رابطه بالا (T) دمای داخل راکتور می‌باشد (T2 در این سوال).

موازنه انرژی:

دمای محلول ورودی را T1 و دمای محلول خروجی را T2 در نظر می‌گیریم.

$$0 = \rho * q * C_p * T_{1s} - \rho * q * C_p * T_{2s} - Q + K * C_{As} * C_{Bs} * V * \Delta H$$

تمام معادلات بالا معادلات جبری می‌باشند و برای حل آن‌ها نیازی به شرایط مرزی نداریم.

علامت پشت Q نیز منفی می‌باشد چرا که برای سرمایش بکار رفته است.

با حل همزمان معادلات بالا (جرم و انرژی) می توان غلظت های  $C_{Cs}$ ،  $C_{Bs}$ ،  $C_{As}$  و همچنین دمای  $T_2$  را بدست آورد.

**ب)** در این قسمت چون مقداری به غلظت  $A$  افزوده شده موازنه های بالا بهم ریخته و باعث ناپایداری سیستم می شود؛ در نتیجه این موضوع موازنه های بالا باید حالا در شرایط ناپایدار نوشته شوند:

مصرف - تولید + خروجی - ورودی = تجمع

$$\frac{\partial(V \cdot C_A)}{\partial t} = q \cdot C_{A0} - q \cdot C_A - K \cdot C_A \cdot C_B \cdot V$$

$$\frac{\partial(V \cdot C_B)}{\partial t} = q \cdot C_{B0s} - q \cdot C_B - K \cdot C_A \cdot C_B \cdot V$$

$$\frac{\partial(V \cdot C_C)}{\partial t} = 0 - q \cdot C_C + K \cdot C_A \cdot C_B \cdot V$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot V \cdot C_p \cdot T_2)}{\partial t} = \rho \cdot q \cdot C_p \cdot T_{1s} - \rho \cdot q \cdot C_p \cdot T_2 - Q + K \cdot C_A \cdot C_B \cdot V \cdot \Delta H$$

در معادلات بالا  $C_{A0}$  مقدار جدید غلظت جدید ماده  $A$  در ورودی می باشد یعنی :

$$C_{A0} = C_{A0s} + \Delta A$$

اما باقی غلظت ها و دماها در ورودی تغییر نکرده اند.

غلظت های خروجی و دمای خروجی مجهول هستند و با حل معادلات دیفرانسیل بالا بدست می آیند. با توجه به اینکه چهار معادله دیفرانسیل داریم نیاز به 4 شرط مرزی (یک شرط برای هر یک معادله) نیاز داریم و با توجه به اینکه مشتق معادلات نسبت به زمان می باشد شروط مرزی نیز باید نسبت به زمان باشند:

بعد از اعمال تغییرات کمی زمان نیاز است تا تغییرات غلظت در غلظت های خروجی اعمال شود به همین دلیل می توانیم فرض کنیم در لحظه  $t = 0$  تمام غلظت های خروجی از راکتور با غلظت های حالت پایدار خود برابر هستند (برای دما نیز می توان از استدلال مشابهی استفاده کرد).

$$@t = 0, \quad C_A = C_{As}$$



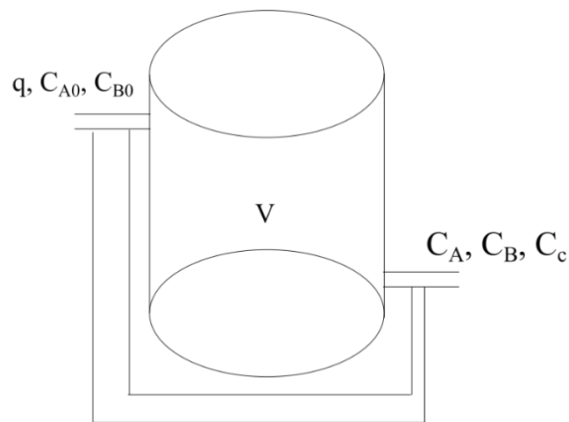
$$@t = 0, \quad C_B = C_{Bs}$$

$$@t = 0, \quad C_C = C_{Cs}$$

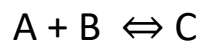
$$@t = 0, \quad T_2 = T_{2s}$$

با استفاده از شرایط مرزی بالا می‌توان معادلات را حل نمود.

**سوال 2.** راکتوری در شرایط زیر حال کار می‌باشد. قسمتی از دبی خروجی راکتور (40% محلول خروجی) به صورت بازگشتی به ابتدای راکتور بازگردانده می‌شود. توزیع غلظت در این راکتور را بدست آورید.



واکنش در راکتور تعادلیست و با ثوابت سرعت زیر اتفاق می‌افتد:



$$R_{\text{رفت}} = k_1 * C_A * C_B$$

$$R_{\text{برگشت}} = k_2 * C_C^{1.2}$$

## حل سوال 2.

با توجه به اینکه قسمتی از دبی خروجی به راکتور بازگردانده می شود جریان بازگشتی به راکتور را با  $q_r$  و جریانی که به راکتور باز نمیگردد را با  $q'$  نشان می دهیم و باید رابطه ای بین این دو پارامتر و دبی ورودی به راکتور ( $q$ ) بدست آوریم، برای اینکار اول معادله کلی موازنه جرم برای این راکتور به این صورت نوشته می شود:

$$q + q_r = q_r + q'$$

که سمت چپ معادله نشان دهنده تمام جریان های ورودی به داخل راکتور و سمت راست نشان دهنده جریان خروجی از راکتور می باشد؛ از معادله بالا به واضحگی می توان نتیجه گرفت که  $q = q'$  می باشد.

از طرفی با توجه به صورت سوال 40% خروجی جریان بازگشتی می باشد پس با توجه به این موضوع می توان نوشت:

$$0.4 * (q + q_r) = q_r$$

$$q_r = \frac{2}{3} * q \quad \text{که از معادله بالا نیز می توان نتیجه گرفت که:}$$

با توجه به این اطلاعات باقی مسئله شبیه به سوال 1 خواهد بود، با توجه به اینکه غلظت مواد خواسته شده موازنه جزئی جرم برای تک تک مواد نوشته خواهد شد و همچنین چون حرفی از تغییرات زده نشده شرایط را پایدار در نظر می گیریم:

$$0 = q * C_{A0s} + q_r * C_{As} - (q + q_r) * C_{As} - K1 * C_A * C_B * V + K2 * C_{CS}^{1.2} * V$$

$$0 = q * C_{B0s} + q_r * C_{Bs} - (q + q_r) * C_{Bs} - K1 * C_{As} * C_{Bs} * V + K2 * C_{CS}^{1.2} * V$$

$$0 = q_r * C_{Cs} - (q + q_r) * C_{Cs} + K1 * C_{As} * C_{Bs} * V - K2 * C_{CS}^{1.2} * V$$

دقت کنید که در معادلات بالا  $q_r$  نیز باید با مقدار خود  $(\frac{2}{3} * q_r)$  جایگزین شوند.

سوال 3. یک مایسل کروی که در آن واکنشی با شرایط زیر اتفاق می افتد را در نظر بگیرید. مایسل در یک محیط اشباع از مونومر A قرار دارد و مونومر A با شرایط زیر در مایسل نفوذ می کند. توزیع غلظت درون مایسل را بدست آورید.

واکنش:

$$R = K * C_A^2$$

معادله نفوذ مونومر به درون مایسل:

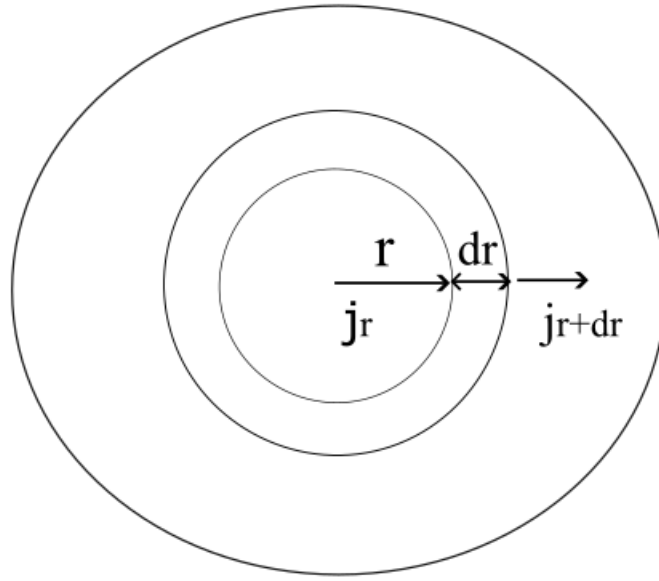
$$J = k * (C_s - C)$$

که  $C_s$  غلظت اشباع داخل محلول اطراف مایسل می باشد.

حل سوال 3. با توجه به اینکه توزیع غلظت درون مایسل مدنظر است و اینکه مایسل کروی می باشد المان را پوسته کروی در نظر می گیریم.

همانطور که دیده می شود جهت نفوذ جرم را از مرکز کره به سمت بیرون کره در نظر گرفتیم اما خلاف این جهت در نظر گرفتن نیز مشکلی ندارد.

با توجه به اینکه صورت سوال حرفی از تغییرات نزده می توانیم مسئله را به صورت پایدار در نظر بگیریم.



$$A * j_r - A * j_{r+dr} - kC_a^2 * 4 * \pi * r^2 * dr = 0$$

حجم المان کروی:  $4 * \pi * r^2 * dr$

با جایگذاری مساحت‌ها:

$$4 * \pi * r^2|_r * j_r - 4 * \pi * r^2|_{r+dr} * j_{r+dr} - kC_a^2 * 4 * \pi * r^2 * dr = 0$$

با تقسیم دو طرف معادله بر  $4 * \pi * dr$ :

$$-D * \frac{d(r^2 * -\frac{dC_a}{dr})}{dr} - kC_a^2 * r^2 = 0$$

$$D * \frac{d(r^2 * \frac{dC_a}{dr})}{dr} - kC_a^2 * r^2 = 0$$

$$r^2 * \frac{d^2C_a}{dr^2} + 2 * r * \frac{dC_a}{dr} - \frac{k}{D} C_a^2 * r^2 = 0$$

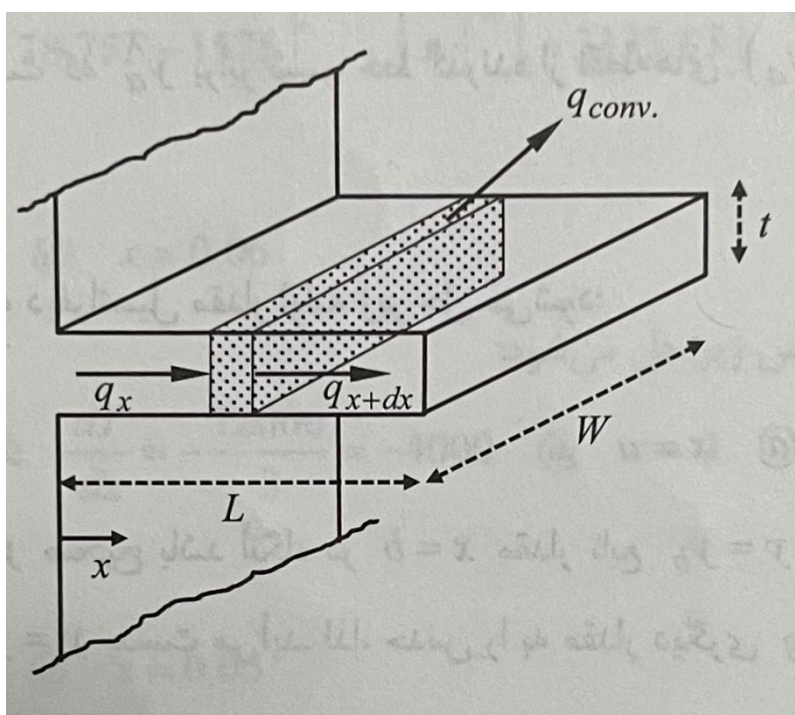
$$r = 0 \quad \frac{dC_a}{dr} = 0$$

$$r = R \quad -D * \frac{dC_a}{dr} = k * (C_s - C)$$

سوال 4. پره زیر به یک دیوار با دمای ثابت  $T = T_1$  متصل است و گرما را از دیوار به محیط منتقل میکند. (در این سوال سطح بالایی پره رو عایق فرض کنید).

الف) توزیع دما را در این پره محاسبه نمایید.

ب) اگر در لحظه  $t = 0$  دمای ابتدای پره به  $T = T'$  تغییر کند، توزیع دما داخل پره و با زمان را محاسبه کنید.



حل سوال 4.

الف) پره‌ها در عموم وقت‌ها به دلیل ضخامت کم و سرعت انتقال حرارت بالا در حالت پایدار و با انتقال حرارت در یک جهت کار میکنند.

همانطور که در شکل دیده می‌شود پره از دو طریق انتقال حرارت انجام می‌دهد: (1) نفوذ در جهت x و (2) انتقال حرارت همرفت از طریق دیواره‌های جانبی.

$$0 = q_x - q_{x+dx} - 2 * h * t * dx * (T_s - T_{\infty})$$

دو طرف معادله را بر  $dx$  تقسیم میکنیم:

$$0 = -\frac{d}{dx} \left( -k * t * w * \frac{dT_s}{dx} \right) - 2 * h * t * (T_s - T_\infty)$$

با توجه به اینکه معادله نسبت به  $x$  دارای مشتق درجه دوم می باشد نیاز به دو شرط مرزی برای حل معادله بالا داریم:

$$@x = 0, \quad T = T_b$$

$$@x = L, \quad -k * A * \frac{dT_s}{dx} = h * A * (T_s - T_\infty) \Rightarrow -k * \frac{dT_s}{dx} = h * (T_s - T_\infty)$$

با حل معادله دیفرانسیل بالا جوابی برای مقادیر دما در نقاط مختلف  $x$  بدست می آوریم:

$$T_s = f(x)$$

یا اگر به صورت عددی معادله بالا رو حل کنیم (فصل 7) جواب نهایی به صورت یک بردار خواهد بود:

$$T_s = [f(x = 0), f(x = dx), f(x = 2 * dx), \dots, f(x = L)]$$

منظور از  $f$  تابعی بر حسب  $x$  می باشد که با روش های فصل 2 و فصل 7 بدست خواهد آمد.

**ب)** با تغییر دما در نقطه  $x = 0$  شرایط مسئله ناپایدار می شود:

$$\frac{\partial(\rho * w * t * C_p * T)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( -k * t * w * \frac{\partial T}{\partial x} \right) - 2 * h * t * (T - T_\infty)$$

با توجه به اینکه معادله دیفرانسیل بالا مشتق مرتبه دو نسبت به  $x$  و مرتبه یک نسبت به زمان دارد نیاز به دو شرط مرزی نسبت به  $x$  و یک شرط مرزی نسبت به زمان داریم و از آنجایی که هندسه مسئله نسبت به  $x$  تغییری نداشته است شرایط مرزی قسمت الف در این قسمت برای  $x$  صدق می کند.

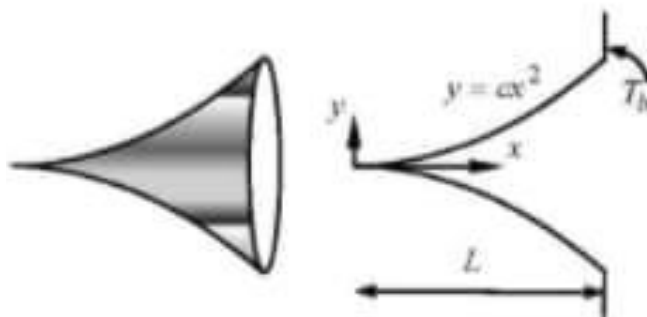
نسبت به زمان نیز با توجه به اینکه توزیع دما نسبت به محور  $x$  خواسته شده نیاز است که برای هر نقطه از  $x$  یک شرط مرزی متفاوت نسبت به دما داشته باشیم، این همان دمای نقاط مختلف در شرایط پایدار است که در قسمت الف بدست آوردیم:

$$@ t = 0, T = T_s$$

با این تفاوت که در نقطه  $x = 0$  مقدار دما برابر با مقدار جدید است:

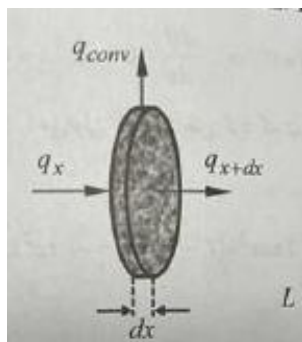
$$@ t = 0 \text{ and } x = 0, T = T'$$

**سوال 5.** معادله حاکمه توزیع دمای پایدار درون پره زیر با سطح مقطع دایره‌ای که شعاع آن به شکل سهمی کم می‌شود را به همراه شرایط مرزی آن بدست آورید. دمای پایه پره برابر با  $T_b$  می‌باشد و دمای محیط برابر با  $T_\infty$  می‌باشد.



**حل سوال 5.**

با توجه به اینکه پره داریم انتقال حرارت تک جهته و در جهت  $x$  خواهد بود و المان نهایی به شکل زیر خواهد شد:



در پره های نوک تیز بهتر است که مبدا را در راس تیز پره در نظر بگیریم که مختصات نهایی راحت تر محاسبه شود.

$$A_x * q_x - A_{x+dx} * q_{x+dx} - 2 * \pi * y * dx * h * (T - T_{\infty}) = 0$$

که در معادله بالا  $A_x$  برابر با:

$$A_x = \pi * (cx^2)^2|_x \quad \text{and} \quad A_{x+dx} = \pi * (cx^2)^2|_{x+dx}$$

و مساحت انتقال حرارت همرفت برابر با مساحت جانبی المان استوانه شکل می باشد:

$$A_{convection} = 2 * \pi * y * dx = 2 * \pi * (cx^2) * dx$$

با تقسیم دو طرف معادله بر  $\pi * dx$  و جایگذاری تمام مقایر ذکر شده در نهایت به معادله زیر میرسیم:

$$c^2 * \frac{x^4 * q_x - x^4 * q_{x+dx}}{dx} - 2 * c * x^2 * h * (T - T_{\infty}) = 0$$

با توجه به تعریف مشتق  $x^4$  ها جزئی از تابع مشتق گیری هستند و از مشتق نهایی بیرون نمی آیند:

$$-c * \frac{d(x^4 * q_x)}{dx} - 2 * x^2 * h * (T - T_{\infty}) = 0$$

که با جایگذاری  $q_x$  به معادله زیر میرسیم:

$$q_x = -k * \frac{dT}{dx} \rightarrow k * c * \frac{d(x^4 * \frac{dT}{dx})}{dx} - 2 * x^2 * h * (T - T_{\infty}) = 0$$



شرایط مرزی:

$$\int_0^L 2 * \pi * c * x^2 * h * (T - T_{\infty}) = -k * \pi * c^2 * L^4 * \frac{dT}{dx} \Big|_L$$

$$x = L \rightarrow T = T_b$$

که شرط مرزی اول برای پره‌های نوک تیز بکار میرود و به این معنی است که تمام انرژی که از پایه پره می‌آید از طریق همرفت به محیط داده می‌شود.

**سوال 6.** یک مکعب به ضلع  $a$  در دمای محیط قرار دارد. در لحظه  $t = 0$  از سطح فوقانی تحت تابش انرژی  $q'$  در واحد سطح قرار می‌گیرد. این مکعب از تمامی سطوح با محیط انتقال حرارت جا به جایی و انتقال حرارت تشعشع انجام می‌دهد. توزیع دمای گذرای این مکعب را بدست آورید.  
( $C_p = 0.2 * T^{0.5}$ )

**حل سوال 6.** با توجه به اینکه حرفی از دمای درون جسم زده نشده و دمای کلی جسم خواسته شده موازنه انرژی برای کل جسم (توده‌ای) می‌نویسیم؛ از طرفی چون در لحظه  $t = 0$  به طور ناگهانی در معرض انرژی تابشی قرار گرفته شرایط ناپایدار می‌باشد.

$$\frac{d(\rho * a^3 * (0.2 * T^{0.5}) * T)}{dt} = q' * a^2 - h * 6 * a^2 * (T - T_{\infty}) - \sigma * 6 * a^2 * (T^4 - T_{\infty}^4)$$

با ساده سازی مشتق اول:

$$\rho * a^3 * 0.2 * 1.5 * T^{0.5} * \frac{dT}{dt} = q' * a^2 - h * 6 * a^2 * (T - T_{\infty}) - \sigma * 6 * a^2 * (T^4 - T_{\infty}^4)$$

که طبق گفته صورت سوال قبل از تابش جسم همدمما با محیط بوده است:

$$t = 0 \quad T = T_{\infty}$$

سوال 7. دو لوله متداخل با طول بسیار زیاد هم محور هستند. شعاع لوله کوچکتر  $R'$  و شعاع لوله بزرگتر  $R''$  می باشد. سیالی مابین این دولوله با ویسکوزیته نیوتنی  $\mu$  در حال سکون قرار دارد. الف) اگر لوله داخلی شروع به چرخش با سرعت زاویه ای  $\omega$  کند. معادلات سرعت را بدست آورید. ب) اگر در یک لحظه لوله داخلی را با سرعت  $V$  شروع به کشیدن کنیم، معادلات سرعت را بدست آورید.

حل سوال 7.

الف) با توجه به اینکه لوله داخلی ناگهانی شروع به چرخش می کند و قبل از آن سیال در حال سکون می باشد شرایط مسئله ناپایدار می باشد.

از آنجایی که استوانه داریم مختصات را استوانه ای در نظر می گیریم و به دلیل اینکه حرکت چرخشی می باشد سرعت در جهت  $\theta$  است و چون سیال بین دوتا استوانه هم محور قرار دارد جهت تغییرات در جهت  $r$  می باشد.  $V_{\theta}(r)$

از معادله الف-15 در این حالت استفاده می کنیم:

$$\rho * \frac{\partial V_{\theta}}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} * \frac{\partial}{\partial r} (r^2 * \tau_{\theta r})$$

$$\tau_{\theta r} = -\mu * r * \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{V_{\theta}}{r} \right)$$

شرایط مرزی:

$$t = 0 \quad V_{\theta} = 0$$

$$r = R' \quad V_{\theta} = R' * \omega$$

$$r = R'' \quad V_{\theta} = 0$$

ب) شبیه قسمت قبل با این تفاوت که سرعت در جهت Z می باشد و تغییرات آن هم در جهت r و t می باشد.

این بار از معادله الف-16 استفاده می کنیم:

$$\rho * \frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{1}{r} * \frac{\partial}{\partial r} (r * \tau_{rz})$$

$$\tau_{rz} = -\mu * \frac{\partial}{\partial r} (V_z)$$

شرایط مرزی:

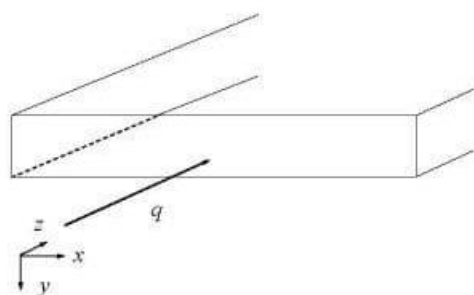
$$t = 0 \quad V_z = 0$$

$$r = R' \quad V_z = V$$

$$r = R'' \quad V_z = 0$$

دقت کنید که برای حل قسمت ب فرض کردیم که طول استوانه نسبت به فضای بین دو استوانه بسیار زیاد است و تغییرات در جهت Z را در نظر نگرفتیم.

سوال 8. یک مایع به صورت پایدار در فضای بین دو صفحه جریان دارد. فاصله دو صفحه (که برابر با  $2H$  می باشد) در مقایسه با ابعاد دیگر کوچک است. در اثر واکنش در بین دو صفحه حرارتی به مقدار  $q \text{ W/m}^3$  تولید می شود. از اثر گرمایش ویسکوز صرفنظر شود. دمای ورودی  $T_0$  و دمای صفحات  $T_a$  است. معادله توزیع دما در این مایع را پیدا کنید.



### حل سوال 8.

با توجه به شکل صفحات مختصات را کارتیزین در نظر می‌گیریم، و با توجه به صورت سوال شرایط پایدار و موازنه باید جزئی نوشته شود؛ با وجود اینکه اینکۀ توزیع دما خواسته شده، اول با توجه به اینکه سرعت سیال دارای توزیع در جهت  $y$  می‌باشد (چون نسبت به ابعاد دیگر کوچک‌تر است) اول معادلات موازنه مومنتوم را می‌نویسیم:

سرعت در جهت  $z$  می‌باشد و در جهت  $y$  تغییرات دارد، برای همین از معادله (الف-9) برای موازنه مومنتوم  $(v_z(y))$ :

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y}$$

که با توجه به فرمول الف-12 می‌توان  $\tau_{zy}$  را جایگزین کرد با:

$$\tau_{zy} = -\mu \frac{\partial v_z}{\partial y} \rightarrow +\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial^2 y}$$

که شرایط مرزی آن عبارت‌اند از:

$$@ z = 0 \rightarrow \Delta P : \text{اختلاف فشار}$$

$$@ y = H \text{ and } @ y = -H \rightarrow v_z = 0$$

و درنهایت نیز فرمول موازنه انرژی را از فرمول الف-26 می‌نویسیم:

$$\rho * Cp * v_z * \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\partial q_y}{\partial y} - \tau_{zy} * \frac{\partial v_z}{\partial y} + Q$$

$$@ x = 0 \rightarrow T = T_0$$

$$@ y = H \text{ and } @ y = -H \rightarrow T = T_a$$

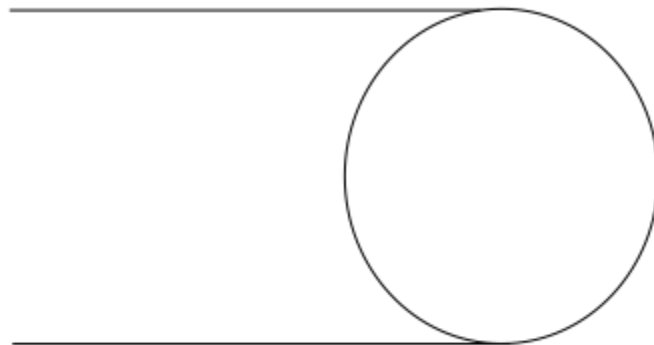
که در معادله بالا  $q_y$  برابر می‌باشد با:

$$q_y = -k * \frac{\partial T}{\partial y}$$

دقت کنید که در معادلات بالا از نفوذ حرارت در جهت Z (q<sub>z</sub>) در برابر نفوذ محور (  $v_z * \frac{\partial T}{\partial z}$  ) صرفنظر کردیم.

**سوال 9.** پره زیر با سطح مقطع دایره‌ای را در نظر بگیرید. معادله توزیع دما در این پره را با توجه به فرض‌های زیر بدست آورید.

دمای پایه پره برابر با T<sub>b</sub> و دمای محیط نیز برابر با T<sub>∞</sub> می‌باشد.

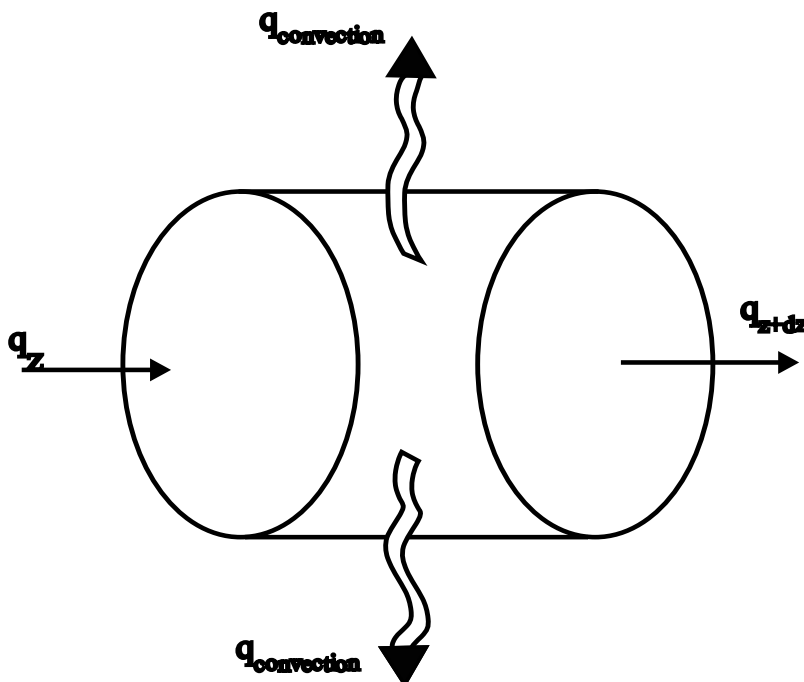


**حل سوال 9.**

انتقال حرارت در پره‌ها تک بعدی در نظر گرفته می‌شود، با در نظر گرفتن مختصات استوانه‌ای و با توجه به اینکه انتقال حرارت تک بعدی می‌باشد مشخص می‌شود که انتقال انرژی در جهت Z صورت می‌گیرد.

برای کشیدن المان و تشخیص جهت لطفاً به بخش مراحل تشخیص المان (پایان این فصل) مراجعه فرمایید.

در نهایت به المان زیر می‌رسیم:



با توجه به این المان موازنه انرژی به صورت زیر نوشته می شود:

$$A1 * q_z - A1 * q_{z+dz} - A2 * q_{conv} = 0$$

(پره به صورت پایدار کار می کند و طول المان نیز برابر با  $dz$  می باشد)

با جایگذاری مساحت ها:

$$\pi * R^2 * q_z - \pi * R^2 * q_{z+dz} - 2 * \pi * R * dz * h * (T - T_{\infty}) = 0$$

با تقسیم دو طرف معادله بر  $\pi * R^2 * dz$  به معادله زیر می رسیم:

$$-\frac{\partial q_z}{\partial z} - \frac{2}{R} * h * (T - T_{\infty}) = 0 \quad \&\& \quad q_z = -k * \frac{\partial T}{\partial z}$$

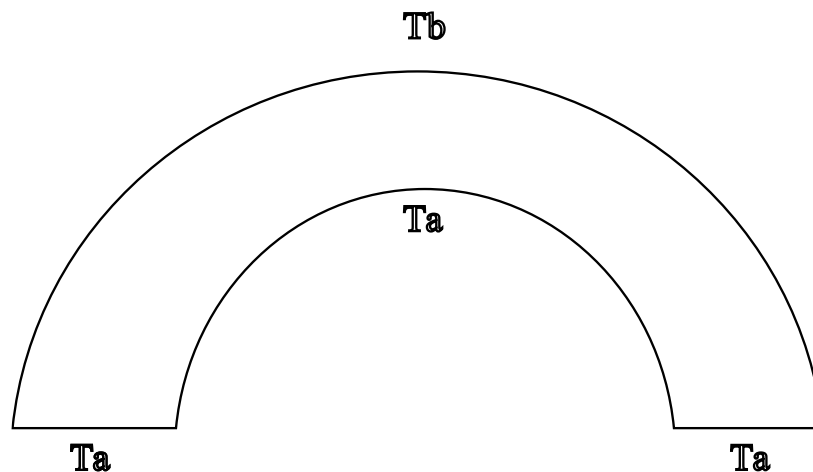
$$k * \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{2}{R} * h * (T - T_{\infty}) = 0$$

با توجه به اینکه معادله نسبت به  $z$  درجه 2 می باشد نیاز به دو شرط مرزی در جهت  $z$  داریم:

$$z = 0 \Rightarrow T = T_b$$

$$z = L \Rightarrow -k * \frac{\partial T}{\partial z} = h * (T - T_{\infty})$$

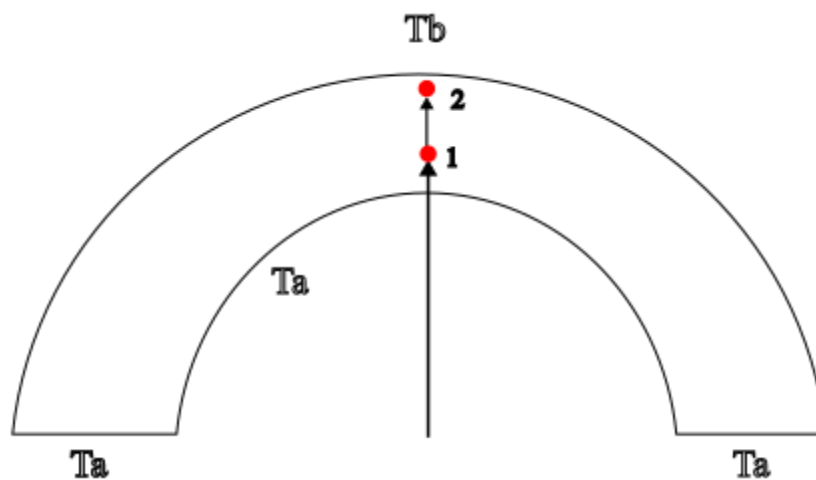
سوال 10. صفحه‌ای فلزی به شکل زیر موجود است. معادله توزیع دما در هندسه زیر با المان‌گیری بدست آورید.



حل سوال 10.

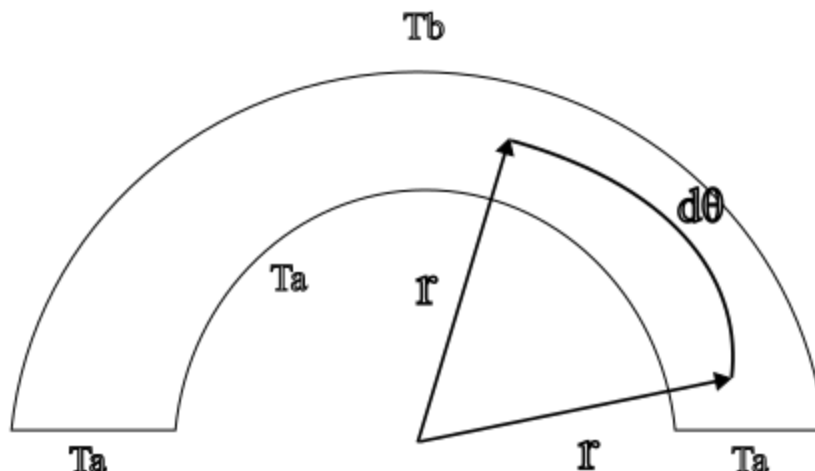
برای حل این سوال از مختصات استوانه‌ای استفاده می‌کنیم، واضح است که چون شکل دو بعدی می‌باشد از انتقال حرارت در جهت  $z$  صرف‌نظر می‌کنیم، برای بررسی انتقال حرارت (انرژی در جهت‌های  $r, \theta$ ) از روش زیر استفاده می‌کنیم (روش به طور واضح در آخر این فصل توضیح داده شده).

جهت  $r$ :



اگر دو نقطه 1 و 2 را در شکل بالا در نظر بگیرید متوجه می‌شوید که این دو نقطه به اندازه یک مقدار مشخص (مثلاً  $dr$ ) از هم فاصله دارند اما نقطه 1 نزدیک تر به دیواره‌ای است که دمای آن  $T_a$  می‌باشد و نقطه 2 نزدیک تر به دیواره‌ای است که دمای آن  $T_b$  می‌باشد. با توجه به این موضوع، این دو نقطه اختلاف دما دارند و به همین دلیل بین آن‌ها انتقال انرژی صورت می‌گیرد.

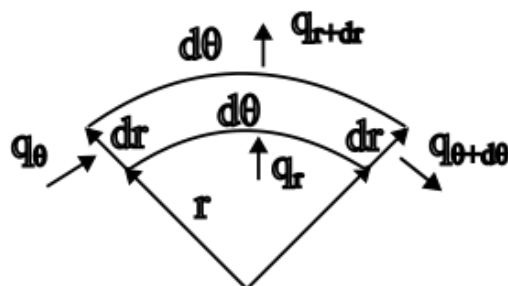
در جهت  $\theta$ :



در مورد شکل بالا نیز با استدلال مشابهی برای دو نقطه که با زاویه‌های مختلف در شکل مشخص شده‌اند می‌توان فهمید که نقطه‌ای که به دیواره پایین نزدیک تر است دمایی نزدیک به دمای همان دیواره دارد (نزدیک به  $T_a$ ) و نقطه دوم بین دو دیواره با دمای  $T_a$  و  $T_b$  قرار دارد و به همین دلیل دمای آن نیز بین این دو خواهد بود؛ در نتیجه این موضوع در جهت  $\theta$  نیز انتقال حرارت خواهیم داشت.

(دقت کنید که وقتی انتقال حرارت در جهت  $\theta$  را بررسی می‌کنیم مقدار شعاع را تغییر نمی‌دهیم و فقط در جهت  $\theta$  حرکت می‌کنیم).

المان نهایی نیز به شکل زیر خواهد بود:





$$A1 * q_{\theta} - A1 * q_{\theta+d\theta} + A2 * q_r - A2 * q_{r+dr} = 0$$

$$dr * L * q_{\theta} - dr * L * q_{\theta+d\theta} + L * r * d\theta * q_r - L * r * d\theta * q_{r+dr} = 0$$

دقت کنید که عبارت  $r * d\theta$  به این علت است که  $d\theta$  برابر زاویه کمان (به رادیان) می باشد و طول کمان برابر با شعاع کمان ضرب در زاویه کمان می باشد.

با تقسیم دو طرف معادله بر  $L * d\theta * dr$  در نهایت به عبارت زیر می رسیم:

$$-\frac{\partial q_{\theta}}{\partial \theta} - \frac{\partial(r * q_r)}{\partial r} = 0$$

با جایگذاری مقادیر  $q$  به معادله زیر می رسیم:

$$k_{\theta} * \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + k_r * \frac{\partial \left( r * \frac{\partial T}{\partial r} \right)}{\partial r} = k_{\theta} * \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + k_r * \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + k_r * \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

با توجه به اینکه دو مشتق درجه دو نسبت به محورهای  $r$  و  $\theta$  وجود دارد نیاز به 4 شرط مرزی داریم که به شرح زیر هستند:

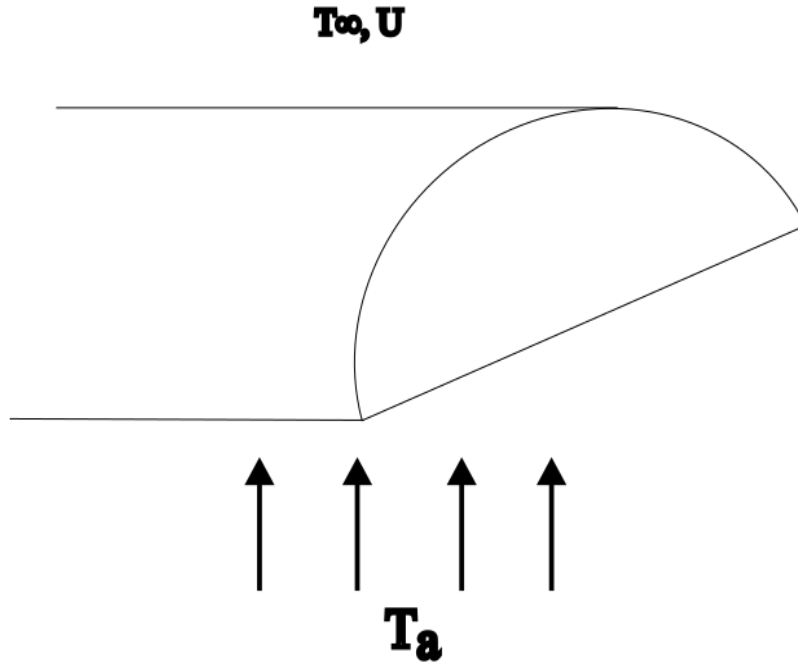
$$r = R1 \Rightarrow T = Ta \quad \&\& \quad r = R2 \Rightarrow T = Tb$$

$$\theta = 0 \Rightarrow T = Ta \quad \&\& \quad \theta = \pi \Rightarrow T = Ta$$

**سوال 11.** مایعی در لوله ای با سطح مقطع نیم دایره (به شکل زیر) در جریان است و از طریق المان حرارتی هایی که سرتاسر لوله قرار دارند گرم می شوند.

الف) معادله توزیع دما برای مایع درون این لوله را بدست آورید.

فرضیات قسمت الف): دمای مایع ورودی برابر با  $Ta$  می باشد و سیالی اطراف لوله جریان دارد که مایع را گرم می کند. ضخامت لوله را کم در نظر بگیرید. (باقی فرضیات روی شکل مشخص شده اند و  $U$  نیز ضریب انتقال حرارت بین سیال بیرونی و مایع درونی می باشد.)



حل سوال 11.

شکل هندسی این سوال مشابه شکل هندسی سوال قبل است با این تفاوت که جهت Z نیز حالا مهم است؛ با استدلالی مشابه مانند مسئله قبل متوجه می‌شوید که در جهت های r و  $\theta$  انتقال حرارت وجود دارد (به المان‌های مسئله قبل رجوع کنید)، در جهت Z نیز با توجه به اینکه در صورت سوال ذکر شده که سیال در حال گرم شدن است تفاوت دما وجود دارد، این یعنی در هر سه جهت مکانی انتقال انرژی صورت می‌گیرد. (دقت کنید که تغییرات با زمان نداریم چرا که صورت سوال حرفی از تغییرات نزده).

برای دیدن شکل دقیق المان به شکل کتاب در صفحه 36 مراجعه کنید.

$$A1 * q_{\theta} - A1 * q_{\theta+d\theta} + A2 * q_r - A2 * q_{r+dr} + A3 * q_z - A3 * q_{z+dz} + \dot{m} * Cp * T_z - \dot{m} * Cp * T_{z+dz} = 0$$

ترم‌های  $\dot{m}$  به دلیل انتقال انرژی به دلیل حرکت سیال وارد معادله شده (انتقال انرژی جا به جایی) که با توجه به اینکه این ترم از ترم رسانش در جهت Z بسیار بزرگ تر است می‌توان از انتقال انرژی رسانش در جهت Z صرف‌نظر کرد.

$$\dot{m} = \rho * Q = \rho * A * Vz = \rho * r * d\theta * dr * Vz$$

$$dr * dz * q_{\theta} - dr * dz * q_{\theta+d\theta} + dz * r * d\theta * q_r - dz * r * d\theta * q_{r+dr} + \rho * r * d\theta * dr * Vz * Cp * (T_z - T_{z+dz}) = 0$$

با تقسیم دو طرف معادله بر  $r * d\theta * dr * dz$  به معادله نهایی زیر می‌رسیم:

$$-\frac{1}{r} * \frac{\partial q_\theta}{\partial \theta} - \frac{1}{r} * \frac{\partial(r * q_r)}{\partial r} - \rho * V_z * C_p * \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

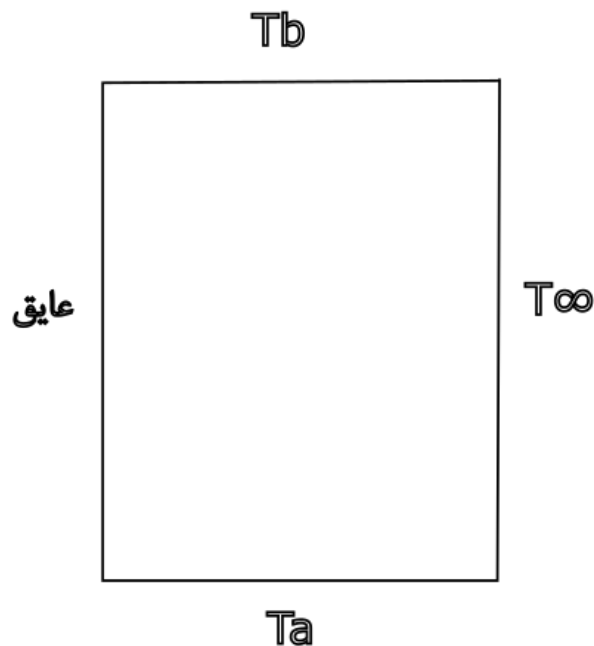
با باز کردن عبارات  $q$  متوجه می‌شوید که نیاز به 5 شرط مرزی دارید:

$$r = 0 \Rightarrow T = T_a \quad \&\& \quad r = R_2 \Rightarrow -k * \frac{\partial T}{\partial r} = U * (T_\infty - T)$$

$$\theta = 0 \Rightarrow T = T_a \quad \&\& \quad \theta = \pi \Rightarrow T = T_a$$

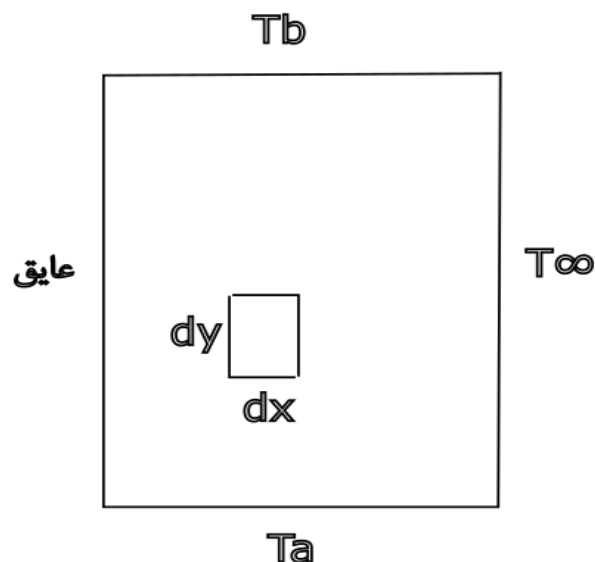
$$z = 0 \Rightarrow T = T_a$$

سوال 12. صفحه‌ای فلزی با هندسه زیر وجود دارد. توزیع دما در این صفحه را بدست آورید.



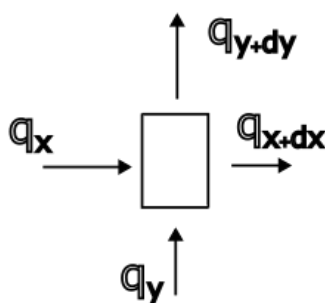
حل سوال 12.

با توجه به شکل صفحه از مختصات کارتزین استفاده می‌کنیم، از آنجایی که صفحه دو بعدی رسم شده از انتقال حرارت در جهت  $z$  صرف‌نظر می‌کنیم، برای تصمیم‌گیری در مورد جهت  $x, y$  نیز از شکل زیر استفاده می‌کنیم:



در مستطیل داخلی که در شکل کشیده شده، اگر جهت مثبت  $x$  را به سمت راست و جهت مثبت  $y$  را به سمت بالا در نظر بگیریم، در دو طرف جهت ضلعی که با  $dx$  مشخص شده نقطه سمت چپ به دیواره عایق نزدیکتر است اما نقطه‌ای که به اندازه  $dx$  با آن فاصله دارد به دیواره‌ای که انتقال حرارت همرفت دارد نزدیکتر است پس این دو نقطه با یکدیگر تفاوت دما خواهند داشت، با همین استدلال مشخص می‌شود که در جهت  $y$  نیز اختلاف دما وجود دارد و انتقال انرژی در هردوی این جهتها صورت می‌گیرد.

المان نیز به شکل زیر خواهد بود:



$$dy * L * q_x - dy * L * q_{x+dx} + dx * L * q_y + dx * L * q_{y+dy} = 0$$

با تقسیم دو طرف معادله بر  $L * dx * dy$  به معادله نهایی زیر می‌رسیم:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} = 0$$

شرایط مرزی:

$$x = 0 \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \&\& \quad x = L_x \Rightarrow -k * \frac{\partial T}{\partial x} = h * (T - T_{\infty})$$

$$y = 0 \Rightarrow T = T_a \quad \&\& \quad y = L_y \Rightarrow T = T_b$$

**سوال 13.** این سوال دقیقا همان مثال 1-13 کتاب می باشد (صفحه 44) اما جواب کتاب برای این سوال اشکال دارد برای همین راه حل درست اینجا نوشته می شود.

**حل سوال 13.**

حرکت در جهت  $r$  می باشد و تغییرات سرعت در جهت های  $r$  و  $\theta$  می باشد (  $r$  هم به دلیل تغییر کردن مساحت المان و هم به دلیل حرکت در جهت جاذبه،  $\theta$  نیز به این دلیل که قسمتی از اب با صفحه مخروط در تماس است و قسمتی دیگر با هوا.

به عبارتی دیگر (  $Vr(r, \theta)$  )، اگر از معادله الف-19 استفاده کنید در نهایت به معادله زیر می رسید:

$$\rho * Vr * \frac{\partial Vr}{\partial r} = -\frac{1}{r^2} * \frac{\partial}{\partial r} (r^2 * \tau_{rr}) - \frac{1}{r * \sin \theta} * \frac{\partial (\sin \theta * \tau_{r\theta})}{\partial \theta} + \rho * g * \cos \theta$$

در نهایت نیز باید عبارت های  $\tau$  را با عبارت های الف-22 جایگزین کرد:

$$\tau_{rr} = -\mu * 2 * \frac{\partial Vr}{\partial r} + \nabla \cdot V$$

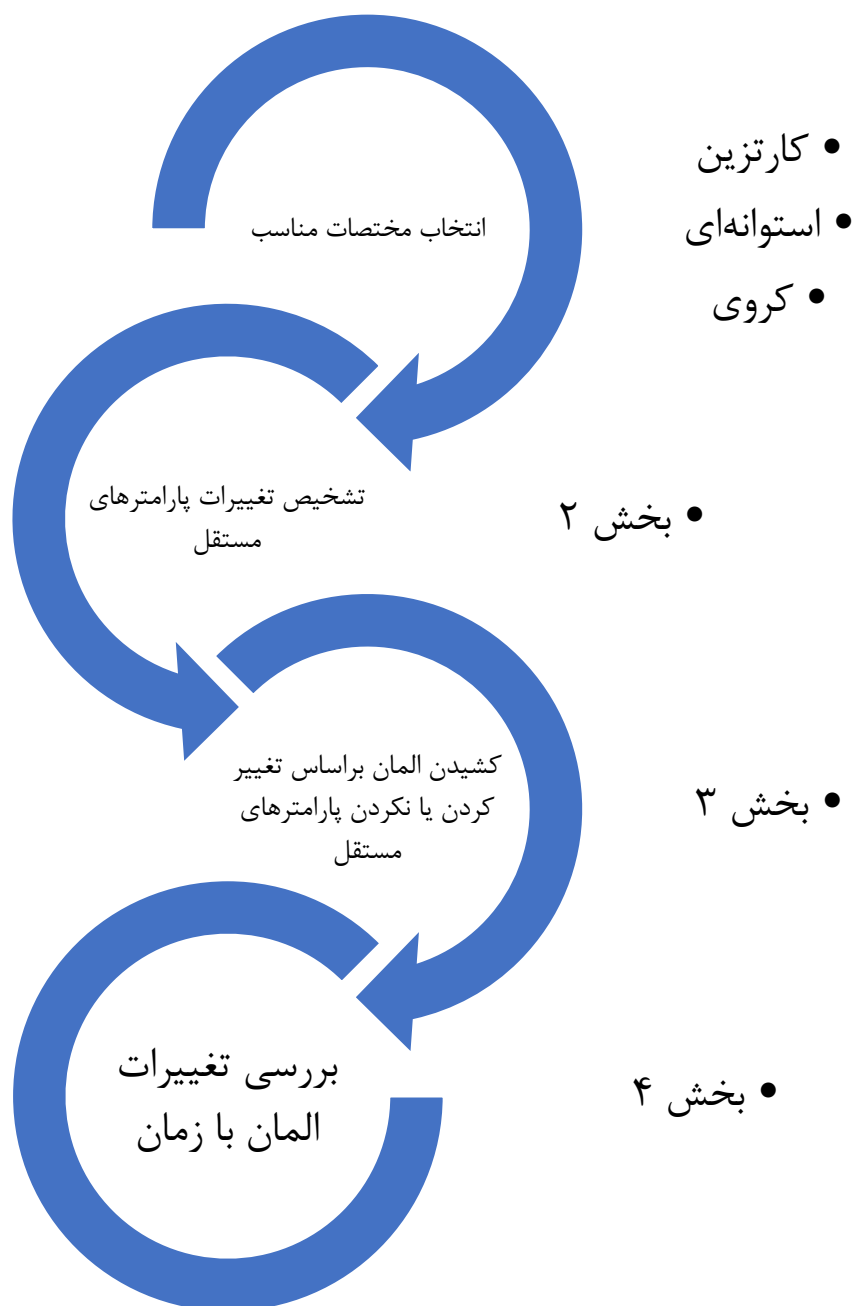
$$\tau_{r\theta} = -\frac{\mu}{r} * \frac{\partial Vr}{\partial \theta} + \nabla \cdot V$$

$$\nabla \cdot V = \frac{1}{r^2} * \frac{\partial}{\partial r} (r^2 * Vr)$$

در نهایت شرایط مرزی نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$r = 0 \Rightarrow Vr = 0 \quad \&\& \quad r = R \Rightarrow \frac{\partial Vr}{\partial r} = 0$$

$$\theta = \theta_1 \Rightarrow Vr = 0 \quad \&\& \quad \theta = \theta_2 \Rightarrow \frac{\partial Vr}{\partial \theta} = 0$$



توضیحات بیشتر:

بخش اول: برای انتخاب مختصات مناسب باید به هندسه مسئله دقت شود (اره میدونم خیلی عجیبه!)

بخش دوم: برای این قسمت بهترین پیشنهادی که دارم اینه که اول از همه پارامتر زمان رو بزارید کنار و اول رو سه پارامتر مکان تمرکز کنید، بعدش درمورد مسائل جرم و حرارت باید به فیزیک مسئله دقت کنید، به طول مثال پره‌ها همیشه (حداقل تا جایی که من میدونم) به صورت تک بعدی و پایدار در نظر گرفته می‌شوند و انتقال حرارت فقط در جهت طول پره انجام میشه، یا مثلاً وقتی یه پارامتر مکانی (مثلاً طول جسم در جهت  $X$ ) از دو جهت دیگه خیلی بلندتر باشه از تغییرات در اون جهت نسبت به دو جهت دیگه صرف‌نظر میشه؛ اگر مسئله‌ای که حل می‌کردید از این شرایط پیروی نمی‌کرد بهترین راه حل بعدی اینه که از سه جهت، دو جهت رو ثابت در نظر بگیرید و بعد روی جهت سوم دو نقطه رو مشخص کنید (به طول مثال در مختصات استوانه‌ای و کروی دو جهت رو ثابت بگیرید طوری که فقط جهت تتا ( $\theta$ ) باقی بمونه و سعی کنید که این دو نقطه هر کدوم به یه شرط مرزی متفاوت نزدیک تر باشند) حالا براساس اینکه این نقاط به کدوم شرط مرزی نزدیک ترن بررسی کنید که آیا بین این دو نقطه تفاوت غلظت یا دمایی وجود داره یا نه (مثلاً یه نقطه رو روی  $\theta = 0^\circ$  و یه نقطه دیگه رو روی  $\theta = 100^\circ$  قرار بدید)، واضح هستش که اگه احساس می‌کردید باید تفاوت داشته باشن تغییرات در اون جهت هم دارید و باید توی المان در نظر بگیریدش. بین دو روشی که معرفی شد روش اول برای مسائلی بیشتر کاربرد داره که جهتی که بهش شک دارید جهت چرخش نباشه (مثل  $X, Y, Z$  و ...) اما تو مسائلی که چرخش هم وارد میشه روش دوم بهتر جواب میده.

بخش سوم: این بخش هم تو امتحان نمره داره هم به فهم بهترتون از مسئله کمک می‌کنه برای همین پیشنهاد میکنم حتما تمرینش کنید؛ تو مرحله قبل جهت‌هایی از المان رو که دچار تغییر می‌شدند رو بررسی کردید و متوجه شدید که چه جهت‌هایی تغییرات دارند، پیشنهاد من برای کشیدن المان به این صورته: اول یه جهت رو به صورت دلخواه انتخاب کنید (جهت‌های طولی عموماً راحت ترن مثل  $r$  یا  $Z$  و البته اگر تغییرات در جهت آن‌ها وجود داشته باشه هم خیلی بهتره)، بعدش یه بردار از مرکز مختصات به یک نقطه دلخواه در جهتی که انتخاب کردید بکشید، حالا بررسی کنید که تو مرحله قبل برای این جهت تغییرات در نظر گرفته‌اید یا نه، اگر تغییراتی برای این جهت در نظر نگرفتید، این بردار را تا انتها ادامه دهید (مثلاً  $r$  رو تا  $R$  ادامه دهید)، اگر که تغییرات دارید پس همین نقطه دلخواه را به یک اندازه دیفرانسیلی در آن جهت ادامه دهید (مثلاً  $dr$ )؛ حالا همین

فرایند رو برای دو جهت دیگه تکرار کنید فقط دقت کنید که نباید نقطه دلخواه یا المانی که تا الان کشیدید رو کنار بزارید بلکه باید دقیقا از همونجایی که مرحله قبلی رو تموم کردید برای جهت دوم اینکارو تکرار کنید و بعدش هم برای جهت سوم.

**بخش چهارم:** این تقریبا ساده ترین بخشه چون تغییرات با زمان صرفا به صورت سوال برمیگرده، اگر صورت سوال حرف از تغییرات زده (مثلا دمای ورودی ناگهانی تغییر می کند یا چیزی شبیه این) متوجه می شوید که سیستم از حالت تعادل خارج شده و حالا در حالت ناپایدار قرار گرفته و تغییرات اون پارامتر مورد بررسی (دما، جرم و یا سرعت) رو باید توی موازنتون بیارید. لطفا دقت داشته باشید که باید به فیزیک مسئله هم دقت کنید، مثلا اگه یه تانک آب رو در نظر گرفتید که شیرش رو باز کردید و آب ازش خارج میشه، واضح هستش که جرم داخل تانکر لحظه به لحظه در حال کم شدنه پس مسئله حتی اگر حرفی از تغییرات نزنه شما باید تغییرات با زمان رو در نظر بگیرید.

لطفا به 2 نکته زیر دقت داشته باشید:

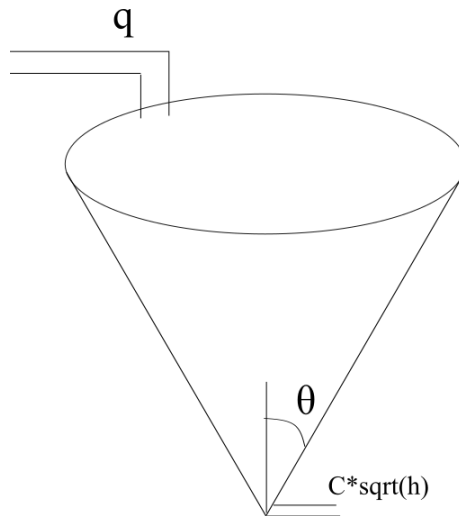
**1:** تشخیص اینکه مسئله نیاز به موازنه توده ای (کلی) داره یا جزئی به عهده خودتون هستش که براساس نوع سیستم و اینکه آیا اجزای یک سیستم به طور جداگونه براتون اهمیت دارن یا به صورت تکی، تصمیم بگیرید. واضح هستش که اگر موازنه رو توده ای در نظر بگیرید مرحله دوم حذف میشه اما باقی مراحل هنوز باید انجام شوند.

**2:** عموم حرف های که زده شد مثال ها مربوط به جرم و حرارت بود چرا که درک مسائل آنها از نظر فیزیکی عموما ساده تره اما تمام مراحل 1 تا 4 برای مسائل موازنه مومنتوم نیز صادق هستند، اما برای مرحله بعدی که نوشتن ورودی و خروجی و نهایتا (در فصل های بعد) حل مسئله می باشد، پیشنهاد میشه برای جرم و حرارت خودتون ورودی و خروجی رو بنویسید اما برای مسائل موازنه مومنتوم از اخر کتاب استفاده کنید که احتمال اشتباهتون کمتر بشه.



## فصل 2

سوال 1. تانکی مخروطی شکل موجود است. در ابتدا تانک خالی از آب می باشد. در لحظه  $t = 0$  آب با دبی  $q$  به داخل تانک ریخته می شود. تغییرات ارتفاع آب داخل تانک با زمان را بدست آورید.



حل سوال 1.

$$\frac{d(\frac{1}{3}\pi * r^2 * h)}{dt} = q - c * \sqrt{h}$$

$$\frac{d(r^2 * h)}{q - c * \sqrt{h}} = \left(\frac{3}{\pi}\right) * dt$$

باید رابطه بین  $r$  و  $h$  را بدست آورد:

$$\tan \theta = \frac{r}{h} \Rightarrow r = h * \tan \theta$$

با ساده سازی معادله نهایی زیر بدست می آید:

$$\int \frac{d(h^3)}{q - c * \sqrt{h}} = \int \frac{3 * h^2 dh}{q - c * \sqrt{h}} = \left(\frac{3}{\pi * \tan^2 \theta}\right) * \int dt$$

$$\int \frac{h^2}{q - c * \sqrt{h}} dh = \left(\frac{1}{\pi * \tan^2 \theta}\right) * \int dt$$

برای حل انتگرال بالا از رابطه تغییر متغیر زیر استفاده میکنیم:

$$\left(\frac{1}{\pi * \tan \theta^2}\right) = \alpha$$

$$q - c * \sqrt{h} = u \Rightarrow -c * \frac{dh}{2 * \sqrt{h}} = du, \frac{q - u}{c} = \sqrt{h}$$

$$\int \frac{1}{c^4} * \frac{(q - u)^4}{u} * \frac{2}{-c} * \frac{q - u}{c} du = \alpha * \int dt$$

$$\int \frac{(q - u)^5}{u} du = \frac{\alpha * c^6}{2} * t + C$$

که عبارت داخل صورت انتگرال سمت راست با استفاده از بسط دو جمله‌ای نیوتن جایگذاری می‌کنیم:

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}$$

$$\begin{aligned} (q + (-u))^5 &= q^5 + 5 * q^4 * (-u) + 10 * q^3 * (-u)^2 + 10 * q^2 * (-u)^3 \\ &+ 5 * q * (-u)^4 + (-u)^5 \\ &= q^5 - 5 * q^4 * u + 10 * q^3 * u^2 - 10 * q^2 * u^3 + 5 * q * u^4 - u^5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\int \frac{(q - u)^5}{u} du \\ &= \int \frac{q^5 - 5 * q^4 * u + 10 * q^3 * u^2 - 10 * q^2 * u^3 + 5 * q * u^4 - u^5}{u} du \\ &= q^5 * \ln u - 5 * q^4 * u + 10 * q^3 * \frac{u^2}{2} - 10 * q^2 * \frac{u^3}{3} + 5 * q * \frac{u^4}{4} \\ &- \frac{u^5}{5} = \frac{\alpha * c^6}{2} * t + C \end{aligned}$$

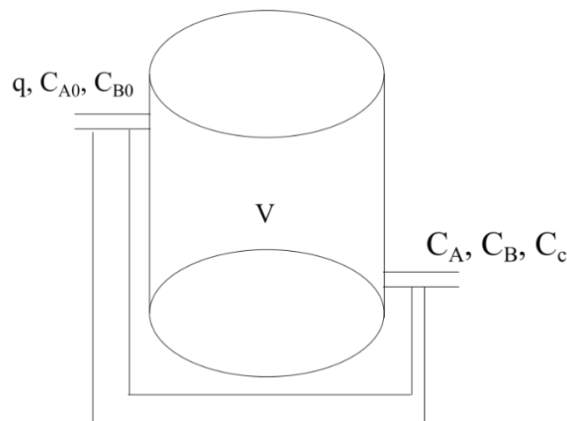
با توجه به اینکه در زمان  $t = 0$  تانک خالی بوده:

$$@t=0 \Rightarrow h = 0 \Rightarrow q - c * \sqrt{h} = u \Rightarrow q = u$$

$$q^5 * \ln q - 5 * q^4 * q + 10 * q^3 * \frac{q^2}{2} - 10 * q^2 * \frac{q^3}{3} + 5 * q * \frac{q^4}{4} - \frac{q^5}{5}$$

$$= \frac{\alpha * c^6}{2} * (0) + C = C$$

سوال 2. راکتوری در شرایط زیر کار می‌باشد. قسمتی از دبی خروجی راکتور (40% محلول خروجی) به صورت بازگشتی به ابتدای راکتور بازگردانده می‌شود. اگر در لحظه  $t = 0$  غلظت  $C_{A0s}$  به  $C_{A0}$  تبدیل شود، تغییرات غلظت A با زمان را بدست آورید.



واکنش در راکتور تعادلیست و با ثوابت سرعت زیر اتفاق می‌افتد:



$$R_{\text{رفت}} = k_1 * C_A * C_B$$

$$R_{\text{برگشت}} = k_2 * C_C^2$$

حل سوال 2.

با توجه به اینکه قسمتی از دبی خروجی به راکتور بازگردانده می‌شود جریان بازگشتی به راکتور را با  $q_r$  و جریانی که به راکتور باز نمی‌گردد را با  $q'$  نشان می‌دهیم و باید رابطه‌ای بین این دو پارامتر و دبی ورودی به راکتور ( $q$ ) بدست آوریم، برای اینکار اول معادله کلی موازنه جرم برای این راکتور به این صورت نوشته می‌شود:

$$q + q_r = q_r + q'$$

که سمت چپ معادله نشان دهنده تمام جریان‌های ورودی به داخل راکتور و سمت راست نشان دهنده جریان خروجی از راکتور می‌باشد؛ از معادله بالا به واضحگی می‌توان نتیجه گرفت که  $q = q'$  می‌باشد.

از طرفی با توجه به صورت سوال 40% خروجی جریان بازگشتی می‌باشد پس با توجه به این موضوع می‌توان نوشت:

$$0.4 * (q + q_r) = q_r$$

$$q_r = \frac{2}{3} * q \quad \text{که از معادله بالا نیز می‌توان نتیجه گرفت که:}$$

موازنه جرم جزئی برای A در حالت ناپایدار مینویسیم:

$$\frac{dC_A}{dt} = q * C_{A0} + q_r * C_A - (q + q_r) * C_A - K1 * C_A * C_B * V + K2 * C_c^2 * V$$

برای حل معادله بالا نیاز به داشتن رابطه‌ای بین غلظت A، B و C داریم:

$$C_{A0} - C_A - C_{As} = C_{B0} - C_B - C_{Bs} = C_c - C_{c0} - C_{Cs}$$

دقت کنید که در معادله بالا  $C_{c0}$  صفر می‌باشد و  $C_{As}$  برابر با غلظت A در حالت پایدار می‌باشد (در قسمت آخر سوال محاسبه می‌شود) و  $C_{A0}$  در اینجا غلظت جدید A می‌باشد.

برای سادگی نوشتن:

$$C_{Ad} = C_{A0} - C_{As}$$

به همین ترتیب  $C_{Bd}$  نیز تعریف خواهد شد.

اگر معادله بالا را جایگذاری و ساده کنیم به معادله نهایی زیر میرسیم:

$$\frac{dC_A}{dt} = \alpha + \beta * C_A + \gamma * C_A^2$$

که در معادله بالا ثابت ها به صورت زیر می توان نوشت:

$$\alpha = q * C_{A0} + V * k_2 * C_{A0}^2$$

$$\beta = -q - K_1 * (C_{B0} - C_{Ad}) * V - 2 * K_2 * C_{Ad} * V$$

$$\gamma = K_2 * V - K_1 * V$$

$$\int \frac{dC_A}{\alpha + \beta * C_A + \gamma * C_A^2} = \int dt = t$$

جواب سمت راست انتگرال واضح می باشد اما برای سمت چپ باید ابتدا ریشه های مخرج را بدست آوریم که اینکار یا با استفاده از ماشین حساب یا دستور roots مطلب انجام می شود (پیشنهاد میشود در این مرحله (مخصوصا سر امتحان) تمام مقادیر ثابت و ضرایب جایگذاری شوند اما برای کلی بودن حل در این سوال اینکار را انجام نمیدهیم).

$$\text{roots}([\gamma, \beta, \alpha])$$

با نوشتن دستور بالا در متلب میتوانید ریشه های معادله بالا را بدست آورید که به یکی از سه حالت زیر میرسید:

الف) ریشه های معادله موهومی باشند:

این حالت را با مثال عددی حل می کنیم:

$$\gamma = 1, \beta = 2, \alpha = 2$$

در این حالت مخرج انتگرال به صورت یک عبارت مربع کامل به اضافه یک عدد ثابت نوشته می شود:

$$\int \frac{dC_A}{2 + 2 * C_A + C_A^2} = \int \frac{dC_A}{(C_A + 1)^2 + 1} \Rightarrow \text{تغییر متغیر } CA + 1 = u \Rightarrow dCA = du$$

$$\int \frac{du}{u^2 + 1} = \tan^{-1} u = \tan^{-1}(CA + 1) + C_1$$

ب) دو ریشه برابر باشند:  $r1 = r2$

در این صورت انتگرال را به صورت زیر می نویسیم:

$$\int \frac{dC_A}{(C_A - r1)^2} \Rightarrow \text{تغییر متغیر} \Rightarrow C_A - r1 = u \Rightarrow dC_A = du$$

$$\int \frac{du}{u^2} = -\frac{1}{u} = -\frac{1}{C_A - r1} + C1$$

ج) در این حالت نیز دو ریشه حقیقی متفاوت داریم که باید کسر با تجزیه کنیم:

$$\frac{1}{(C_A - r1) * (C_A - r2)} = \frac{b1}{C_A - r1} + \frac{b2}{C_A - r2}$$

که ضرایب  $b1$  و  $b2$  با جایگذاری هر عدد دلخواهی در تساوی بالا بدست می آیند.

جواب نهایی انتگرال نیز از رابطه زیر بدست می آید.

$$\begin{aligned} \int \frac{b1}{C_A - r1} dC_A + \int \frac{b2}{C_A - r2} dC_A \\ = b1 * \ln(C_A - r1) + b2 * \ln(C_A - r2) + C1 \end{aligned}$$

همانطور که دیده می شود در تمام معادلات بالا ضریبی به نام  $C1$  وجود دارد که مقدار آن مشخص نیست، این ضریب باید از شرایط مرزی مسئله تعیین شود که در این مسئله شرایط مرزی غلظت  $A$  در حالت پایدار می باشد:

$$0 = q * C_{A0S} + q_r * C_{AS} - (q + q_r) * C_{AS} - K1 * C_A * C_B * V + K2 * C_{CS}^2 * V$$

$$0 = q * C_{B0S} + q_r * C_{BS} - (q + q_r) * C_{BS} - K1 * C_{AS} * C_{BS} * V + K2 * C_{CS}^2 * V$$

$$0 = q_r * C_{CS} - (q + q_r) * C_{CS} + K1 * C_{AS} * C_{BS} * V - K2 * C_{CS}^2 * V$$

سوال 3. یک مایسل کروی که در آن واکنشی با شرایط زیر اتفاق می افتد را در نظر بگیرید. مایسل در یک محیط اشباع از مونومر A قرار دارد و مونومر A با شرایط زیر در مایسل نفوذ می کند. توزیع غلظت درون مایسل را بدست آورید.

واکنش:

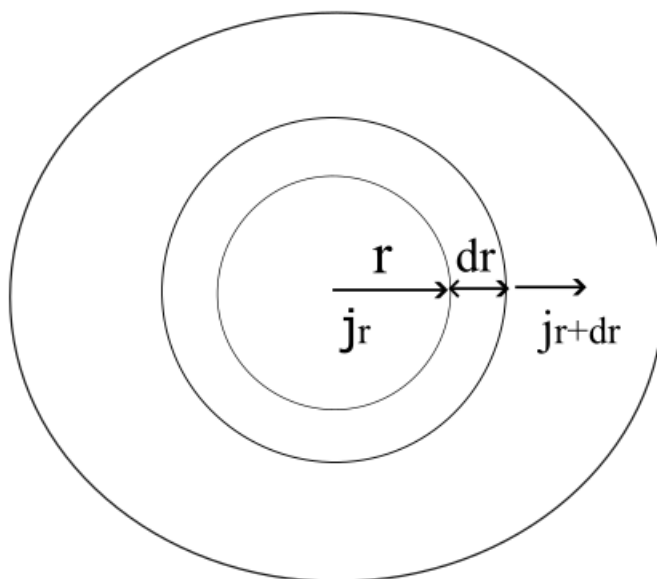
$$R = K * C_A$$

معادله نفوذ مونومر به درون مایسل:

$$J = k * (C_s - C)$$

که  $C_s$  غلظت اشباع داخل محلول اطراف مایسل می باشد.

حل سوال 3. با توجه به اینکه توزیع غلظت درون مایسل مدنظر است و اینکه مایسل کروی می باشد المان را پوسته کروی درنظر می گیریم.



با توجه به اینکه صورت سوال حرفی از تغییرات نزده می توانیم مسئله را به صورت پایدار درنظر بگیریم.

$$-A * j_r + A * j_{r+dr} - k C_a * 4 * \pi * r^2 * dr = 0$$



حجم المان کروی:  $4 * \pi * r^2 * dr$

با جایگذاری مساحت‌ها:

$$4 * \pi * r^2|_r * j_r - 4 * \pi * r^2|_{r+dr} * j_{r+dr} - kC_a * 4 * \pi * r^2 * dr = 0$$

با تقسیم دو طرف معادله بر  $4 * \pi * dr$ :

$$-D * \frac{d(r^2 * -\frac{dC_a}{dr})}{dr} - kC_a * r^2 = 0$$

$$D * \frac{d(r^2 * \frac{dC_a}{dr})}{dr} - kC_a * r^2 = 0$$

$$r^2 * \frac{d^2 C_a}{dr^2} + 2 * r * \frac{dC_a}{dr} - \frac{k}{D} C_a * r^2 = 0$$

معادله بالا معادله بسل می‌باشد که بهتر است از روش عمومی (صفحه 91) کتاب برای حل آن استفاده شود:

$$a = 2, b = 0, c = 0, d = -\frac{k}{d}, s = 1 \Rightarrow p = 0.5, \frac{\sqrt{d}}{s} \text{ موهومی میباشد}$$

$$\frac{\sqrt{|-\frac{k}{D}|}}{1} = \alpha$$

$$C_a = r^{\frac{-1}{2}} * [C1 * I_{0.5}(\alpha * r) + C2 * I_{-0.5}(\alpha * r)]$$

$$r = 0 \quad \frac{dC_a}{dr} = 0$$

$$r = R \quad -D * \frac{dC_a}{dr} = k * (C_s - C_a)$$

شرط مرزی اول:

برای اعمال این شرط مرزی از معادلات صفحه 89 کتاب استفاده می‌کنیم: (معادله 2-86):

$$\frac{dc_a}{dr} = 0 = \frac{-1}{2} * r^{\frac{-3}{2}} * [C1 * I_{0.5}(0) + C2 * I_{-0.5}(0)] + r^{\frac{-1}{2}} * \left[ C1 * \alpha * I_{1.5}(0) + C1 * \frac{0.5}{r} * I_{0.5}(0) + C2 * \alpha * I_{0.5}(0) + C2 * \frac{-0.5}{r} * I_{-0.5}(0) \right]$$

برای جایگذاری مقادیر تابع بسل پیشنهاد می‌شود از کدهای متلب زیر استفاده شود:

$$I_{0.5}(0) = I_{1.5}(0) = \text{besseli}(0.5,0) = \text{besseli}(1.5,0) = 0$$

$$I_{-0.5}(0) = \text{besseli}(-0.5,0) = \infty$$

با توجه به نتایج بالا واضح است که برای برقراری تساوی نیاز است تا  $C2 = 0$  باشد.

$$C_a = r^{\frac{-1}{2}} * C1 * I_{0.5}(\alpha * r)$$

شرط مرزی دوم:

$$\frac{-1}{2} * R^{\frac{-3}{2}} * [C1 * I_{0.5}(\alpha * R)] + R^{\frac{-1}{2}} * \left[ C1 * \alpha * I_{1.5}(\alpha * R) + C1 * \frac{0.5}{R} * I_{0.5}(\alpha * R) \right] = \alpha^2 * \left( C_s - R^{\frac{-1}{2}} * C1 * I_{0.5}(\alpha * R) \right)$$

که معادله بالا یک معادله جبری خطی می‌باشد که تنها متغیر آن  $C1$  است و می‌توانید با جا به جا کردن و ساده سازی معادله به مقدار زیر برسید:

$C1$

$$= \frac{\alpha^2 * C_s}{\frac{-1}{2} * R^{\frac{-3}{2}} * I_{0.5}(\alpha * R) + R^{\frac{-1}{2}} * \left[ \alpha * I_{1.5}(\alpha * R) + \frac{0.5}{R} * I_{0.5}(\alpha * R) \right]}$$

جواب نهایی:

$$C_a = r^{\frac{-1}{2}} * C1 * I_{0.5}(\alpha * r)$$

سوال 4. سیالی در فضای بین دو استوانه طولانی قرار دارد و استوانه داخلی در حال چرخش با سرعت  $\omega$  می باشد. پروفایل سرعت سیال را بدست آورید.

حل سوال 4. با توجه به اینکه استوانه داخلی در حال چرخش است سرعت در جهت  $\omega$  و با توجه به طولانی بودن استوانه و متقارن بودن هندسه تغییرات سرعت فقط در جهت  $\theta$  خواهد بود. (و از آنجایی که مختصات استوانه ای و موازنه مومنتوم باید نوشته شود از معادله الف-15 آخر کتاب استفاده می کنیم):

$$0 = -\frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 \tau_{\theta r})}{dr} \Rightarrow 0 = \frac{d(r^2 \tau_{\theta r})}{dr} \Rightarrow \tau_{\theta r} = \frac{C1}{r^2}$$

جایگذاری  $\tau_{\theta r}$ :

$$\tau_{\theta r} = -\mu * r * \frac{d\left(\frac{v_{\theta}}{r}\right)}{dr} = \frac{C1}{r^2} \Rightarrow \int d\left(\frac{v_{\theta}}{r}\right) = - \int \frac{C1}{\mu * r^3} dr$$

$$\left(\frac{v_{\theta}}{r}\right) = \frac{C1}{2 * \mu * r^2} + C2 \Rightarrow v_{\theta} = \frac{C1}{2 * \mu * r} + C2 * r$$

$$r = R1, v_{\theta} = R1 * \omega \Rightarrow R1 * \omega = \frac{C1}{2 * \mu * R1} + C2 * R1$$

$$r = R2, v_{\theta} = 0 \Rightarrow 0 = \frac{C1}{2 * \mu * R2} + C2 * R2$$

که با حل دو معادله دو مجهول بالا به جواب زیر میرسیم:

$$C1 = \frac{2 * \mu * \omega * R2^2 * R1^2}{R2^2 - R1^2} @ C2 = -\frac{\omega * R1^2}{R2^2 - R1^2}$$

جواب برای حالت خاصی از مسئله در فایل tamrin4\_4 محاسبه و رسم شده است.

## فصل 6

سوال 1. معادله زیر را با روش تنصیف و سکانت حل کنید. (فایل tamrin 6\_1)

$$\sqrt[3]{x} + 5 * x^4 + 0.5 * \sqrt{x} - \exp(3x) + 2 = 0$$

سوال 2. دستگاه معادلات زیر را با حل کنید. (tamrin6\_2)

$$e^{x-y} - y * (1 + x^2) = 0$$

$$x * \cos(y) - y * \sin(x) = 0.5$$

## فصل 7

سوال 1. معادله دیفرانسیل زیر را با روش‌های اویلر بهبود یافته (هیون) و رانگ کاتا مرتبه 4 برای بازه  $x \in [0,4]$  حل کنید.

$$y * y' = \sin(x) + y^2 \quad @x = 0, y = 1$$

حل سوال 1.

تمام موارد (غیر از مشتق) را به یک طرف معادله منتقل می‌کنیم

$$y' = \frac{dy}{dx} = f(x, y) = \frac{\sin(x)}{y} + y$$

روش هیون:

$$y(m+1) = y(m) + \frac{\Delta x}{2} * (k1 + k2)$$

$$k1 = f(x(m), y(m))$$

$$k2 = f(x(m) + \Delta x, y(m) + k1 * \Delta x)$$

گام اول محاسباتی:

$$m = 0: \quad y(1) = y(0) + \frac{0.1}{2} * (k1 + k2)$$

$$k1 = f(x(0), y(0)) = 1$$

$$k2 = f(x(0) + 0.1, y(0) + k1 * 0.1) = 1.19$$

$$y(1) = 1 + \frac{0.1}{2} * (k1 + k2) = 1.109$$

رانگ-کاتا:

$$y(m+1) = y(m) + \frac{\Delta x}{6} * (k1 + 2 * k2 + 2 * k3 + k4)$$

$$k1 = f(x(m), y(m))$$

$$k_2 = f\left(x(m) + \frac{\Delta x}{2}, y(m) + \frac{1}{2} * k_1 * \Delta x\right)$$

$$k_3 = f\left(x(m) + \frac{\Delta x}{2}, y(m) + \frac{1}{2} * k_2 * \Delta x\right)$$

$$k_4 = f\left(x(m) + \Delta x, y(m) + k_3 * \Delta x\right)$$

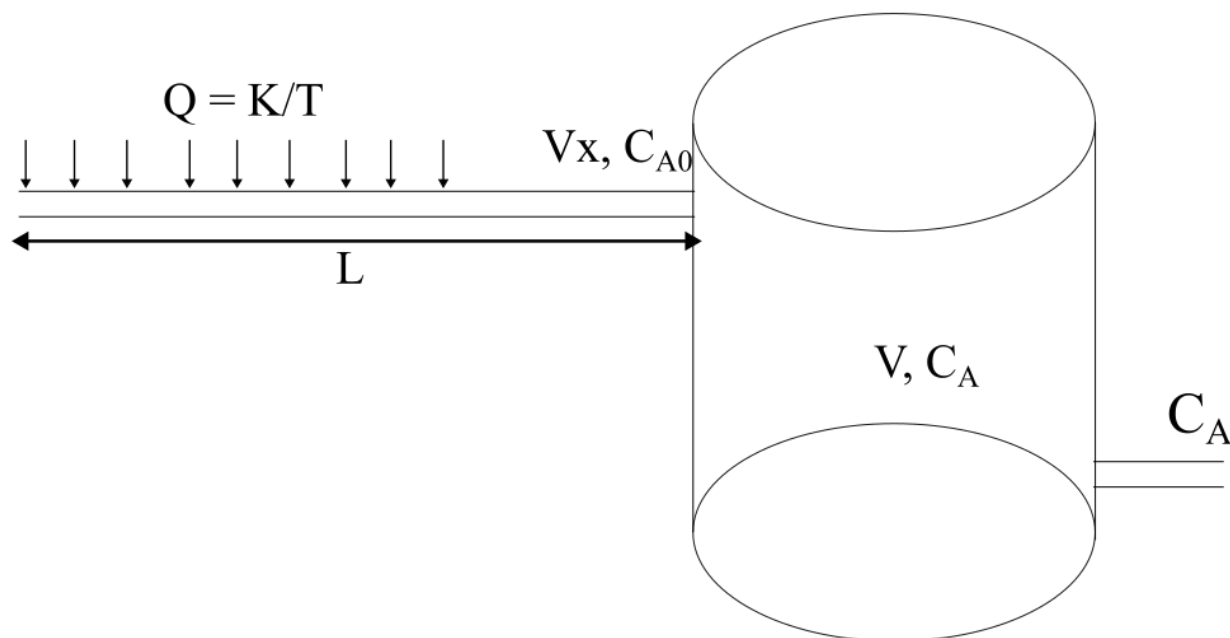
سوال 2. یک لوله به طول  $L$  به یک راکتور در حالت پایدار متصل می‌شود. محلول ورودی در ابتدای لوله در دمای  $T_i$  قرار دارد و در طول مسیر خود طبق معادله زیر گرم می‌شود ( $Q = \frac{k}{T}$ )، که در این معادله  $k$  عدد ثابت و واحد  $k$ ،  $\frac{W}{m^2 * K}$  می‌باشد.

الف) معادله توزیع دما در لوله و همچنین غلظت در راکتور را در شرایط پایدار بدست آورید. (فرض کنید که دما در راکتور تغییر نمی‌کند)

ب) توزیع دما و غلظت در راکتور را در شرایط پایدار بدست آورید و توزیع دما را رسم کنید.

ج) توزیع دما را از طریق روش هیون بدست آورید.

د) اگر غلظت به طور ناگهانی در محلول ورودی به مقدار  $1.5 \text{ mol/lit}$  تغییر کند تغییرات غلظت داخل راکتور با زمان را با روش رانگ-کاتا مرتبه 4 حل و رسم کنید.





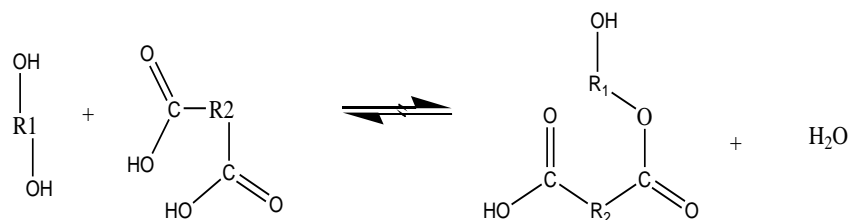
داده‌های صورت سوال:

$$V_x = 2; k_1 = 2 \cdot 10^2; T_i = 300; \rho = 1000; R = 0.1; V = 5; C_p = 4200; E_a = 150e2; R_{\text{gas}} = 8.314; K = 7; L = 100; Ca_0 = 1;$$

حل سوال 2.

اضافه می‌شود.

سوال 3. در تولید پلی استرها یک روش تولید واکنش بین دی اسید و دی الکل است. برای تولید، یک مول دی اسید با 1.7 مول دی الکل در راکتور batch ریخته شده و شرایط واکنش مهیا می‌شود. ثابت سرعت واکنش رفت 0.03 و واکنش برگشت 0.01 است. تغییرات درصد تبدیل دی اسید را با زمان بدست آورید. (از روش رانگ-کاتا-مرسون استفاده کنید)



در هر دو واکنش رفت و برگشت توان غلظت‌های واکنش دهنده‌ها از مرتبه یک می‌باشند و حجم راکتور را نیز 1 lit در نظر بگیرید.

حل سوال 3.

A: دی اسید B: دی الکل C: پلی استر D: آب



موازنه جزئی جرم برای دی اسید می‌نویسیم:

$$\frac{d(AV)}{dt} = 0 - 0 + k_2 * C * D * V - k_1 * A * B * V$$

حجم ثابت:

$$V * \frac{d(A)}{dt} = 0 - 0 + k_2 * C * D * V - k_1 * A * B * V$$

معادله نهایی:

$$\frac{dA}{dt} = k_2 * C * D - k_1 * A * B \quad (1)$$

رابطه درصد تبدیل:

$$P = \frac{A_0 - A}{A_0} = 1 - \frac{A}{A_0}$$

یا

$$A = A_0 * (1 - P)$$

از دو طرف رابطه مشتق می گیریم:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= -\frac{1}{A_0} * \frac{dA}{dt} \\ \frac{dA}{dt} &= -A_0 * \frac{dP}{dt} \quad (2) \end{aligned}$$

بقیه پارامترهای، غلظت B، C و D را نیز نسبت به درصد تبدیل A بدست می آوریم:

**B:**

با توجه به ضرایب استوکیومتری هرچه از A مصرف شود از B نیز همان مقدار کسر خواهد شد، به

عبارتی:

$$B_0 - B = A_0 - A$$

$$B_0 - A_0 + A = B$$

$$B_0 - A_0 + A_0 * (1 - P) = B$$

$$B_0 - A_0 * (1 - 1 + P) = B$$

$$B0 - A0 * P = B \quad (3)$$

C و D:

$$C - C0 = D - D0 = A0 - A = P * A0$$

مقدار C0 و D0 چون از اول در راکتور وجود نداشته‌اند صفر در نظر می‌گیریم.

$$C = D = P * A0 \quad (4)$$

در نهایت با جایگذاری معادلات 2,3,4 در معادله 1 به معادله زیر می‌رسیم:

$$-A0 * \frac{dp}{dt} = k2 * (P * A0) * (P * A0) - k1 * A0 * (1 - P) * (B0 - A0 * P)$$

معادله نهایی:

$$\frac{dp}{dt} = k1 * (1 - P) * (B0 - A0 * P) - k2 * P^2 * A0$$

حل معادله (1) با استفاده از روش‌های آدامز-بشفورت:

$$P(m+1) = P(m) + \frac{\Delta t}{24} * (55 * f(m) - 59 * f(m-1) + 37 * f(m-2) - 9 * f(m-3))$$

$$f(m) = k1 * (1 - P(m)) * (B0 - A0 * P(m)) - k2 * P(m)^2 * A0$$

$$P(1) = 0$$

اگر  $m=4$  را جایگذاری کنیم:  $f(2)$ ،  $f(3)$  و  $f(4)$  (و به همین ترتیب  $A(m)$ ‌های متناظر با آن‌ها) مجهول می‌باشند.

برای بدست آوردن این مقادیر از روش‌های قبلی از جمله رانگ-کاتا، هیون و اوایلر می‌توان استفاده کرد.

$$P(m+1) = P(m) + f(t(m).y(m)) \quad \text{اوایلر:}$$

$$k1 = f(t(m),y(m)), \quad k2 = f(t(m) + \Delta t, y(m) + k1 * \Delta t) \quad \text{هیون:}$$

$$P(m+1) = \frac{\Delta t}{2} * (k1 + k2)$$

رانگ-کاتا-مرسون:

$$k1 = f(t(m).y(m)) \quad . \quad k2 = f\left(t(m) + \frac{\Delta t}{3}.y(m) + \frac{\Delta t}{3} * k1\right)$$

$$k3 = f\left(t(m) + \frac{\Delta t}{3}.y(m) + \frac{\Delta t}{6} * k1 + \frac{\Delta t}{6} * k2\right)$$

$$k4 = f\left(t(m) + \frac{\Delta t}{2}.y(m) + \frac{\Delta t}{8} * k1 + \frac{3 * \Delta t}{8} * k3\right)$$

$$k5 = f\left(t(m) + \Delta t.y(m) + \frac{\Delta t}{2} * k1 - \frac{3 * \Delta t}{2} * k3 + 2 * \Delta t * k4\right)$$

$$P(m+1) = P(m) + \frac{\Delta t}{6} * (k1 + 4 * k4 + k5)$$

حل معادله (1) با استفاده از روش‌های آدامز-مولتون:

$$P(m+1) = P(m) + \frac{\Delta t}{24} * (9 * f(m+1) + 19 * f(m) - 5 * f(m-1) + f(m-2))$$

$$f(m) = k1 * (1 - P) * (B0 - A0 * P) - k2 * P^2 * A0$$

$$A(1) = 0$$

دوباره باید اول تا 3 گام محاسباتی با روش‌های قبلی حساب کرد و سپس می‌توان معادله را با استفاده از fsolve حل کرد.

حل معادله (1) با استفاده از روش‌های آدامز-بشفورث-مولتون:

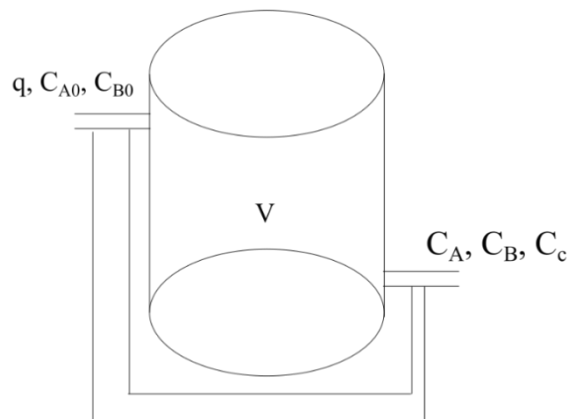
$$Pp = P(m) + \frac{\Delta t}{24} * (55 * f(m) - 59 * f(m - 1) + 37 * f(m - 2) - 9 * f(m - 3))$$

$$Pc(m + 1)$$

$$= P(m) + \frac{\Delta t}{24} * (9 * fp(m + 1) + 19 * f(m) - 5 * f(m - 1) + f(m - 2))$$

$$P(1) = 0$$

سوال 4. راکتوری در شرایط زیر حال کار می‌باشد. قسمتی از دبی خروجی راکتور (40% محلول خروجی) به صورت بازگشتی به ابتدای راکتور بازگردانده می‌شود. اگر در لحظه  $t = 0$  غلظت  $C_{A0s}$  به  $C_{A0}$  تبدیل شود، تغییرات غلظت A با زمان را بدست آورید.



واکنش در راکتور تعادلیست و با ثوابت سرعت زیر اتفاق می‌افتد:



$$R_{\text{رفت}} = k_1 * C_A * C_B$$

$$R_{\text{برگشت}} = k_2 * C_C^2$$

حل سوال 4.

سوال 5. کره‌ای به شعاع R در دمای محیط،  $T = 298\text{ K}$  قرار دارد. در لحظه  $t = 0$  کره در سیالی با دمای  $T_b$  قرار میگیرد.

(الف) توزیع لحظه‌ای دما را صرفنظر از تغییرات دما داخل جسم را تا رسیدن به تعادل با محیط را از روش‌های تحلیلی بدست آورید.

(ب) توزیع لحظه‌ای دما را صرفنظر از تغییرات دما داخل جسم را تا رسیدن به تعادل با محیط را از روش‌های حل عددی بدست آورید.

(ج) زمان رسیدن به تعادل در هردو روش را بدست آورید.

داده‌های مسئله:

$$h = 85 \frac{W}{m^2 * K}, \rho = 1.15 \frac{g}{cm^3}, c_p = \sqrt{T} \frac{J}{kg * K}, R = 0.2m, T_b = 400\text{ K}$$

حل سوال 5.

سوال 6. (مشابه مثال 1-5 کتاب) یک استوانه توپر و طولانی از جنس لاستیک برای انجام فرایند ولکانیزاسیون در محیط بخار آب به دمای  $T_\infty = 300\text{ K}$  قرار دارد و تولید گرما درون این لاستیک برابر با  $q^o \frac{W}{m^3}$  می‌باشد. معادله حاکمه و توزیع دما پایدار در شرایط زیر را حساب کنید.

(الف) ضریب انتقال حرارت رسانش برابر با  $k = 0.16 \frac{W}{m^2 * K}$  و  $q^o = 1000 \frac{W}{m^3}$

(ب) ضریب انتقال حرارت رسانش برابر با  $k = 0.16 * T \frac{W}{m^2 * K}$  و  $q^o = 100 * (T - T_\infty)^{1.4} \frac{W}{m^3}$

ضریب انتقال حرارت جا به جایی نیز برابر با  $85 \frac{W}{m^2 * K}$  شعاع استوانه نیز برابر با 0.3m در نظر بگیرید.

حل سوال 6:

(الف) موازنه انرژی:

$$\frac{\partial(\rho * 2\pi r dr * L * C_p * T)}{\partial t} = 2\pi r * L * q(r) - 2\pi r * L * q(r + dr) + 2\pi r dr * L * q^o$$

شرایط پایدار:

$$0 = 2\pi r * L * q(r) - 2\pi r * L * q(r + dr) + 2\pi r dr * L * q^o$$

دو طرف را تقسیم بر  $2\pi dr * L$  می‌کنیم:

$$0 = k * \frac{d}{dr} \left( r * \frac{dT}{dr} \right) + r * q^o$$

دو طرف معادله را بر  $k$  تقسیم می‌کنیم:

$$0 = \frac{d}{dr} \left( r * \frac{dT}{dr} \right) + r * \frac{q^o}{k}$$

شرایط مرزی:

$$\frac{dT}{dr} = 0 \text{ @ } r = 0 \quad \& \quad -k * \frac{dT}{dr} = h(T - T_\infty) \text{ @ } r = R$$

با استفاده از روش تفاضل‌های محدود:

تقسیم بندی

$$r(i) = (i - 1) * \Delta r$$

برای گره‌های  $i = 2:n-1$ :

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dr} &= \frac{T(i) - T(i-1)}{\Delta r} \quad \& \quad \frac{d^2T}{dr^2} = \frac{T(i+1) - 2 * T(i) + T(i-1)}{\Delta r^2} \\ \frac{d}{dr} \left( r * \frac{dT}{dr} \right) \Big|_i &= \frac{r(i+1) * \frac{T(i+1) - T(i)}{\Delta r} - r(i) * \frac{T(i) - T(i-1)}{\Delta r}}{\Delta r} \\ &= \frac{r(i+1) * T(i+1) - (r(i+1) + r(i)) * T(i) + r(i) * T(i-1)}{\Delta r^2} \\ \frac{r(i+1) * T(i+1) - (r(i+1) + r(i)) * T(i) + r(i) * T(i-1)}{\Delta r^2} &+ r(i) * \frac{q^o}{k} = 0 \\ r(i+1) * T(i+1) - (r(i+1) + r(i)) * T(i) &+ r(i) * T(i-1) + r(i) * \Delta r^2 * \frac{q^o}{k} = 0 \end{aligned}$$

$$A(i+1) = r(i+1) = i * \Delta r$$

$$A(i) = -(r(i+1) + r(i))$$

$$A(i-1) = r(i) = (i-1) * \Delta r$$

$$b(i) = -r(i) * \Delta r^2 * \frac{q^o}{k}$$

$$i = 1: \quad T(2) - T(1) = 0$$

$$i = n: \quad -k * \frac{T(n) - T(n-1)}{\Delta r} = h * (Tn - T_{\infty})$$

$$i = n: \quad (k + h * \Delta r) * T(n) - k * T(n-1) = h * \Delta r * T_{\infty}$$

$$A(n) = (k + h * \Delta r)$$

$$A(n-1) = -k$$

$$b(n) = h * \Delta r * T_{\infty}$$

(ب)

$$0 = \frac{d}{dr} \left( k * r * \frac{dT}{dr} \right) + r * q^o$$

$$\frac{dT}{dr} = \frac{T(i) - T(i-1)}{\Delta r} \quad \& \quad \frac{d^2T}{dr^2} = \frac{T(i+1) - 2 * T(i) + T(i-1)}{\Delta r^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dr} \left( k * r * \frac{dT}{dr} \right) \Big|_i &= \frac{k(i+1) * r(i+1) * \frac{T(i+1) - T(i)}{\Delta r} - k(i) * r(i) * \frac{T(i) - T(i-1)}{\Delta r}}{\Delta r} \\ &= \frac{k(i+1) * r(i+1) * T(i+1) - (k(i+1) * r(i+1) + k(i) * r(i)) * T(i) + k(i) * r(i) * T(i-1)}{\Delta r^2} \end{aligned}$$

$$0.16 * T(i) = k_i$$

$$100 * (T(i) - T_{\infty})^{1.4} = q^o_i$$

$$\begin{aligned} &\frac{k(i+1) * r(i+1) * T(i+1) - (k(i+1) * r(i+1) + k(i) * r(i)) * T(i) + k(i) * r(i) * T(i-1)}{\Delta r^2} \\ &+ r(i) * q^o(i) = 0 \end{aligned}$$



$$0.16 * r_{i+1} * T_{i+1}^2 - 0.16 * r_{i+1} * T_{i+1} * T_i - 0.16 * r_i * T_i^2 + 0.16 * r_i * T_i * T_{i-1} + r_i * \Delta r^2 * 100 * (T_i - T_{\infty})^{1.4} = 0 = f_i$$

$$f_1 = T_2 - T_1 = 0$$

$$0.16 * T_n^2 + h * \Delta r * T_n - 0.16 * T_n * T_{n-1} - h * \Delta r * T_{\infty} = 0 = f_n$$

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial T_j} \cdot \frac{\partial k_i}{\partial T_i} = 0.16 \cdot \frac{\partial q_i^o}{\partial T_i} = 100 * 1.4 * (T(i) - T_{\infty})^{0.4}$$

$$J_{i,i-1} = \frac{\partial f_i}{\partial T_{i-1}} = 0.16 * T(i) * r(i)$$

$$J_{i,i} = \frac{\partial f_i}{\partial T_i} = -0.16 * r_{i+1} * T_{i+1} - 0.16 * 2 * r_i * T_i + 0.16 * r_i * T_{i-1} + 100 * r_i * \Delta r^2 * 1.4 * (T_i - T_{\infty})^{0.4} = 0$$

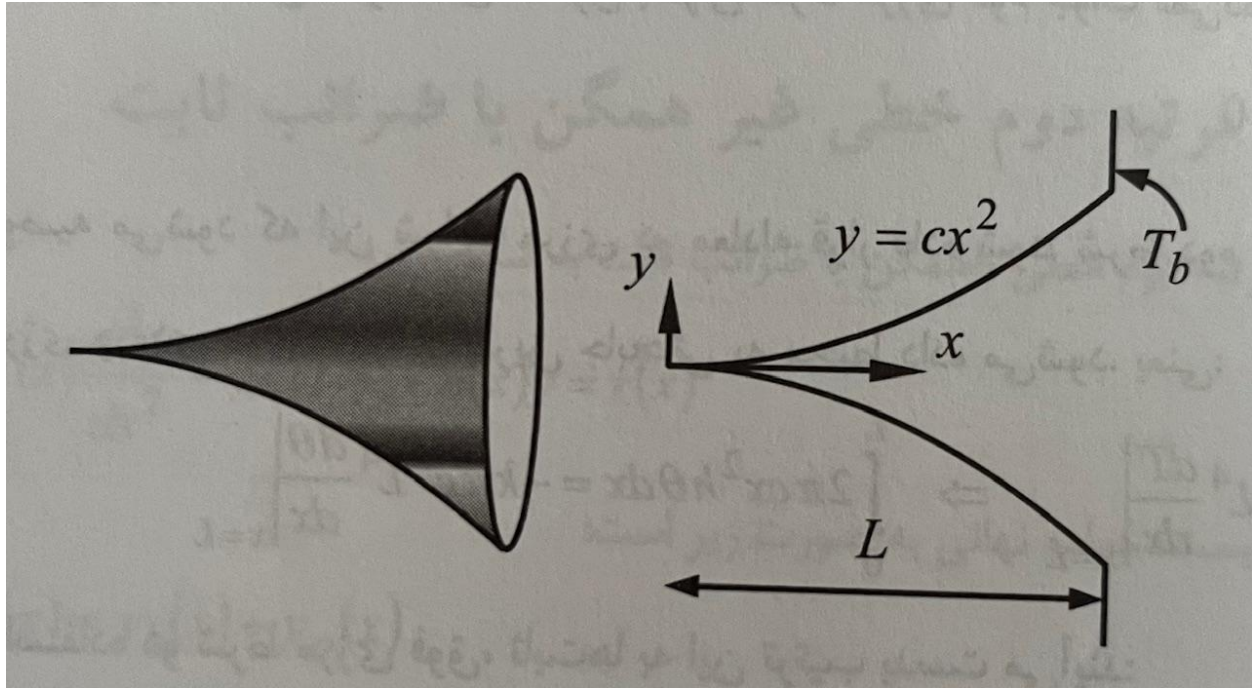
$$J_{i,i+1} = 0.16 * 2 * r_{i+1} * T_{i+1} - 0.16 * r_{i+1} * T_i$$

برای شرایط مرزی:

$$\frac{\partial f_1}{\partial T_1} = -1 \cdot \frac{\partial f_1}{\partial T_2} = 1$$

$$\frac{\partial f_n}{\partial T_n} = 0.16 * 2 * T_n + h * \Delta r - 0.16 * T_{n-1} \cdot \frac{\partial f_n}{\partial T_{n-1}} = -0.16 * T_n$$

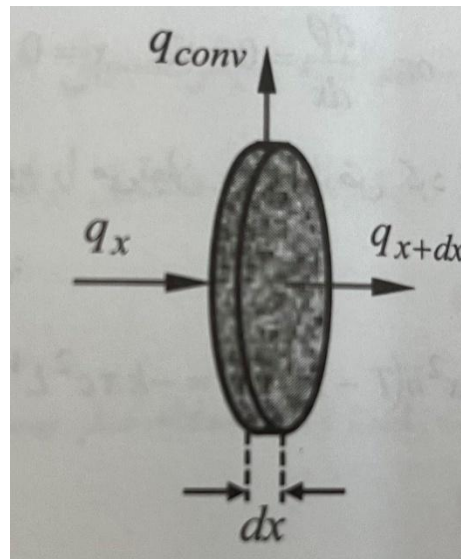
**سوال 7.** پره آلومینیومی زیر را در نظر بگیرید؛ دمای پایه پره برابر با  $100^{\circ}\text{C}$  و دمای نوک پره نیز برابر با دمای محیط می‌باشد. توزیع دمای پایدار برای پره را محاسبه نمایید. (ضخامت پره ناچیز است)



اطلاعات:

$$K = 0.018 \frac{W}{m^2 \cdot K}, L = 5 \text{ cm (طول پره)}, h = 15 \frac{W}{m^2 \cdot K}, T_{\infty} = 25^{\circ}C, c = 2$$

حل سوال 7.



موازنه انرژی:

$$0 = q_x - q_{x+dx} - 2 * \pi * y * dx * (T - T_{\infty}). \quad y = 2 * x^2$$

$$0 = -\frac{d}{dx}\left(-k * \pi * y^2 * \frac{dT}{dx}\right) - 2 * \pi * y * (T - T_{\infty})$$

$$0 = \frac{d}{dx}\left(4 * x^4 * \frac{dT}{dx}\right) - \frac{2}{k} * x^2 * (T - T_{\infty})$$

$$x = (i - 1) * \Delta x$$

شرایط مرزی:

$$T = T_b \text{ @ } x = 0. \quad T = T_a \text{ @ } x = L$$

تفاضل محدود:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}\left(x^4 * \frac{dT}{dx}\right) &= \frac{(x^4 * \frac{dT}{dx})|_{i+1} - (x^4 * \frac{dT}{dx})|_i}{\Delta x} \\ &= \frac{x^4_{i+1} * T_{i+1} - (x^4_{i+1} + x^4_i) * T_i + x^4_i * T_{i-1}}{\Delta x^2} \end{aligned}$$

$$\frac{x^4_{i+1} * T_{i+1} - (x^4_{i+1} + x^4_i) * T_i + x^4_i * T_{i-1}}{\Delta x^2} - \frac{1}{2k} * x^2_i * (T_i - T_{\infty}) = 0$$

$$x^4_{i+1} * T_{i+1} - \left(x^4_{i+1} + x^4_i + \frac{\Delta x^2}{2k} * x^2_i\right) * T_i + x^4_i * T_{i-1} = -\frac{\Delta x^2}{2k} * x^2_i * T_{\infty}$$

$$A(i, i + 1) = x^4_{i+1}$$

$$A(i, i) = -\left(x^4_{i+1} + x^4_i + \frac{\Delta x^2}{2k} * x^2_i\right)$$

$$A(i, i - 1) = x^4_i$$

$$b(i) = -\frac{\Delta x^2}{2k} * x^2_i * T_{\infty}$$

$$T_1 = T_{\infty}$$

$$T_n = T_b$$

سوال 8. معادله دیفرانسیل زیر را حل کنید.

$$\frac{d}{dx}\left(x^2 * \frac{dy}{dx}\right) - \lambda^2 * x * y = -\lambda^2 * x$$

الف) با شرایط مرزی زیر:

$$\frac{dy}{dx} = 0 \text{ @ } x = 0 \text{ \& } y = B \text{ @ } x = L$$

ب) با شرایط مرزی زیر:

$$\frac{dy}{dx} = 0 \text{ @ } x = 0.1 \text{ \& } y = B \text{ @ } x = 0.1$$

ج) با شرایط مرزی قسمت ب معادله زیر را حل کنید:

$$\frac{d}{dx} \left( y^2 * \frac{dy}{dx} \right) - \lambda^2 * x * y = -\lambda^2 * x$$

د) با شرایط مرزی قسمت الف معادله زیر را حل کنید:

$$\frac{d}{dx} \left( y^2 * \frac{dy}{dx} \right) - \lambda^2 * x * y = -\lambda^2 * x$$

حل سوال 8.

الف) اول مشتق اول را باز می‌کنیم و به صورت تفاضلی مینویسیم:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left( x^2 * \frac{dy}{dx} \right) &= 2x * \frac{dy}{dx} + x^2 * \frac{d^2y}{dx^2} \\ &= 2 * x_i * \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} + x_i^2 * \frac{y_{i+1} - 2 * y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \end{aligned}$$

با جایگذاری در معادله اصلی:

$$2 * x_i * \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} + x_i^2 * \frac{y_{i+1} - 2 * y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} - \lambda^2 * x_i * y_i = -\lambda^2 * x_i$$

با مرتب سازی به معادله زیر میرسیم:

$$\begin{aligned} (2 * x_i * \Delta x + x_i^2) * y_{i+1} - (2 * x_i * \Delta x + 2 * x_i^2 + \lambda^2 * \Delta x^2 * x_i) * y_i + x_i^2 \\ * y_{i-1} = -\lambda^2 * x_i * \Delta x^2 \end{aligned}$$

شرایط مرزی:

$$x = 0 \Rightarrow y_2 - y_1 = 0$$

$$x = L \Rightarrow y_n = B$$

(ب)

اول مشتق دوم را باز می‌کنیم:

$$\frac{d}{dx} \left( x^2 * \frac{dy}{dx} \right) = 2x * \frac{dy}{dx} + x^2 * \frac{d^2y}{dx^2}$$

جایگذاری در معادله:

$$x^2 * \frac{d^2y}{dx^2} + 2x * \frac{dy}{dx} - \lambda^2 * x * y = -\lambda^2 * x$$

دو طرف را بر  $x^2$  تقسیم می‌کنیم که ضریب مشتق دوم یک شود و همه پارامترها غیر از مشتق دوم را به یک طرف معادله باز می‌گردانیم:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{2}{x} * \frac{dy}{dx} + \lambda^2 * \frac{y}{x} + \frac{\lambda^2}{x}$$

برای حل این قسمت چون هردو شرایط مرزی در یک نقطه داده شده‌اند و شرط مرزی مشتق را نیز داریم از روش دستگاه معادلات استفاده می‌کنیم که این معادلات با یک تغییر متغیر ساده بدست می‌آیند:

$$\frac{dy}{dx} = p$$

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{2}{x} * p + \lambda^2 * \frac{y}{x} + \frac{\lambda^2}{x}$$

و شرایط مرزی نیز به صورت نیز هستند:

$$p = 0 \text{ @ } x = 0.1 \text{ \& } y = B \text{ @ } x = 0.1$$

(ج)

اول مشتق دوم را باز می‌کنیم:

$$\frac{d}{dx}\left(y^2 * \frac{dy}{dx}\right) = 2y * \frac{dy}{dx} + y^2 * \frac{d^2y}{dx^2}$$

جایگذاری در معادله:

$$y^2 * \frac{d^2y}{dx^2} + 2y * \frac{dy}{dx} - \lambda^2 * x * y = -\lambda^2 * x$$

دو طرف را بر  $y^2$  تقسیم می‌کنیم که ضریب مشتق دوم یک شود و همه پارامترها غیر از مشتق دوم را به یک طرف معادله باز می‌گردانیم:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{2}{y} * \frac{dy}{dx} + \lambda^2 * \frac{x}{y} + \frac{\lambda^2 * x}{y^2}$$

برای حل این قسمت چون هردو شرایط مرزی در یک نقطه داده شده‌اند و شرط مرزی مشتق را نیز داریم از روش دستگاه معادلات استفاده می‌کنیم که این معادلات با یک تغییر متغیر ساده بدست می‌آیند:

$$\frac{dy}{dx} = p$$

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{2}{y} * p + \lambda^2 * \frac{x}{y} + \frac{\lambda^2 * x}{y^2}$$

و شرایط مرزی نیز به صورت نیز هستند:

$$p = 0 \text{ @ } x = 0.1 \text{ \& } y = B \text{ @ } x = 0.1$$

د) اول مشتق اول را باز می‌کنیم و به صورت تفاضلی مینویسیم:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}\left(y^2 * \frac{dy}{dx}\right) &= 2y * \frac{dy}{dx} + y^2 * \frac{d^2y}{dx^2} \\ &= 2 * y_i * \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} + y_i^2 * \frac{y_{i+1} - 2 * y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \end{aligned}$$

با جایگذاری در معادله اصلی:

$$2 * y_i * \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} + y_i^2 * \frac{y_{i+1} - 2 * y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} - \lambda^2 * x_i * y_i = -\lambda^2 * x_i$$

با مرتب سازی به معادله زیر میرسیم:

$$2 * y_i * y_{i+1} * \Delta x - 2 * y_i^2 * \Delta x + y_i^2 * y_{i+1} - 2 * y_i^3 + y_i^2 * y_{i-1} - \lambda^2 * x_i * y_i * \Delta x^2 + \lambda^2 * x_i * \Delta x^2 = 0 = f_i$$

شرایط مرزی:

$$x = 0 \Rightarrow y_2 - y_1 = 0$$

$$x = L \Rightarrow y_n = B$$

معادلات بالا غیر خطی هستند و از روش نیوتن رافسون برای حل آنها استفاده می کنیم:

$$j_{i,i-1} = \frac{\partial f_i}{\partial y_{i-1}} = y_i^2$$

$$j_{i,i} = \frac{\partial f_i}{\partial y_i} = 2 * y_{i+1} * \Delta x - 4 * y_i * \Delta x + 2 * y_i * y_{i+1} - 6 * y_i^2 + 2 * y_i * y_{i-1} - \lambda^2 * x_i * \Delta x^2$$

$$j_{i,i+1} = \frac{\partial f_i}{\partial y_{i+1}} = 2 * y_i * \Delta x + y_i^2$$

$$b = -f_i$$

در شرایط مرزی:

$$i = 1 \Rightarrow j_{1,1} = -1, \quad j_{1,2} = 1$$

$$i = n \Rightarrow j_{n,n} = 1, \quad b = B - y_n$$

**سوال 9.** یک واکنش درجه دوم در یک راکتور لوله ای آکنده از کاتالیست انجام می گیرد. نشان دهید که معادله حاکمه تغییرات محوری غلظت عبارت است از:

$$D \frac{d^2 C}{dz^2} - u * \frac{dC}{dz} - kC^2 = 0$$

که D ضریب نفوذ جرمی، k ثابت سرعت واکنش شیمیایی و u سرعت متوسط محوری می باشد. شرایط مرزی Danckwert به شکل زیر است:

$$z = 0 \rightarrow D \frac{dC}{dz} = u(C - C_0)$$

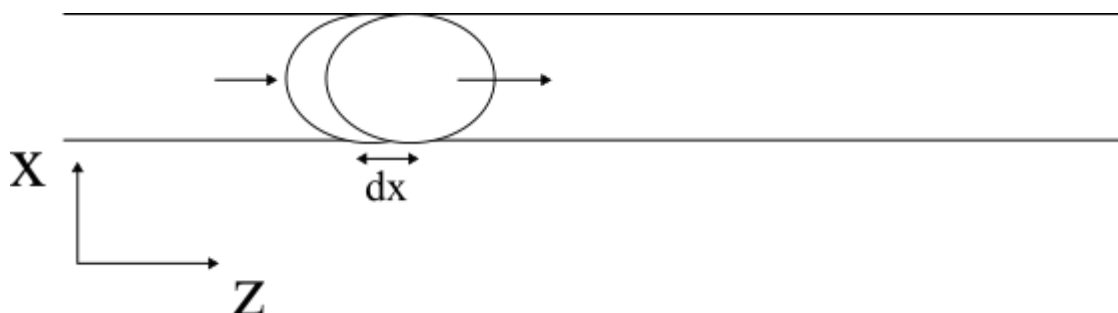
$$z = L \rightarrow \frac{dC}{dz} = 0$$

**الف)** بعد از بدست آوردن رابطه تغییرات غلظت معادله را با استفاده از روش‌های حل عددی حل و رسم کنید.

**ب)** سوال بالا را برای حالتی تکرار کنید که واکنش درجه 1 باشد.

**حل سوال 9.**

با توجه به اینکه راکتور لوله‌ای می‌باشد تغییرات غلظت در جهت محور لوله خواهد بود و المان ما به شکل دیسک خواهد شد.



(دقت کنید که به دلیل حرکت سیال جرم هم از طریق انتقال و هم از طریق نفوذ جا به جا می‌شود).

موازنه جرم:

$$A * j_z - A * j_{z+dz} + A * u * C_z - A * u * C_{z+dz} - k * C^2 * A * dz = 0$$

دقت کنید که چرا که حرفی از تغییرات در صورت سوال زده نشده از تجمع صرفنظر می‌کنیم؛ اگر دو طرف معادله را بر  $dz$  تقسیم کنیم:

$$-\frac{d}{dz}(j_z) - u * \frac{dC}{dz} - k * C^2 = 0$$

$$j_z = -D \frac{dC}{dz} \Rightarrow D \frac{d^2C}{dz^2} - u * \frac{dC}{dz} - k * C^2 = 0$$

شرایط مرزی نیز در صورت سوال داده شده است. (دقت کنید که شرط مرزی اول را می‌توان به این صورت توضیح داد که هر مقدار غلظت که به داخل راکتور نفوذ می‌کند برابر است با سرعت ورود غلظت از مخزنی که واکنش دهنده در آن به صورت اشباع وجود دارد ( $C_0$ ) و این سرعت ورود متناسب است با اختلاف غلظت در در مخزن و



ابتدای راکتور ضرب در سرعت  $(C - C_0) * u$  و شرط مرزی دوم نیز را می توان به صورت عایق بودن انتهای راکتور در نظر گرفت.

برای حل عددی اول مشتق ها را به صورت تفاضلی می نویسیم:

$$D * \frac{C_{i+1} - 2 * C_i + C_{i-1}}{\Delta z^2} - u * \frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta z} - k * C_i^2 = 0$$

$$(D - u * \Delta z) * C_{i+1} + (-2 * D + u * \Delta z) * C_i - k * \Delta z^2 * C_i^2 + D * C_{i-1} = 0 \\ = f_i$$

با توجه به اینکه در این معادله  $C_i^2$  وجود دارد معادله غیر خطی است و باید از روش نیوتن رافسون حل شود:

$$\frac{\partial f_i}{\partial C_{i-1}} = D$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial C_i} = -2 * D + u * \Delta z - 2 * k * \Delta z^2 * C_i$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial C_{i+1}} = D - u * \Delta z$$

$$b_i = -f_i$$

شرایط مرزی:

$$@z = 0 \Rightarrow D * \frac{C_2 - C_1}{\Delta z} = u * (C_1 - C_0)$$

دقت کنید که  $C_0$  یک عدد ثابت و از داده های صورت سوال است و به معنی غلظت در نقطه  $i = 0$  نیست.

$$D * C_2 - (D + u * \Delta z) * C_1 + u * \Delta z * C_0 = 0 = f_1$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial C_2} = D$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial C_1} = -(D + u * \Delta z)$$

$$b_1 = -f_1$$

شرط مرزی دوم:

$$C_n - C_{n-1} = 0$$

$$\frac{\partial f_n}{\partial C_{n-1}} = -1$$

$$\frac{\partial f_n}{\partial C_n} = 1$$

(ب) مراحل مانند قسمت قبل است با این تفاوت که دیگر نیاز به روش نیوتن رافسون نیست چون معادلات غیر

خطی نمی شوند.

$$D * \frac{C_{i+1} - 2 * C_i + C_{i-1}}{\Delta z^2} - u * \frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta z} - k * C_i^2 = 0$$

$$(D - u * \Delta z) * C_{i+1} + (-2 * D + u * \Delta z - k * \Delta z^2) * C_i + D * C_{i-1} = 0$$

شرایط مرزی:

$$D * C_2 - (D + u * \Delta z) * C_1 = -u * \Delta z * C_0$$

$$C_n - C_{n-1} = 0$$

## فصل 8

سوال 1. (مشابه مثال 5 - 1 کتاب) یک استوانه توپر و طولانی از جنس لاستیک برای انجام فرایند ولکانیزاسیون در محیط بخار آب به دمای  $T_{\infty}=300K$  در تعادل دمایی قرار دارد. تولید گرما درون این لاستیک در لحظه  $t = 0$  شروع می‌شود و مقدار آن برابر با  $q^0 \frac{W}{m^3}$  می‌باشد. معادله حاکمه و توزیع دما در شرایط زیر را حساب کنید.

(الف) ضریب انتقال حرارت رسانش برابر با  $k = 0.16 \frac{W}{m \cdot K}$  و  $q^0 = 1000 \frac{W}{m^3}$

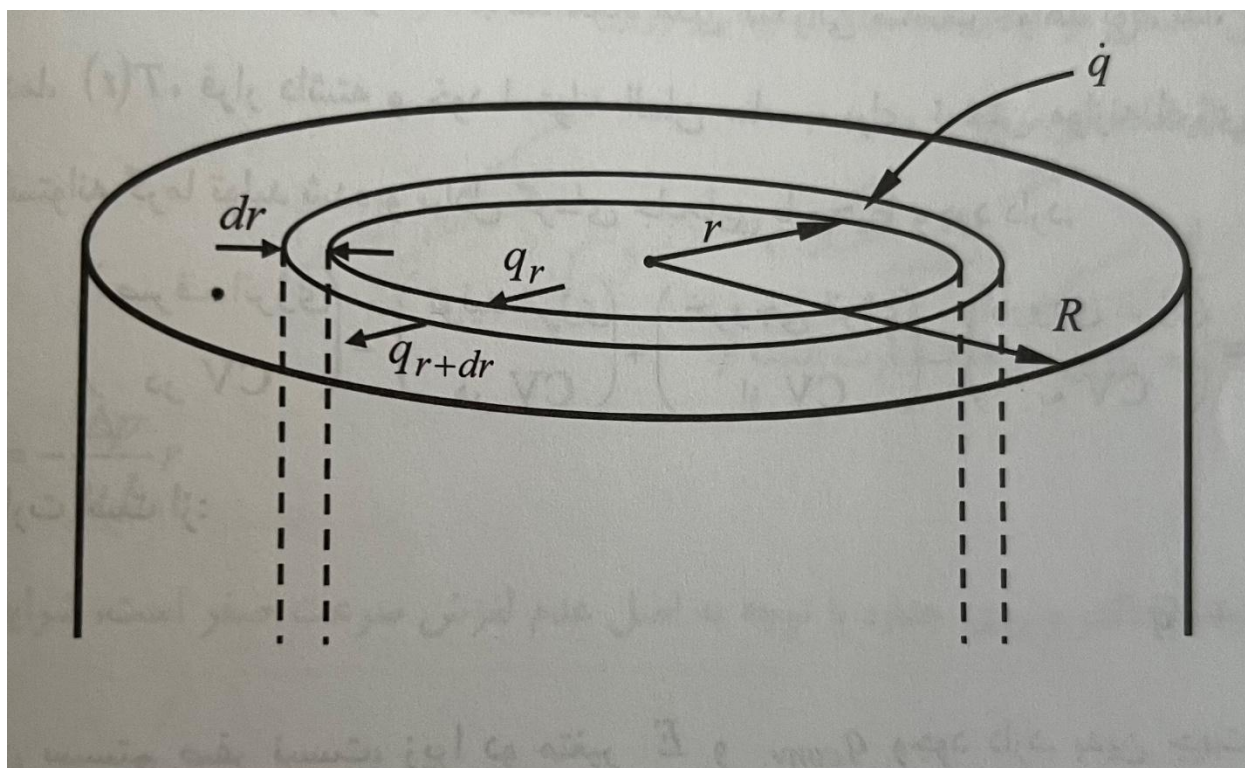
(ب) ضریب انتقال حرارت رسانش برابر با  $k = 0.16 * T \frac{W}{m \cdot K}$  و  $q^0 = 1000 \frac{W}{m^3}$

ضریب انتقال حرارت جا به جایی نیز برابر با  $85 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  شعاع استوانه نیز برابر با  $0.3m$  در نظر بگیرید.

$$\rho = 960 \frac{kg}{m^3}, Cp = 2200 \frac{j}{kg \cdot ^\circ C}$$

حل سوال 1.

(الف)



$$\frac{\partial(\rho * 2\pi r dr * L * Cp * T)}{\partial t} = 2\pi r * L * q(r) - 2\pi r * L * q(r + dr) + 2\pi r dr * L * q^0$$

$$\div (\rho * 2\pi r dr * C_p * L):$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r} * \frac{\partial}{\partial r} \left( r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q^o}{\rho * C_p}$$

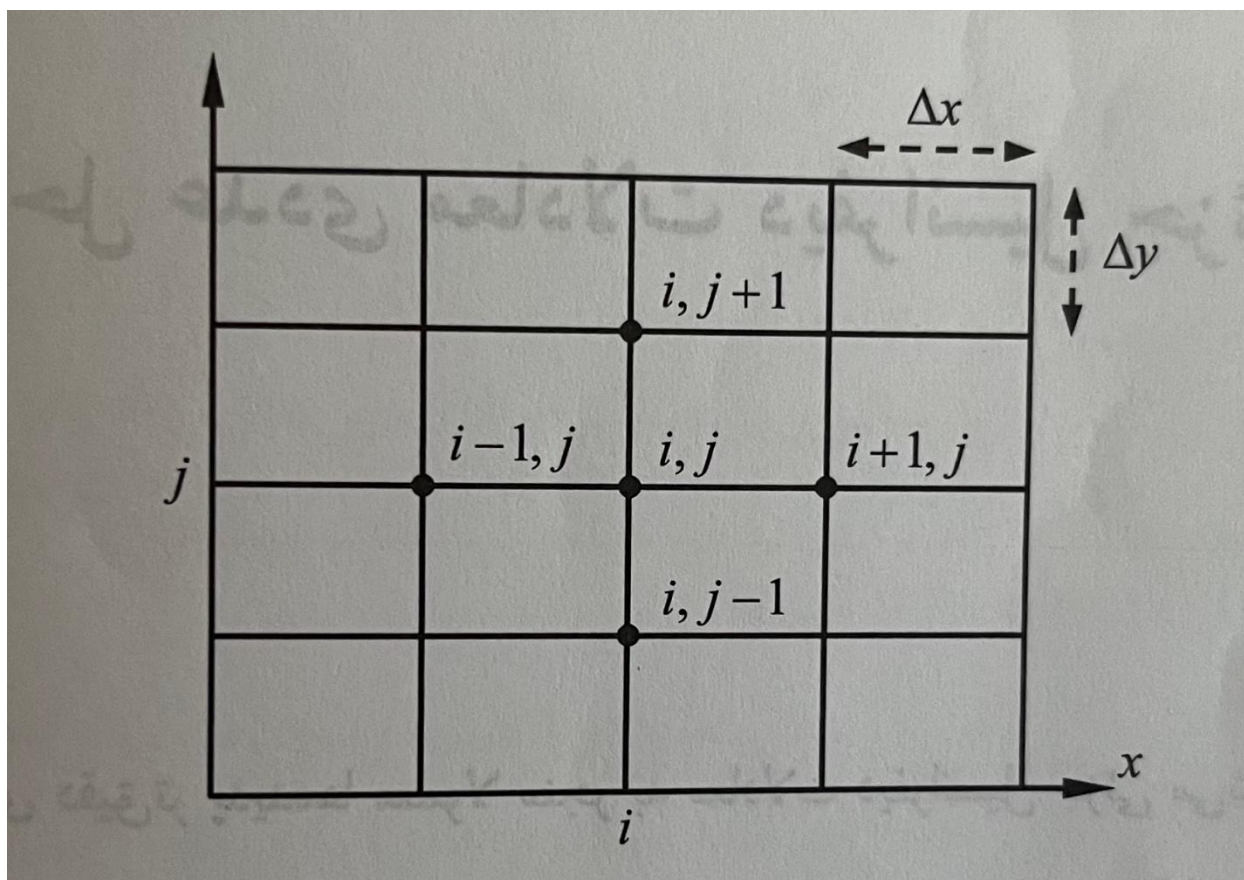
شرایط مرزی:

$$T = T_i . t = 0$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 @ r = 0 \quad \& \quad -k * \frac{dT}{dr} = h(T - T_{\infty}) @ r = R$$

تقسیم بندی فضا:

$$r(i) = (i - 1) * \Delta r$$



روش صریح:

$$\frac{\partial T}{\partial t}(i, m) = \frac{T(i, m+1) - T(i, m)}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}(i, m) = \frac{T(i+1, m) - T(i, m)}{\Delta r}$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) (i, m) = \frac{r(i+1) * \frac{\partial T}{\partial r}(i+1, m) - r(i) * \frac{\partial T}{\partial r}(i, m)}{\Delta r}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial r} \left( r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) (i, m) \\ &= \frac{r(i+1) * (T(i+1, m) - T(i, m)) - r(i) * (T(i, m) - T(i-1, m))}{\Delta r^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial r} \left( r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) (i, m) \\
&= \frac{r(i+1) * T(i+1, m) - (r(i+1) + r(i)) * T(i, m) + r(i) * T(i-1, m)}{\Delta r^2} \\
& \frac{T(i, m+1) - T(i, m)}{\Delta t} \\
&= \frac{\alpha}{r(i)} \\
& * \frac{r(i+1) * T(i+1, m) - (r(i+1) + r(i)) * T(i, m) + r(i) * T(i-1, m)}{\Delta r^2} \\
& + \frac{q^o}{\rho * Cp}
\end{aligned}$$

$$\beta = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2},$$

$$\begin{aligned}
& (T(i, m+1) - T(i, m)) \\
&= \frac{\beta}{r(i)} \left( r(i+1) * T(i+1, m) - (r(i+1) + r(i)) * T(i, m) + r(i) \right. \\
& \quad \left. * T(i-1, m) \right) + \frac{q^o}{\rho * Cp} * \Delta t
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T(i, m+1) &= \frac{\beta}{r(i)} * r(i+1) * T(i+1, m) + \left( 1 - \frac{\beta}{r(i)} * (r(i+1) + r(i)) \right) \\
& \quad * T(i, m) + \beta * T(i-1, m) + \frac{q^o}{\rho * Cp} * \Delta t
\end{aligned}$$

شرایط مرزی:

$$r = 0. \quad T(1, m+1) = T(2, m+1)$$

$$r = R. \quad -k * \frac{T(n, m+1) - T(n-1, m+1)}{\Delta r} = h * (T(n, m+1) - T_{\infty})$$

$$T(n, m+1) = \frac{1}{1 + \frac{h * \Delta r}{k}} * (T(n-1, m+1) + \frac{h * \Delta r}{k} * T_{\infty})$$

کرانک نیکلسون:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial r} \left( r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) \left( i, m + \frac{1}{2} \right) \\
&= \frac{1}{2} \left( \frac{r(i+1) * T(i+1, m) - (r(i+1) + r(i)) * T(i, m) + r(i) * T(i-1, m)}{\Delta r^2} \right. \\
&+ \left. \frac{r(i+1) * T(i+1, m+1) - (r(i+1) + r(i)) * T(i, m+1) + r(i) * T(i-1, m+1)}{\Delta r^2} \right) \\
& \frac{T(i, m+1) - T(i, m)}{\Delta t} \\
&= \frac{k}{2 * r(i) * \rho * Cp} \left( \frac{r(i+1) * T(i+1, m) - (r(i+1) + r(i)) * T(i, m) + r(i) * T(i-1, m)}{\Delta r^2} \right. \\
&+ \left. \frac{r(i+1) * T(i+1, m+1) - (r(i+1) + r(i)) * T(i, m+1) + r(i) * T(i-1, m+1)}{\Delta r^2} \right) \\
&+ \frac{q^o}{\rho * Cp}
\end{aligned}$$

$$\alpha = \frac{k * \Delta t}{2 * \rho * Cp * \Delta r^2} \cdot \beta = \frac{q^o * \Delta t}{\rho * Cp}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\alpha}{r(i)} * r(i+1) * T(i+1, m+1) + \left( 1 + \frac{\alpha}{r(i)} (r(i+1) + r(i)) \right) * T(i, m+1) \\
& - \alpha * T(i-1, m+1) \\
& = \alpha * T(i-1, m) + \left[ 1 - \frac{\alpha}{r(i)} * (r(i+1) + r(i)) \right] * T(i, m) + \frac{\alpha}{r(i)} \\
& * r(i+1) * T(i+1, m) + \beta
\end{aligned}$$

$$A(i, i-1) = -\alpha$$

$$A(i, i) = 1 + \frac{\alpha}{r(i)} (r(i+1) + r(i))$$

$$A(i, i+1) = -\frac{\alpha}{r(i)} * r(i+1)$$

$$\begin{aligned}
b(i) = & \alpha * T(i-1, m) + \left[ 1 - \frac{\alpha}{r(i)} * (r(i+1) + r(i)) \right] * T(i, m) + \frac{\alpha}{r(i)} \\
& * r(i+1) * T(i+1, m) + \beta
\end{aligned}$$



$$r = 0. \quad T(1.m + 1) - T(2.m + 1) = 0$$

$$r = R. \quad -k * \frac{T(n.m + 1) - T(n - 1.m + 1)}{\Delta r} = h * (T(n.m + 1) - T_{\infty})$$

$$\left(1 + \frac{h * \Delta r}{k}\right) * T(n.m + 1) - T(n - 1.m + 1) = + \frac{h * \Delta r}{k} * T_{\infty}$$

(ب)

ضمنی:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r * \rho * Cp} * \frac{\partial}{\partial r} \left( k * r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q^o}{\rho * Cp}$$

$$T = T_i . t = 0$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \quad @ \quad r = 0 \quad \& \quad -k * \frac{dT}{dr} = h(T - T_{\infty}) \quad @ \quad r = R$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left( k * r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) (m + 1, i) &= \frac{k_{m+1,i+1} * r_{i+1} * \frac{\partial T}{\partial r} |_{i+1} - k_{m,i} * r_i * \frac{\partial T}{\partial r} |_i}{\Delta r} \\ &= \frac{k_{m+1,i+1} * r_{i+1} * (T_{i+1} - T_i) - k_{m+1,i} * r_i * (T_i - T_{i-1})}{\Delta r^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial r} \left( k * r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) (m + 1, i) \\ &= \frac{k_0 * r_{i+1} * (T_{m+1,i+1}^2 - T_{m+1,i+1} * T_{m+1,i}) - k_0 * r_i * (T_{m+1,i}^2 - T_{m+1,i} * T_{m+1,i-1})}{\Delta r^2} \end{aligned}$$

$$\frac{T(m + 1, i) - T(m, i)}{\Delta t}$$

$$= \frac{1}{r * \rho * Cp}$$

$$* \frac{k_0 * r_{i+1} * (T_{m+1,i+1}^2 - T_{m+1,i+1} * T_{m+1,i}) - k_0 * r_i * (T_{m+1,i}^2 - T_{m+1,i} * T_{m+1,i-1})}{\Delta r^2}$$

$$+ \frac{q^o}{\rho * Cp}$$

$$\alpha = \frac{k0 * \Delta t}{\rho * Cp * \Delta r^2} \cdot \beta = \frac{q^o * \Delta t}{\rho * Cp}$$

$$T_{m+1,i} - T_{m,i} - \frac{\alpha}{r(i)} \\ * \left( r_{i+1} * (T_{m+1,i+1}^2 - T_{m+1,i+1} * T_{m+1,i}) - r_i \right. \\ \left. * (T_{m+1,i}^2 - T_{m+1,i} * T_{m+1,i-1}) \right) - \beta = 0 = fi$$

$$j(i.i + 1) = \frac{\partial fi}{\partial T_{m+1,i+1}} = -\frac{\alpha}{r(i)} (r_{i+1} * (2 * T_{m+1,i+1} - T_{m+1,i}))$$

$$j(i.i) = \frac{\partial fi}{\partial T_{m+1,i}} = 1 - \frac{\alpha}{r_i} \left( -r_{i+1} * T_{m+1,i+1} - r_i * (2 * T_{m+1,i} - T_{m+1,i-1}) \right) \\ = 1 + \frac{\alpha}{r_i} \left( r_{i+1} * T_{m+1,i+1} + r_i * (2 * T_{m+1,i} - T_{m+1,i-1}) \right)$$

$$j(i.i - 1) = -\frac{\alpha}{r_i} \left( -r_i * (-T_{m+1,i}) \right) = -\alpha * T_{m+1,i}$$

$$b(i) = -fi$$

$$r = 0. \quad T(2.m + 1) - T(1.m + 1) = 0 = f1$$

$$\frac{\partial f1}{\partial T2} = 1. \frac{\partial f1}{\partial T1} = -1$$

$$r = R. \quad -k0 * T_{m+1,n} * \frac{T_{m+1,n} - T_{m+1,n-1}}{\Delta r} = h * (T_{m+1,n} - T^\infty)$$

$$-k0 * T_{m+1,n}^2 + k0 * T_{m+1,n} * T_{m+1,n-1} - h * \Delta r * T_{m+1,n} + h * \Delta r * T^\infty = 0 \\ = fn$$

$$\frac{\partial fn}{\partial Tn} = -k0 * 2 * T_{m+1,n} + k0 * T_{m+1,n-1} - h * \Delta r$$

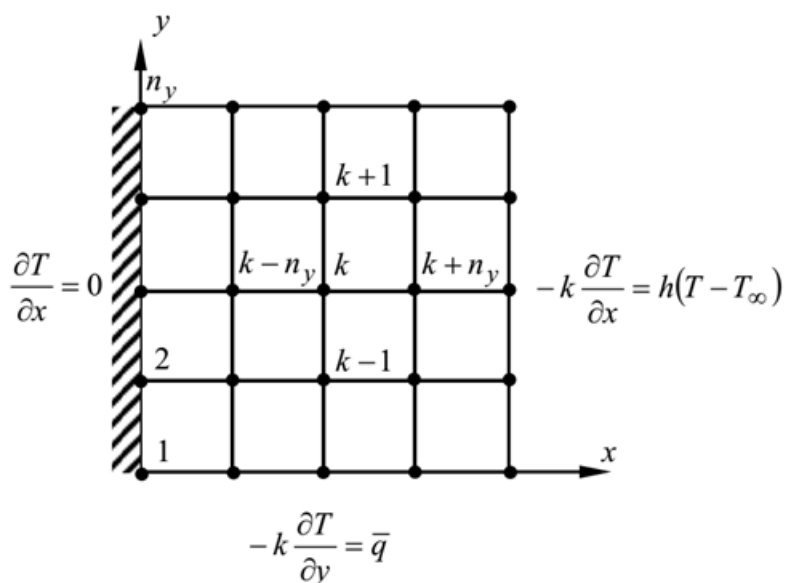
$$\frac{\partial fn}{\partial Tn - 1} = k0 * T_{m+1,n}$$

$$b(n) = -fn$$

سوال 2. در یک مکعب مستطیل که مقطع آن مربعی به ضلع  $0.1\text{m}$  است و در یک بعد بسیار طولانی است، تولید گرما برابر با  $q \text{ w/m}^3$  وجود دارد. هدایت پذیری این جسم برابر با  $k = 15 \text{ w/m}^2\text{K}$  می باشد. دمای ضلع بالا طبق رابطه زیر تغییر می کند؛ ضلع سمت چپ عایق، از ضلع پایین تشعشع گرما با شدت  $q = 900 \text{ w/m}^2$  و از ضلع راست با محیطی به دمای  $T = 25^\circ\text{C}$  و ضریب انتقال گرمای جابجایی  $h = 30 \text{ w/m}^2\text{K}$  تبادل گرما دارد. توزیع دمای پایدار در مقطع جسم را در حالتی که شدت تولید گرما برابر با  $10,000 \text{ w/m}^3$  باشد را بدست آورید.

$$\text{دما در ضلع بالا: } T = T_0 * \left(1 + \frac{\sin \frac{\pi * x}{L}}{4}\right) \text{ و } T_0 = 100^\circ\text{C}$$

حل سوال 2.



$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad @ \quad x = 0$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_{\infty}) \quad @ \quad x = L$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \bar{q} \quad @ \quad y = 0$$

$$T = T_0 * \left(1 + \frac{\sin \frac{\pi * x}{L}}{4}\right) @ y = L$$

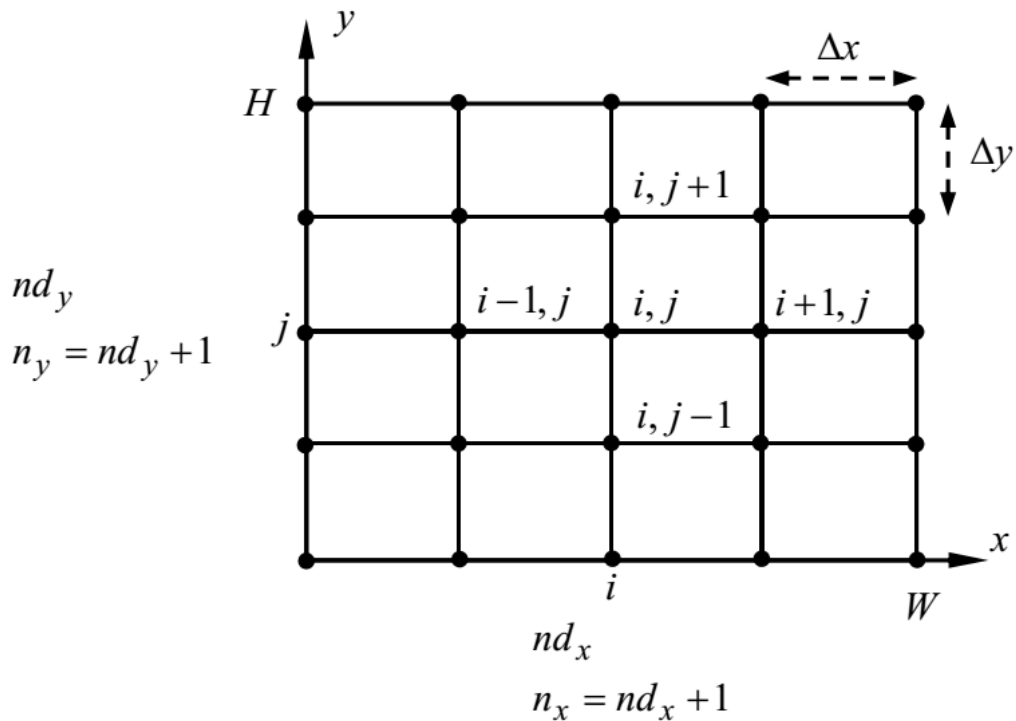
با جایگذاری روابط زیر:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{T_{k+ny} - T_k}{\Delta x} \right) = \frac{T_{k+ny} - 2 * T_k + T_{k-ny}}{\Delta x^2}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{T_{k+1} - T_k}{\Delta y} \right) = \frac{T_{k+1} - 2 * T_k + T_{k-1}}{\Delta y^2}$$

با جایگذاری عبارت‌های بالا در معادله نهایی و همچنین در نظر گرفتن فرض  $\Delta x = \Delta y$  به عبارت زیر میرسیم:

$$T_{k+n_y, j} + T_{k-n_y} + T_{k+1} + T_{k-1} - 4T_k + \frac{\dot{q}}{k} \Delta x^2 = 0$$



با توجه به شکل بالا می‌توان متغیرها را به صورت زیر نوشت:

$$T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 4T_{i,j} + \frac{\dot{q}}{k} \Delta x^2 = 0$$

شرایط مرزی:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{T_{k+ny} - T_k}{\Delta x} = 0 @ x = 0$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_k - T_\infty), \quad -k \frac{T_k - T_{k-ny}}{\Delta x} = h(T_k - T_\infty), \quad \left(1 + \frac{h\Delta x}{k}\right) * T_k - T_{k-ny} = \frac{h\Delta x}{k} * T_\infty$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \bar{q}, \quad -k \frac{T_{k+1} - T_k}{\Delta y} = \bar{q}, \quad T_{k+1} - T_k = -\bar{q}\Delta x/k$$

روی دیواره بالایی نیز مختصات نقاط  $x$  نیز مهم است (به دلیل وجود  $x$  در عبارت) برای همین در این نقاط شرط مرزی را به صورت زیر مینویسیم:

$$T_k = T_0 * \left( 1 + \frac{\sin \frac{\pi * x_k}{L}}{4} \right)$$

که نقاط  $x_k$  نقاطی هستند که روی ضلع بالایی قرار دارند و با توجه به اینکه شماره این نقاط به صورت زیر می‌باشد:

$$k = ny : ny : n$$

می‌توانیم رابطه  $x_k$  را به صورت زیر بنویسیم:

$$x_k = \frac{k - ny}{ny} * dx$$

که این عبارت باید در فرمول بالا قرار داده شود. (کد را ببینید)

**سوال 3.** برای تولید غشاء پلیمری، محلول بسیار غلیظ پلیمر تهیه و یک فیلم بزرگ روی سطح شیشه کشیده می‌شود. فرض می‌شود که ضخامت فیلم پلیمری تغییر نمی‌کند. اگر غلظت حلال بعد از کشیده شدن فیلم روی سطح شیشه یکنواخت و برابر با  $C_0$  باشد،

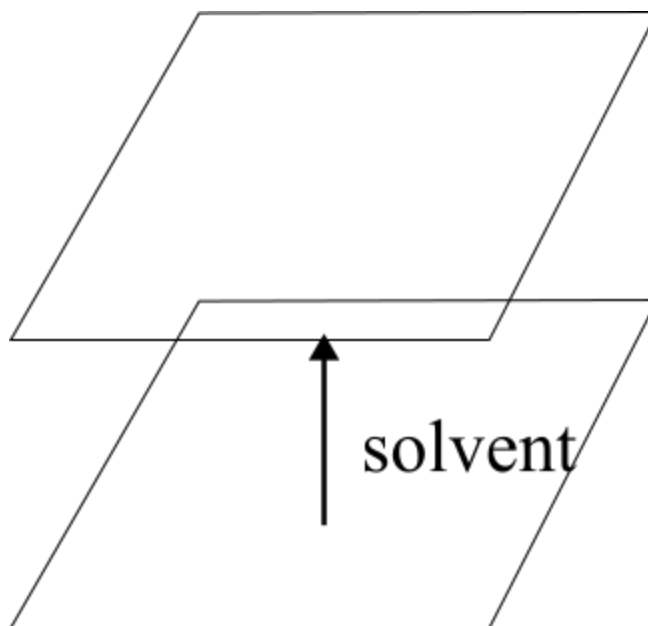
**الف)** معادله حاکمه حلال در پلیمر را با فرض اینکه حلال فقط از سطح بالایی فیلم تبخیر می‌شود را بدست آورید

**ب)** با روش تفاضل‌های محدود معادله تفاضلی مربوطه را بدست آورید و آن را حل و جواب را رسم کنید.

لطفا فرض کنید که تبخیر حلال به صورت پایدار صورت می‌گیرد.

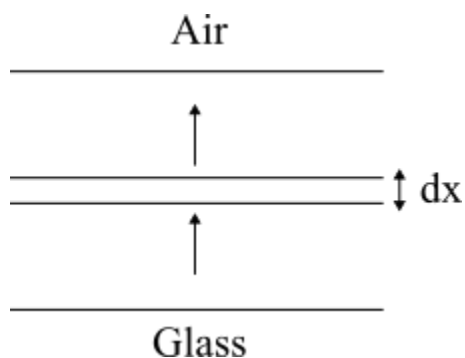
**حل سوال 3.**

**الف)** با توجه به اینکه حلال از سطح پلیمر تبخیر می‌شود و فیلم بسیار بزرگ با ضخامت کم در نظر گرفته شده؛ انتقال جرم را تک بعدی و از سطح شیشه به سمت سطح در تماس با هوا در نظر می‌گیریم:



شمای کلی حرکت حلال

اگر انتقال را فقط در جهت X در نظر بگیریم:



موازنه جرم برای سیال رو می نویسیم:

$$A * j_x - A * j_{x+dx} = A * dx \frac{\partial C}{\partial t}$$

دو طرف معادله را بر  $A * dx$  تقسیم کنیم:

$$j_x = -D \frac{\partial C}{\partial x} \Rightarrow D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \Rightarrow D \frac{C_{m+1,i+1} - 2 * C_{m+1,i} + C_{m+1,i-1}}{\Delta x} = \frac{C_{m+1,i} - C_{m,i}}{\Delta t}$$

(چون به روش خاصی اشاره نشده از روش ضمنی معادلات نوشته شدند چون پایداری بهتری دارند)، بازنویسی:

$$\alpha = \frac{D * \Delta t}{\Delta x}$$

$$A(i, i + 1) = \alpha$$

$$A(i, i) = -2 * \alpha - 1$$

$$A(i, i - 1) = \alpha$$

$$B(i) = -C_{m,i}$$

شرایط مرزی:

طبق صورت سوال سطح شیشه را عایق در نظر گرفته و از نفوذ حلال به آن سطح صرفنظر می کنیم:

$$@x = 0 \Rightarrow \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \Rightarrow C_{m+1,2} - C_{m+1,1} = 0$$

$$A(1,2) = 1, \quad A(1,1) = -1, B(1) = 0$$

$$@x = L \Rightarrow D * \frac{\partial C}{\partial x} = h * (C - C_{air})$$

که در آن می توان  $C_{air}$  را غلظت حلال در هوا در نظر گرفت ؛ در نتیجه:

$$D * \frac{C_{m+1,n} - C_{m+1,n-1}}{\Delta x} = h * (C_{m+1,n} - C_{air})$$

$$(D - h * \Delta x) * C_{m+1,n} - D * C_{m+1,n-1} = -h * C_{air} * \Delta x$$

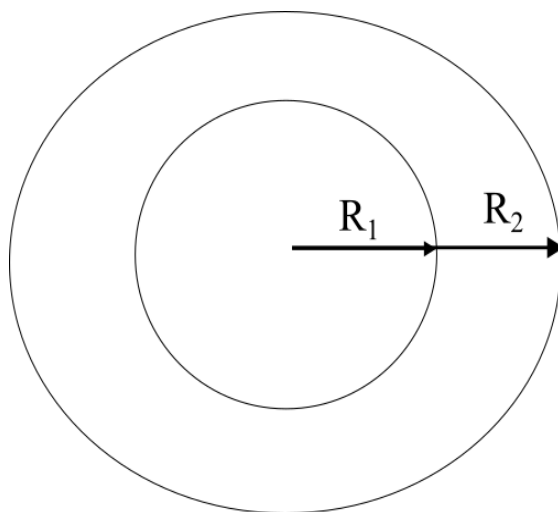
$$A(n, n) = (D - h * \Delta x), \quad A(n, n - 1) = -D, B(n) = -h * C_{air} * \Delta x$$

**سوال 4.** دو لوله متداخل با طول بسیار زیاد هم محور (annulus) هستند. شعاع بیرونی لوله کوچک تر R1 و شعاع درونی لوله بزرگ تر R2 می باشد. یک سیال نیوتنی با ویسکوزیته  $\eta$ ، در حال سکون قرار دارد. در یک لحظه لوله داخلی با سرعت ثابت V به سمت راست شروع به کشیدن می کنیم. **الف)** با صرفنظر از تغییرات سرعت در جهت کشش (نظیر کاملاً توسعه یافته)، معادله حاکمه گذاری سرعت سیال و شرایط مرزی آن را بدست آورید. **ب)** توزیع گذرای سرعت را با روش های عددی بدست آورده و رسم کنید.



#### حل سوال 4.

**الف)** اگر شکل صورت سوال را رسم کنید به شکل زیر می‌رسید:



(دقت کنید که برای سادگی سطح داخلی لوله کوچک‌تر و سطح بیرونی لوله بزرگ‌تر از نمایش آن‌ها صرف‌نظر شده است).

با توجه به اینکه لوله داخلی را می‌کشیم سرعت سیال در جهت Z خواهد بود (با فرض مختصات استوانه‌ای) و تغییرات آن در جهت r و همچنین با زمان خواهد بود (در واقعیت تغییرات در جهت Z هم خواهیم داشت که طبق صورت سوال از آن صرف‌نظر می‌کنیم).

طبق معادله الف-16 آخر کتاب:

$$\rho * \frac{\partial V_z}{\partial t} = -\frac{1}{r} * \frac{\partial}{\partial r} (r * \tau_{rz})$$

با جایگذاری  $\tau_{rz}$  طبق روابط الف-17:

$$\tau_{rz} = -\mu * \frac{\partial V_z}{\partial r} \Rightarrow \rho * \frac{\partial V_z}{\partial t} = \frac{\mu}{r} * \frac{\partial}{\partial r} \left( r * \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) = \frac{\mu}{r} * \left[ \frac{\partial V_z}{\partial r} + r * \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} \right]$$

با شرایط مرزی:

$$t = 0 \Rightarrow V_z = 0$$

$$r = R_1 \Rightarrow V_z = V$$

$$r = R_2 \Rightarrow V_z = 0$$

با تبدیل معادله اصلی و شرایط مرزی به معادلات تفاضلی:

$$\rho * \frac{V_{i,m+1} - V_{i,m}}{\Delta t} = \frac{\mu}{r_i} * \left[ \frac{V_{i+1,m} - V_{i,m}}{\Delta r} + r_i * \frac{V_{i+1,m} - 2 * V_{i,m} + V_{i-1,m}}{\Delta r^2} \right]$$

$$\alpha = \frac{\rho * \Delta r^2}{\mu * \Delta t}$$

$$\alpha * (V_{i,m+1} - V_{i,m}) = \frac{1}{r_i} * [\Delta r * (V_{i+1,m} - V_{i,m}) + r_i * (V_{i+1,m} - 2 * V_{i,m} + V_{i-1,m})]$$

$$V_{i,m+1} = V_{i,m} + \frac{1}{\alpha * r_i} * [\Delta r * (V_{i+1,m} - V_{i,m}) + r_i * (V_{i+1,m} - 2 * V_{i,m} + V_{i-1,m})]$$

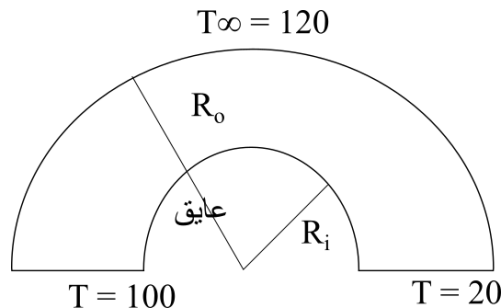
$$r = R_1 \Rightarrow V_{1,m+1} = V$$

$$r = R_2 \Rightarrow V_{n,m+1} = 0$$

حل مسئله بالا با روش ضمنی خیلی سخت می شود چرا که شرط مرزی اولیه برای تمام نقاط 0 می باشد این باعث می شود ماتریس **b** (که ماتریس اعداد ثابت بود) تقریباً همه اعضای آن 0 شوند که در نهایت باعث می شود محاسبه عبارت  $\text{inv}(A) * b$  بسیار سخت و وقت گیر شود و در چنین حالتی استفاده از روش صریح آسان تر خواهد بود. (اما برای تمرین پیشنهاد می شود حل این سوال را با روش ضمنی امتحان کنید).

**سوال 5.** توزیع دمای پایدار در یک لوله ی پلی اتیلنی با سطح مقطع مطابق شکل زیر ( $R_o = 0.35$  و  $R_i = 0.05$ ) را بدست آورید. تغییرات دما در طول لوله را در مقابل تغییرات در سطح مقطع نادیده بگیرید. شرایط مرزی مطابق شکل زیر می باشد، در سطح بالا انتقال حرارت جا به جایی با محیطی به دمای  $120^\circ\text{C}$  و  $h = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$  انجام می گیرد. نیم دایره پایین عایق بوده و دو سطح دیگر مطابق شکل در دماهای  $20^\circ\text{C}$  و  $100^\circ\text{C}$  قرار دارد. ضریب انتقال حرارت هدایتی  $0.34 \text{ W/m K}$  می باشد.

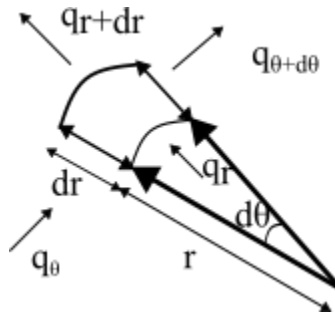
$$r_i = r_{\text{fix}(\frac{k}{n\theta})+1}$$



### حل سوال 5.

با توجه به اینکه شکل نسبت به محور تتا تقارن کامل ندارد انتقال حرارت هم در جهت  $r$  و هم در جهت  $\theta$  انجام می گیرد.

برای سوالات این چینی پیشنهاد می شود از معادلات آخر کتاب استفاده کنید (و المان را بکشید) اما در این راه حل برای کامل بودن راه حل المان گیری به صورت دستی انجام خواهد شد.



با توجه به المان بالا اگر طول لوله را  $L$  بگیریم:

$$L * dr * q_{\theta} - L * dr * q_{\theta+d\theta} + L * r * d\theta * q_r - L * r * d\theta * q_{r+dr} = 0$$

یادآوری: طول کمان = شعاع \* زاویه

با تقسیم دو طرف معادله بر  $L * d\theta * dr$  به معادله زیر میرسیم:

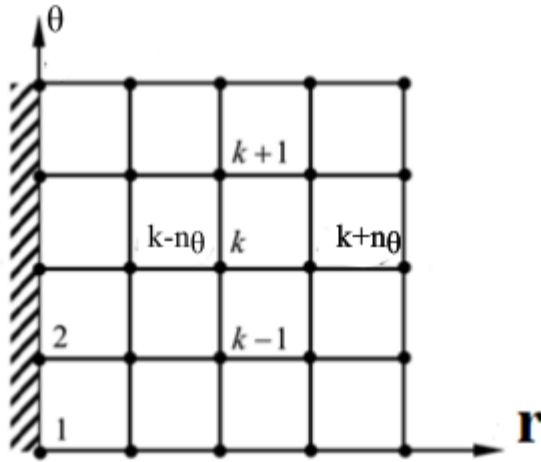
$$-\frac{\partial}{\partial \theta}(q_{\theta}) - \frac{\partial}{\partial r}(r * q_r) = 0$$

اگر معادله الف-27 آخر کتاب را نیز ساده کنید به همین جواب می رسید.

با جایگذاری مقایر  $q$  به معادله زیر خواهید رسید:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( k * \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( k * r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial T}{\partial r} + r * \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0$$

برای تفاضلی نوشتن متغیرها از شکل زیر استفاده می کنیم:



با توجه به شکل بالا معادله به صورت زیر در می آید:

$$\frac{T_{k+1} - 2 * T_k + T_{k-1}}{\Delta\theta^2} + \frac{T_{k+n\theta} - T_{k-n\theta}}{2 * \Delta r} + r_k * \frac{T_{k+n\theta} - 2 * T_k + T_{k-n\theta}}{\Delta r^2} = 0$$

معادله نهایی:

$$\left(\frac{r_k}{\Delta r^2} + \frac{1}{2\Delta r}\right) * T_{k+n\theta} + \left(\frac{-2}{\Delta\theta^2} - 2 * \frac{r_k}{\Delta r^2}\right) * T_k + \left(\frac{1}{\Delta\theta^2}\right) * T_{k-1} + \left(-\frac{1}{2\Delta r} + \frac{r_k}{\Delta r^2}\right) * T_{k-n\theta} + \left(\frac{1}{\Delta\theta^2}\right) * T_{k+1} = 0$$

شرایط مرزی:

$$@ r = R_i \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \Rightarrow T_{k+n\theta} - T_k = 0$$

$$@ r = R_o \Rightarrow -k * \frac{\partial T}{\partial r} = h * (T - T_\infty) \Rightarrow$$

$$-k * \frac{T_k - T_{k-n\theta}}{\Delta r} = h * (T_k - T_\infty) \Rightarrow \left(\frac{k}{\Delta r}\right) * T_{k-n\theta} + \left(-\frac{k}{\Delta r} - h\right) * T_k = -h * T_\infty$$

$$@ \theta = 0 \Rightarrow T_k = 100 \quad @ \theta = \pi \Rightarrow T_k = 20$$