

# عملیات واحد ۲

علی آراسته نوده



# DRYING

• (فصل ۱۲ تریبال)

## خشك کردن



تعاریف

خشك كن ها

الگوهاي دما در خشك كنها

شدت خشك کردن در سیستم نا پیوسته

بررسی نمودار شدت خشك کردن

بررسی آهنگ شدت خشك شدن

زمان خشك شدن

حل يك مسئله

خشك کردن یا جریان سراسري

خشك كنها با جریان معكوس

حل يك مسئله

## خشك كردن :

- خارج سازي رطوبت از جامدات و مايعات توسط تبخير با جريان گاز
- خشك كردن يك واژه نسبي است و صرفاً به اين معني است كه محتوي مايع از مقدار اوليه تا مقدار نهايي قابل قبولي کاهش يافته است .
- در عمل رطوبت شامل آب و گاز شامل هوا ميباشد .
- رطوبت بر مبناي مرطوب : رطوبت موجود در واحد جرم جامد مرطوب (X)
- رطوبت بر مبناي خشك : رطوبت موجود در واحد جرم جامد خشك (X)
- تعادل : رطوبت موجود در يك جامد مرطوب فشار بخاري اعمال مي كند كه به طبيعت رطوبت ؛ طبيعت جسم جامد بستگي دارد . بنا بر اين اگر يك جامد مرطوب در معرض جريان گاز با فشار جزئي  $P$  قرار بگيرد جسم جامد تا جايي رطوبت مبادله مي كند كه فشار بخار رطوبت جسم به  $P$  برسد ؛ بعد از آن گاز و جامد در حال تعادل خواهند بود ؛ به مقدار رطوبت جسم در آن حالت **رطوبت تعادلي** در شرايط حاكم گفته ميشود .
- رطوبت تعادلي : مقدار رطوبت يك ماده وقتي كه فشار بخار آن با فشار جزئي بخار در حال تعادل است .

## تعاریف:

رطوبت پیوندی: رطوبت موجود در جسم است وقتی که دارای فشار بخار تعادلی کمتر از مایع خالص در همان درجه حرارت است.

رطوبت غیر پیوندی: رطوبت موجود در جسم است وقتی فشار بخار تعادلی آن برابر با فشار بخار مایع خالص در همان درجه حرارت است.

رطوبت آزاد: مقدار رطوبت مازاد بر رطوبت تعادلی یک جسم است.

نکته: فقط رطوبت آزاد می تواند تبخیر شود.

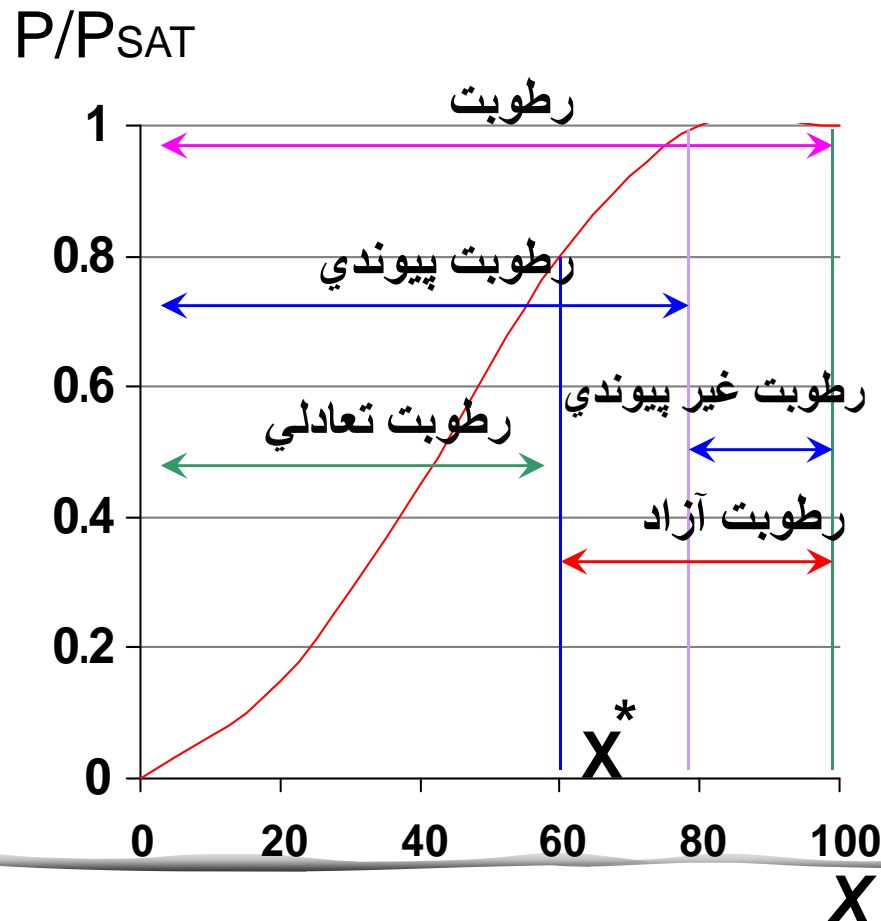
رطوبت پیوندی شامل موارد زیر است:

رطوبت مربوط به ساختمان داخلی جسم

رطوبت آزاد شده در اثر ترکیب شیمیایی

رطوبت بصورت مایعی از اجزا حل شدنی جامد

رطوبت باقی مانده در حفره ها و مجراهای کوچک و یا هر رطوبتی غیر از آنچه جذب سطحی شده باشد.



# خشك كن ها :

## دسته بندي خشك كن ها به لحاظ نحوه تماس :

- ۱) خشك كنهائي كه در آنها جامد مستقيما در معرض گاز داغ قرار ميگيرد. (خشك كنهائي مستقيم يا آدياباتيك )
- ۲) خشك كنهائي كه در آنها گرما از يك محيط خارجي مانند بخار آب در حال چگالش به جامد منتقل ميشود . ( خشك كنهائي غير مستقيم ) .
- ۳) خشك كنهائي كه با انرژي الكتريكي ؛ تشعشعي ويا مايكروويو گرم ميشوند .

## دسته بندي خشك كنها به لحاظ ساختاري :

- ۱) خشك كن ناپيوسته : جامد ويا محيط گرمایش بدون حرکت هستند .
- ۲) خشك كن پيوسته : جامد ويا محيط گرمایش بصورت مخالف ويا همجهت در حال حرکتند .

## الگوهاي دما در خشك كنها :

- در يك خشك كن ناپيوسته با محيط گرمائي و دمائي ثابت ؛ دمائي جامدات از مقدار اوليه  $T_{sa}$  تا دمائي تبخير اوليه  $T_v$  بطور سريع افزايش مي يابد و سپس ثابت مي ماند و پس از خشك شدن تا دمائي خروجي  $T_{sb}$  افزايش مي يابد . در خشك كن آدياباتيك  $T_v$  دمائي تر گاز و در خشك كن غير آدياباتيك نقطه جوش مايع در فشار خشك كن است
- در يك خشك كن پيوسته دمائي تبخير ممكن است فرق كند ولي دمائي حباب خيس ثابت مي ماند .

## الگوهای دما در خشک کن

گرما صرف مراحل زیر میشود :

۱) گرمایش خوراک تا دمای تبخیر  $T_v$  یعنی  $(Cps + XaCpl)(T_v - T_{sa})$

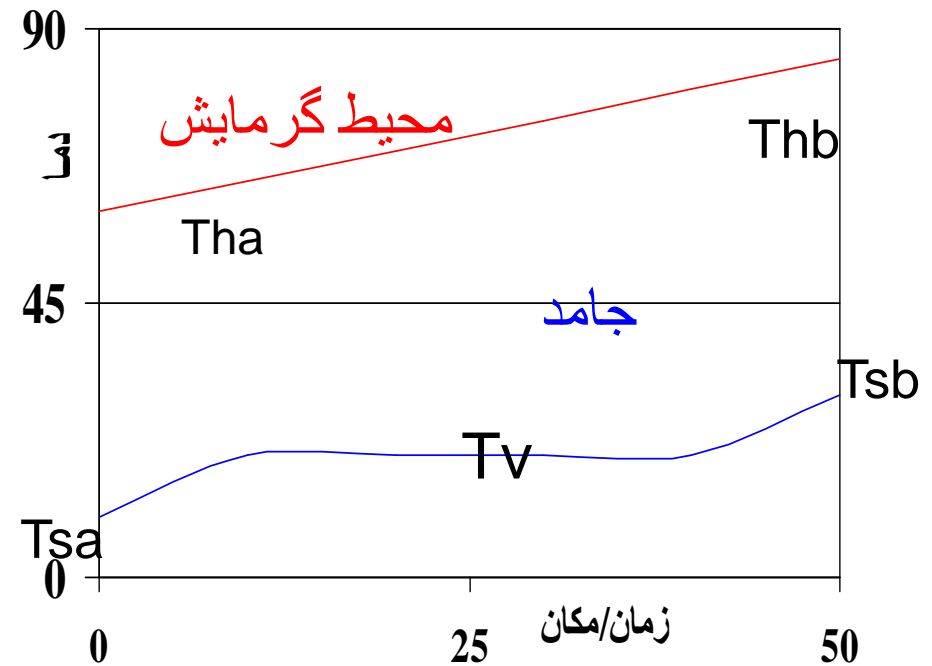
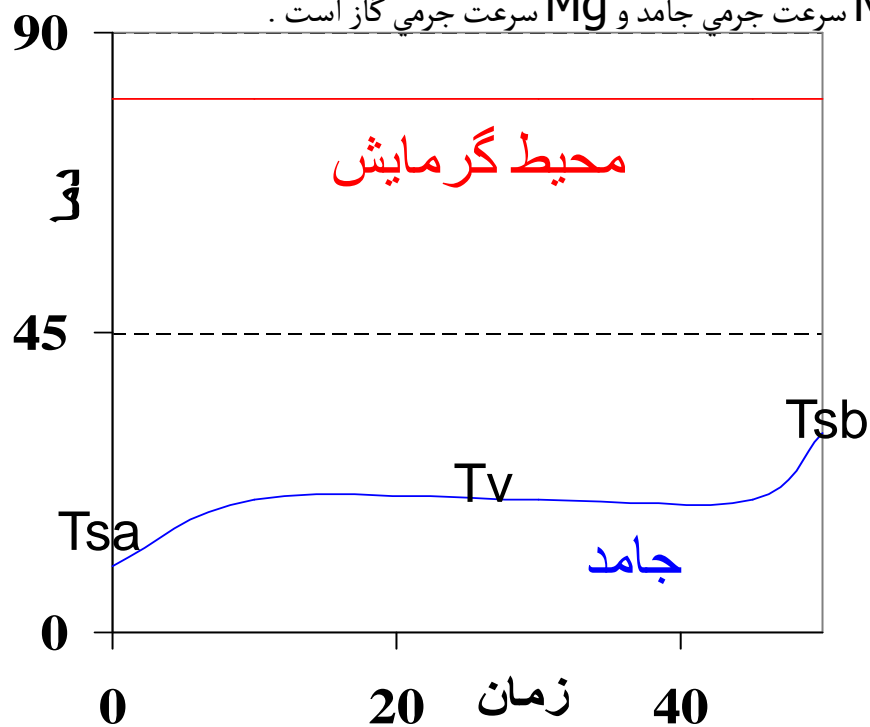
۲) تبخیر مایع در  $T_v$  یعنی  $\lambda(Xa - Xb)$

۳) گرمایش جامد و مایع همراه تا دمای نهایی  $(T_{sb})$  یعنی  $(Cps + XaCpl) * (T_{sb} - T_v)$

۴) گرمایش بخار تا دمای نهایی  $(T_{va})$  یعنی  $(Xa - Xb) * Cpv(T_{va} - T_v)$

در یک خشک کن گرمای داده شده به مواد از سرمایش گاز ناشی میشود :

$Ms * (1 + 2 + 3 + 4) = MgCs(T_{hb} - T_{ha})$  که در آن  $Ms$  سرعت جرمی جامد و  $Mg$  سرعت جرمی گاز است .



## شدت خشك کردن در سیستم ناپیوسته :

شدت خشك کردن برای يك نمونه از ماده را میتوان با آویزان کردن آن در يك محفظه ؛ تحت جریانی از هوا بدست آورد . در این روش وزن نمونه را بر حسب تابعی از زمان اندازه میگیرند .

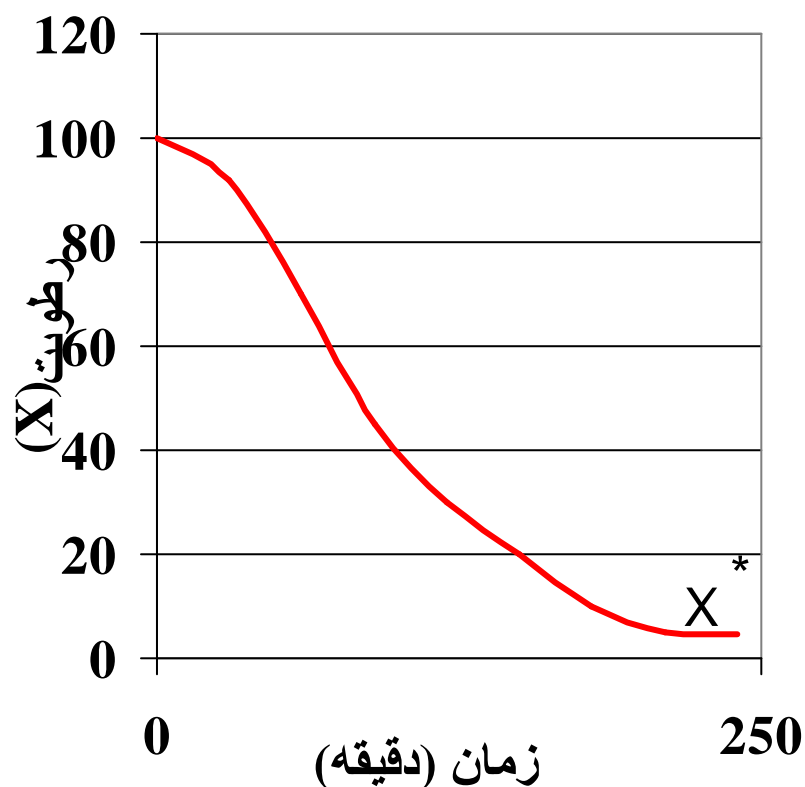
نتایج بصورت تابعی از شدت خشك کردن با مولفه  $N$  بیان میشود .

این مولفه با اندازه گیری شیب خطوط تماس بر منحنی و ضرب آن در وزن واحد سطح تماس بدست می آید .

$$N = -SSD \frac{X}{A \Delta t}$$

$SS$  جرم جامد خشك

$A$  سطح مقطع عمود بر جریان

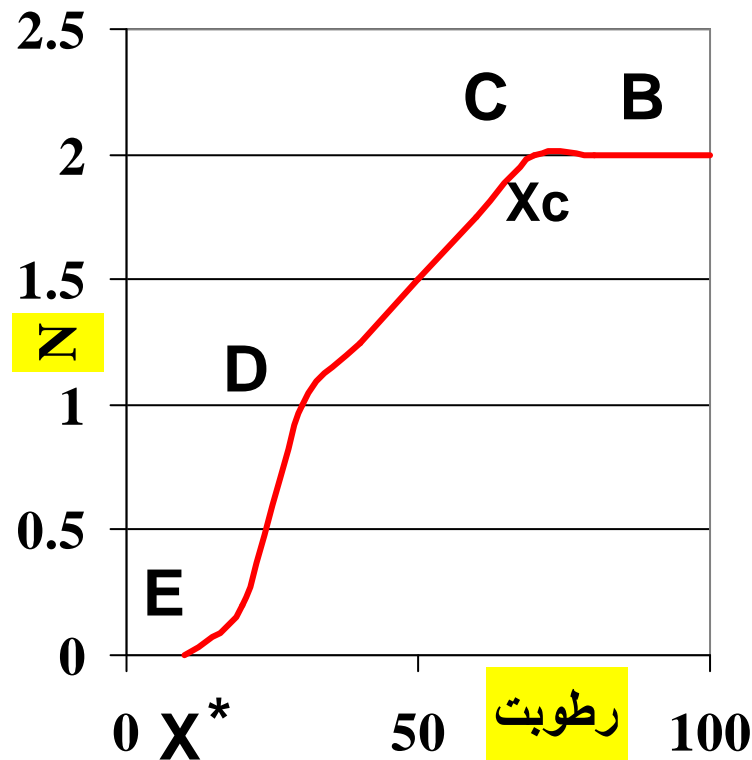


## بررسی نمودار شدت خشک کردن:

معمولا دو قسمت اصلی در منحنی آهنگ خشک کردن وجود دارد. یک محدوده شدت ثابت و یک محدوده شدت نزولی.

اگر جامد در ابتدا خیلی مرطوب باشد؛ سطح آن از فیلم نازکی از مایع پوشیده میشود که به آن رطوبت غیر پیوندی گفته میشود. هنگام خشک شدن این لایه دوره آهنگ ثابت واقعی برقرار است.

آهنگ تبخیر در این حالت مانند آهنگ تبخیر در استخر مایع است در این سطح برابر با دمای تر جریان گاز میباشد.





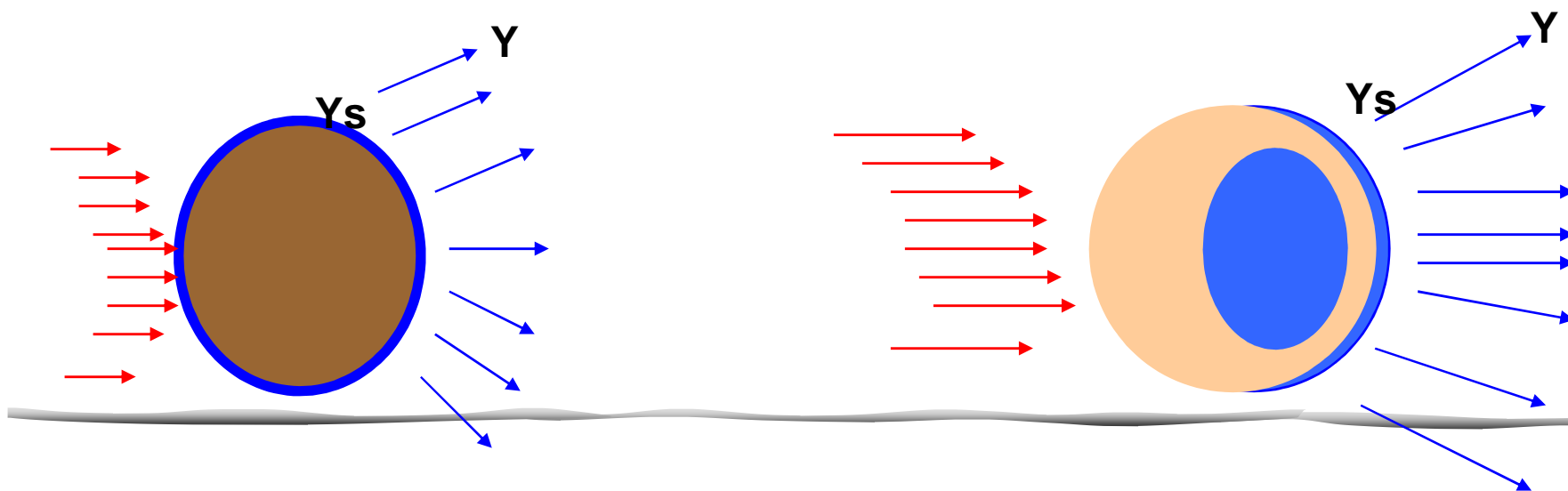
# بررسی آهنگ شدت خشک شدن ثابت

در ضمن خشک شدن اگر آب توسط مکانیزمی با سرعت کافی از داخل خارج شود تا تمام سطح را خیس نگهدارد میتوان دوره آهنگ ثابت داشت .

شدت تبخیر رطوبت را میتوان بر حسب ضریب انتقال جرم گاز  $Ky$  و اختلاف رطوبت گاز در سطح مایع  $Ys$  و در جریان گاز  $Y$  بیان نمود .

$$Nc = Ky(Ys - Y)$$

وقتی که رطوبت متوسط جامد به مقدار رطوبت بحرانی  $Xc$  رسید . خشک کردن بیشتر ایجاد لکه های خشک مینماید . وجود لکه ها و کاهش سطح باعث سیر نزولی  $N$  میگردد در حالیکه میزان تبخیر ممکن است ثابت باشد .



## زمان خشك کردن :

$$N = - S_s \cdot dX / A \cdot dt.$$

$$T = S_s/A \int_{X_2}^{X_1} dx/N$$

در محدوده شدت ثابت داریم  $N=N_c$  در نتیجه  $t = S_s(x_1 - x_2) / (A \cdot N_c)$

در محدوده شدت نزولي براي هر حالت از منحنی شدت نزولي باید از معادله اصلي بصورت ترسیمی انتگرال گرفت . به این منظور باید منحنی  $1/N$  روی محور عمودي برحسب  $X$  رسم گردد و سطح زیر منحنی را محاسبه نمود و آنرا در کسر  $S_s/A$  ضرب نمود .

در حالت ویژه اگر  $N$  برحسب  $X$  یک خط مستقیم باشد (نظیر BC) در اینحالت  $N = mX + b$  که در آن  $m$  ضریب زاویه خط و  $b$  عدد ثابت میباشد .

با جایگزینی در معادله اصلي خواهیم داشت :

$$T = S_s/mA (\ln(mX_1 + b) / (mX_2 + b))$$

$$N1 = mX1 + b$$

$$N2 = mX2 + b$$

$$M = (N1 - N2) / (X1 - X2)$$

$$T = [Ss(X1 - X2) / A(N1 - N2)] \ln(N1 / N2)$$

در صورتیکه فاصله **C** تا **E** را بتوان خط راست فرض نمود:

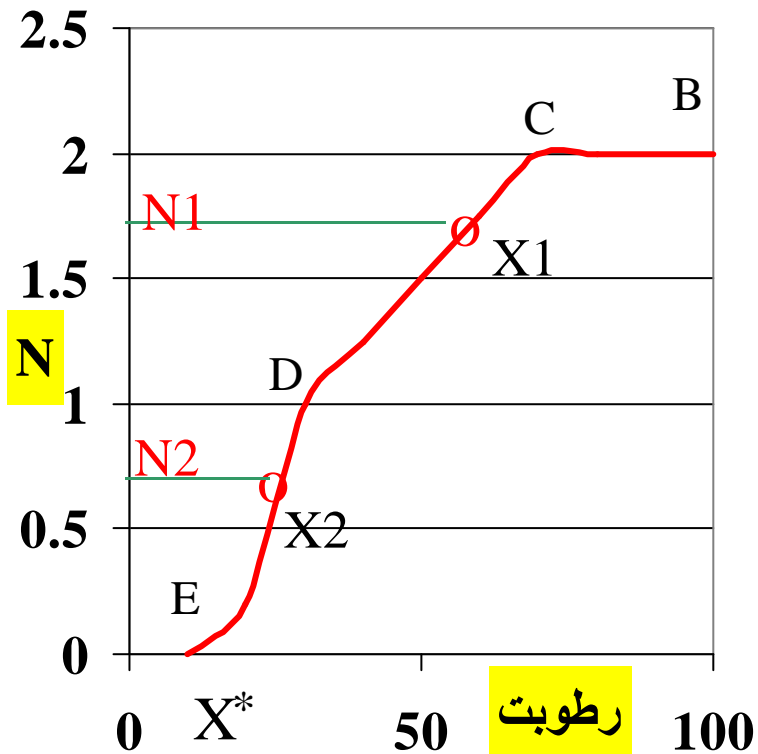
$$M = Nc / (Xc - X^*)$$

$$N1 = m(X1 - X^*)$$

$$N2 = m(X2 - X^*)$$

$$N = m(X - X^*) = Nc(X - X^*) / (Xc - X^*)$$

$$T = [Ss(Xc - X^*) / NcA] \ln[(X1 - X^*) / (X2 - X^*)]$$



## حل يك مسئله :

قطعه جامدي را مي خواهيم از رطوبت اوليه ۲۵% تا ۶% خشك كنيم . وزن اوليه جامد مرطوب ۱۶۰ kg و سطح تماس به ازاي هر ۴۰ kg يك متر مربع مي باشد . زمان خشك كردن را بر اساس داده هاي زير بدست آوريد :  $N(\text{kg}/\text{m}^2.\text{s})$

X	0.05	0.075	0.1	0.15	0.2	0.3	0.35
$N(10^3)$	0	0.05	0.15	0.225	0.3	0.3	0.3

حل :

$$X_1 = (x_1 / (1 - x_1)) = 0.25 / 0.75 = 0.333 \quad X_2 = 0.06 / 0.94 = 0.064$$

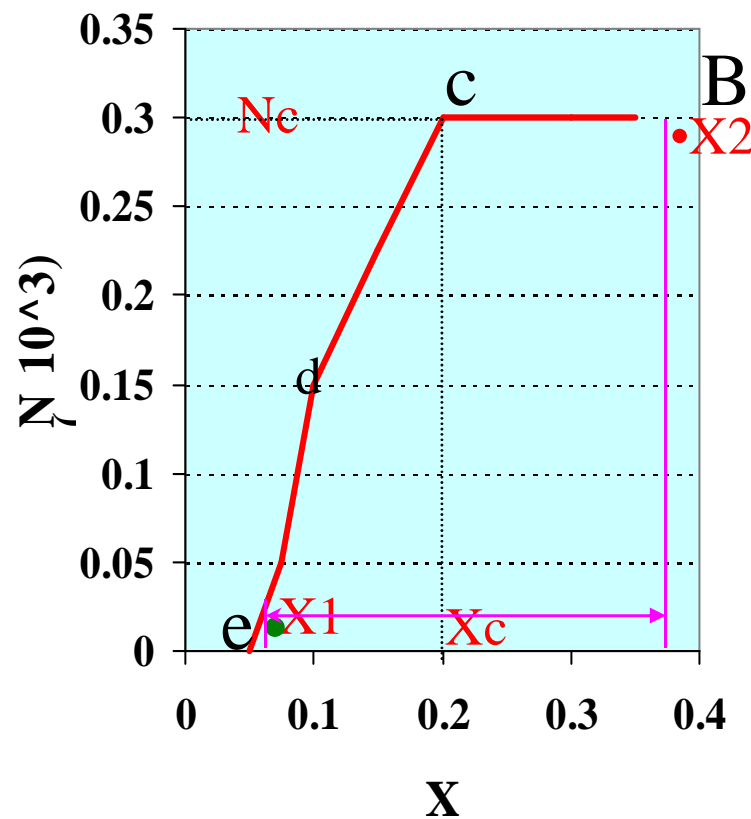
نمودار N بر حسب X رسم گردد و نقاط لازم روي آن مشخص گردد:

(1) در محدوده شدت ثابت داريم

$$t = 40 * \frac{S_s(X_1 - X_2)}{ANc} = 17733 \text{ s}$$

محدوده شدت نزولي:

الف) از روش ترسيمی  $1/N$  را بر حسب  $X$  رسم مينماييم و سطح زیر منحنی را بدست مي آوريم .



X	N	$1/N (* 10^3)$
0.2	300	3.33
0.18	266	3.76
0.16	239	4.18
0.14	208	4.8
0.12	180	5.55
0.15	150	6.67
0.07	70	14.3
0.04	40	23.3
0.064	23.3	40

1060 = سطح زیر منحنی

42400 s = زمان خشك شدن

60133 s = زمان كل خشك شدن

ب) از آنجاییکه منحنی خشک کردن از  $X = 0.2$  تا  $X = 0.1$  خط راست است؛ میتوان در دو محدوده آنرا

حساب کرد.

$$T = \frac{40(0.2 - 0.1)}{(0.3 - 0.15) \cdot 10^{-3}} \ln \frac{0.3 \cdot 10^{-3}}{0.15 \cdot 10^{-3}} = 18500 \text{ s}$$

و مابقی بصورت ترسیمی حل میشود که ۲۳۹۴۰ میگردد در نتیجه زمان کل: **601170 s**

ج) با تقریب می توان بخش نزولی را کلا یک خط راست گرفت:

$$T = 47430 \text{ s}$$

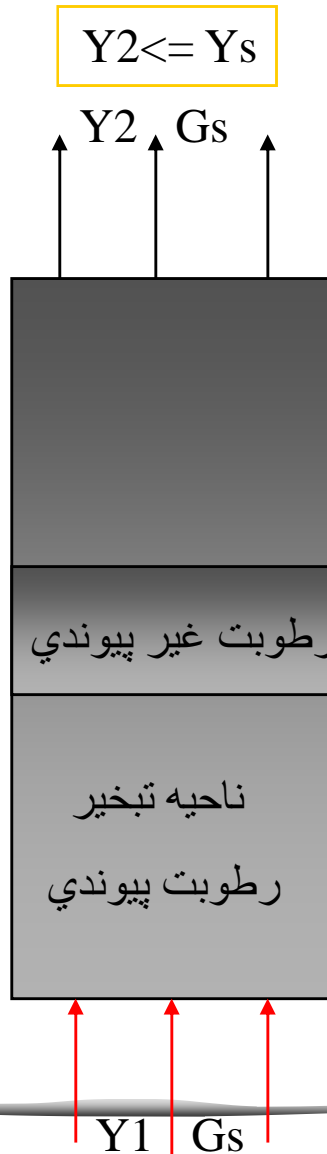
$$T_t = 47430 + 17730 = \mathbf{65160 \text{ s}}$$

بنابر این از ۳ روش مختلف نتایج به شرح زیر است:

$$\mathbf{60133 \text{ s} \ \& \ 60170 \text{ s} \ \& \ 65160 \text{ s}}$$

# خشك کردن با جریان سراسري :

وقتي گازی از يك بستر مرطوب جامد دانه ای عبور کند ؛ هر دو محدوده شدت ثابت ونزولي ایجاد شده و منحنی شدت خشك شدن مشابه قبل بدست می آید . تبخیر رطوبت غیر پیوندي در منطقه نسبتاً باریکی می افتد که به آهستگی در طول بستر حرکت میکند و به جز حالتیکه بستر از داخل گرم میشود ؛ گاز خروجی از این منطقه دارای درجه حرارت اشباع گاز ورودی میباشد که البته این درجه حرارت سطح ذرات مرطوب نیز هست . تا مدتی که این منطقه در بستر جامد است شدت خشك شدن ثابت می ماند وقتی که این منطقه به انتهای بستر می رسد ؛ شدت خشك شدن بعلت اینکه گاز دیگر به شرایط اشباع نمی رسد ، شروع به کاهش میکند



$G_s$  سرعت جرمی هوای خشك

- $N_{max} = G_s (Y_s - Y_1)$
- $N = G_s (Y_2 - Y_1)$       $dN = G_s dY$      شدت خشك شدن
- $dN = K_y dS (Y_s - Y)$       $dN = K_y a (Y_s - Y) da$      شدت انتقال جرم
- $> ds = adZ$      سطح تماس به ازای واحد حجم بستر

$$\ln \frac{Y_s - Y_1}{Y_s - Y_2} = N_{tg} = \frac{K_y a Z}{G_s}$$

$$\frac{N}{N_{max}} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_s - Y_1} = 1 - \frac{Y_s - Y_2}{Y_s - Y_1} = 1 - e^{-N_{tg}}$$

• که  $N_{tg}$  برای حالتیهای مختلف بستر روابط مخصوص بخود را داراست .

# خشك کنهائي پيوسته با جريان معكوس :

موازنه رطوبت :

$$S_s X_1 + G_s Y_2 = S_s X_2 + G_s Y_1$$

$$S_s (X_1 - X_2) = G_s (Y_1 - Y_2)$$

موازنه آنتالپي :

$$S_s H_{s1} + G_s H_{g2} + Q_{in} = S_s H_{s2} + G_s H_{g1} + Q$$

آنتالپي جامد :

$$H_s = C_s (T_s - T_0) + X_{ca} (T_s - T_0)$$

$C_s$  ظرفيت حرارتي جامد

$C_a$  ظرفيت حرارتي گاز (دما. جرم / انرژي)

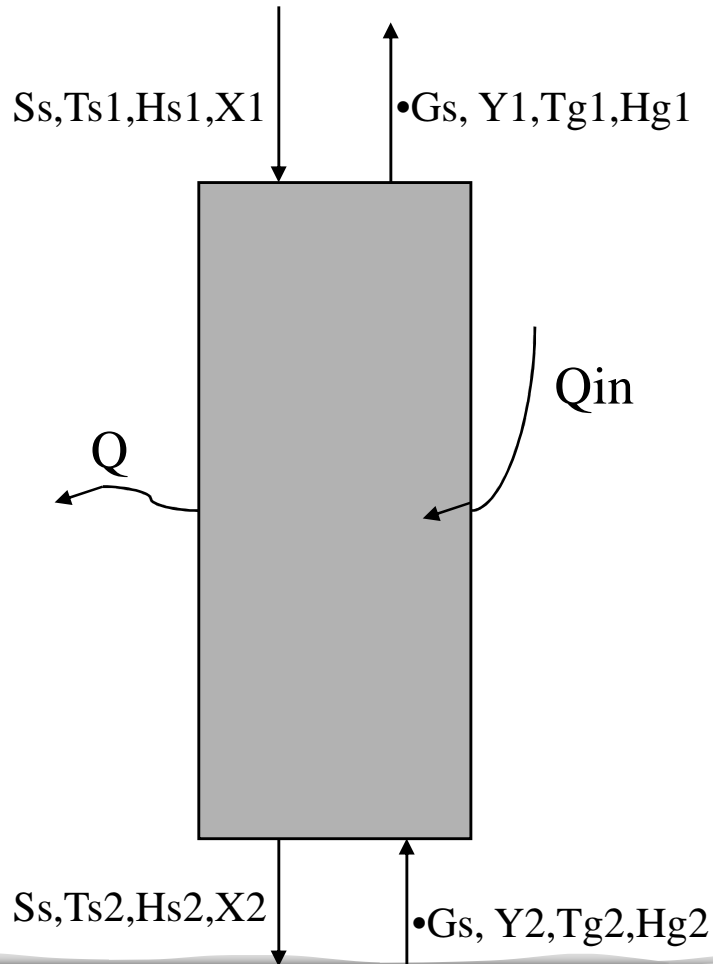
آنتالپي گاز :

$$H_g = C_b (T_g - T_0) + Y [C_a (T_s - T_0) + \lambda_0]$$

$$H_g = C_s (T - T_0) + Y \lambda_0$$

$C_s$  گرمای مرطوب

$C_b$  ظرفيت حرارتي مايع





## حل يك مسئله:

يك خشك كن دوار با جريان معكوس از هواي داغ و عايق بندي نشده براي خشك كردن سولفات آمونيوم از ۵/۳ درصد به ۲/۰% رطوبت بكار ميرود. قطر خشك كن ۱.۲ متر و طول آن ۶.۷ متر ميباشد. هوا با فشار اتمسفيك در ۲۵ درجه سانتیگراد و ۵۰% رطوبت وارد و با عبور از روي كويل هاي بخار تا ۹۰ درجه سانتیگراد قبل از ورود به خشك كن گرم ميشود. و در ۳۲ درجه سانتیگراد خارج ميشود.

جامد در ۲۵ درجه سانتیگراد وارد و در ۶۰ درجه سانتیگراد خارج ميشود و محصولي با شدت ۹۰۰ كيلوگرم در ساعت بدست مي آيد. مقدار هوا و حرارت لازم را محاسبه كنيد با اين فرض كه مجموع ضرايب انتقال حرارت به محيط توسط پوسته خشك كن  $12 \text{ W/M}^2.\text{K}$  باشد.

داده ها:

$$1507 \text{ J/Kg}$$

ظرفيت حرارتي سولفات آمونيوم

$$4178 \text{ J/Kg}$$

ظرفيت حرارتي آب

$$C_s = 1005 + 1884 Y \quad (\text{جدول ۱-۷ تریبال})$$

$$\lambda_0 = 2502300 \text{ J/Kg}$$

براي آب

## حل :

- $X1 = 3.5 / (100 - 3.5) = 0.0363$
- $X2 = 0.2 / (100 - 0.2) = 0.002$
- $Ss = 900 (1 - 0.002) = 898.2 \text{ Kg}$
- $Y2 = 0.01$  نمودار رطوبت سنجي
- $Hg2 = [1005 + 1884(0.01)]90 + 2502300 (0.01) = 117200 \text{ J/Kg}$
- $Hg1 = [1005 + 1884Y1]32 + 2052300 Y1 = 32160 + 2504200 Y1$
- $Hs2 = 1507(60 - 0) + 0.002(4178)(60 - 0) = 90922 \text{ J/Kg}$
- $Hs1 = 1507(25 - 0) + 0.0363(4178)(25 - 0) = 41475$
- $A = \pi * 1.2 * 6.7 = 25.3 \text{ M}^2$
- $\Delta T = [(90 - 25) * (32 - 25)] / 2 = 36 \text{ C}$
- $Q = 12 * 3600 * 25.3 * 36 = 39350000 \text{ J/hr}$

موازنه آنتالپي :

$$898.2(4175) + Gs(117200) = 898.2(90922) + Gs(32160 + 2504200Y1) + 39350000$$

$$898.2(0.0363 - 0.002) = Gs(Y1 - 0.01)$$

$$Gs = 2682 \text{ Kg/hr} \quad \& \quad Y1 = 0.0215 \text{ Kg/Kg}$$

موازنه رطوبت :

با حل اين دو معادله

56 KJ/Kg بنابر اين گرمای داده شده توسط گرمکن :

از روی نمودار آنتالپي هوای تازه

$$2682(117200 - 56000) = 164140 \text{ KJ/hr}$$