# خواص فیزیکی الیاف

# سرعت جذب رطوبت
# Rate of absorption of moisture

**دانشگاه صنعتی اصفهان**
**دانشکده مهندسی نساجی**

**صدیقه برهانی**



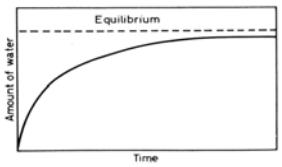
## اهمیت جذب رطوبت:

- در حین تولید:
  - ❖جلوگیری از ایجاد الکتریسیته ساکن
  - ❖سهولت رنگرزی و چاپ
- در حین مصرف:
  - ❖جذب رطوبت پوست و خشک نگهداشتن سطح آن
  - ❖تولید گرما درحین جذب رطوبت و جلوگیری از تغییر ناگهانی دمای پوست



## تغییرات ناشی از جذب رطوبت:

- تورم
- خواص مکانیکی
- خواص الکتریکی




- در تعادل دینامیکی تعداد ملکولهای جذب شده در واحد زمان برابر با تعداد ملکولهای دفع شده است.

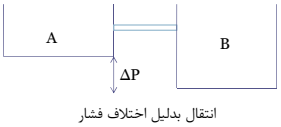


عوامل موثر بر سرعت جذب رطوبت:
- درجه حرارت
- رطوبت هوا
- سرعت باد
- ضخامت جسم
- چگالی جسم
- ماهیت الیاف

اهمیت سرعت جذب رطوبت
- آماده سازی
- خشک شدن کالا
- جذب رطوبت محیط توسط کالا
- باندهای زخم

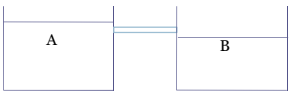
## سرعت جذب رطوبت:

- چرا زمان لازم برای رسیدن به تعادل رطوبتی الیاف با محیط اطراف زیاد است؟



انتقال بدلیل اختلاف فشار

- فرض:
کندی آماده سازی بدلیل کندی نفوذ ملکولهای آب به درون الیاف (هوا) است.



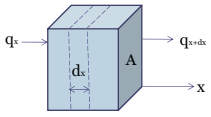
انتقال بدلیل اختلاف غلظت

- علت انتقال رطوبت
  - اختلاف غلظت
  - اختلاف فشار



## معادله فیک
## Fick's Equation

$$\frac{dm}{dt} = -DA\frac{\partial c}{\partial x}$$ Fick's Equation



المانی با سطح A

$\frac{dm}{dt}$ = سرعت انتقال ماده

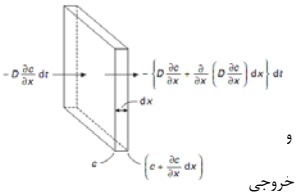
$\frac{\partial c}{\partial x}$ = تغییرات غلظت(گرادیان غلظت)

$m$= جرم ماده نفوذ کننده
$t$ = زمان
$C$ = غلظت ماده نفوذ کننده
$D$ = ضریب نفوذ
A = سطح نفوذ

با استفاده از این معادله میتوان رابطه بین غلظت –مکان و زمان را بدست آورد.



- در شکل قبل المانی به ضخامت dx و سطح واحد را در نظر میگیریم.




= خروجی از المان – ورودی به المان

تجمع + تولیدی

- فرض: تجمع=۰

جرم و $c = -D\frac{\partial c}{\partial x}.dt$

جرم خروجی $c + \frac{\partial c}{\partial x}.dx = -\left[D\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial c}{\partial x}\right).dx\right]dt$

جرم تولیدی برابر با افزایش جرم در المان و برابر با تغییر غلظت در حجم المان است، لذا داریم:

جرم تولیدی $\frac{\partial c}{\partial t}.dt.dx$

بنابراین: $-D\frac{\partial c}{\partial x}.dt + \left[D\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial c}{\partial x}\right).dx\right]dt = \frac{\partial c}{\partial t}.dt.dx$

فرض: D ثابت

$\frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial c}{\partial x}\right) = \frac{\partial c}{\partial t} \Rightarrow$ $D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t}$ → رابطه نفوذ در یک بعد



- معادله نفوذ به کمک مقادیر اولیه و شرایط مرزی قابل حل می باشد.
- برای محیط غیر پیوسته سازه های لیفی:

- $\varepsilon$ =تخلخل
- $Da$ = ضریب نفوذ بخار آب در هوا
- $Df$ =ضریب نفوذ بخار آب در الیاف
- $Ca$ = غلظت بخار آب در هوا
- $Cf$ = غلظت بخار آب در الیاف

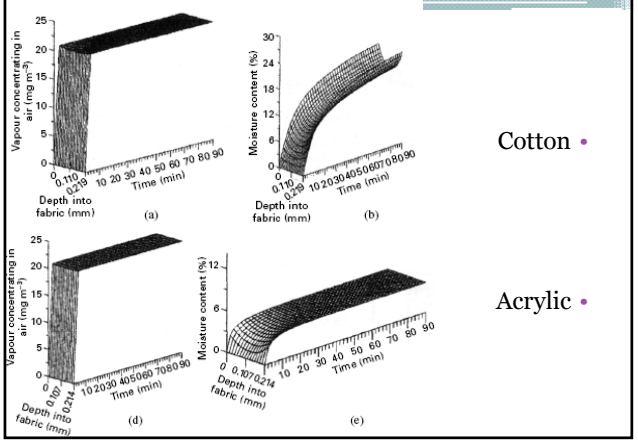
$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{fabric}}{\rho_{fiber}}$

$\varepsilon\frac{\partial c_a}{\partial t} + (1-\varepsilon)\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{\varepsilon}{\tau}D_a\frac{\partial^2 c_a}{\partial x^2} + (1-\varepsilon)D_f\frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2}$

نرخ انتقال جرم درفضای خالی — نرخ انتقال جرم در الیاف — نفوذ جرم در فضای خالی — نفوذ جرم در الیاف

$\tau = \varepsilon\frac{D_a}{D_{fabric}}$

$D_f \prec\prec D_a \Rightarrow \varepsilon\frac{\partial c_a}{\partial t} + (1-\varepsilon)\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{\varepsilon}{\tau}D_a\frac{\partial^2 c_a}{\partial x^2}$

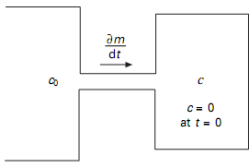



Cotton •

Acrylic •



C=o ⟶ t=o




$$\frac{dc}{dt} \propto \frac{dm}{dt} \propto -(c-c_\circ) \propto \left(-\frac{dc}{dx}\right)$$

$$\frac{dc}{c_\circ - c} \propto dt \Rightarrow \frac{dc}{c_\circ - c} = \frac{1}{\tau}dt$$

$$-\ln(c_\circ - c) = \frac{t}{\tau} + k \quad , \quad \tau = \text{constant}$$

$$k = -\ln c_\circ$$

$$-\ln(c_\circ - c) = \frac{t}{\tau} - \ln c_\circ \Rightarrow -\frac{t}{\tau} = \ln\frac{c_\circ - c}{c_\circ}$$

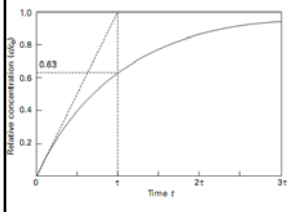
$$e^{-t/\tau} = \frac{c_\circ - c}{c_\circ} \Rightarrow \boxed{c = c_\circ\left(1 - e^{-t/\tau}\right)}$$



$$at \quad t = \tau, e^{-1} = 0.368$$

$$c = c_\circ\left(1 - e^{-t/\tau}\right) \Rightarrow c = c_\circ\left(1 - \frac{1}{e}\right) = 0.63c_\circ$$

$\tau$ زمانی است که ۶۳٪ از کل تغییرات حاصل می شود.




$$\frac{dc}{dt} = \frac{c_\circ}{\tau}e^{-t/\tau}$$

$$t = o \Rightarrow \frac{dc}{dt} = \frac{c_\circ}{\tau} \Rightarrow c = \frac{c_\circ}{\tau}t$$

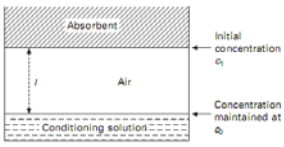
$$\frac{c_\circ}{\tau} = \tan\theta$$

$$\frac{c}{c_\circ} = 1 \Rightarrow t = \tau$$

$\tau$ زمان کامل شدن فرایند است به شرطی که فرایند با شیب اولیه ادامه می یافت.



• $M$ مقدار کل بخار آب جذب شده در حالت تعادل




$$\frac{dc}{dt} \propto \frac{dm}{dt}, \frac{dc}{dt} = \frac{c_\circ}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{c_\circ}{dc/dt} = \frac{M}{dm/dt}$$

$$\frac{dm}{dt} = -DA\frac{dc}{dx} \Rightarrow \frac{M}{\tau} = -DA\frac{c_1 - c_\circ}{l}$$

زمان لازم برای انتقال ماده از محلول به سطح جاذب(توده الیاف)

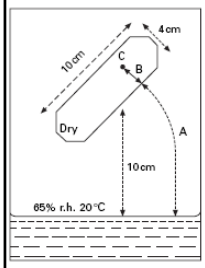
$$\boxed{\tau = \frac{lM}{(c_\circ - c_1)D_\circ A}}$$

• برای یک لیف به طول $h$ و شعاع $r$ داریم:

$$M = V \times \Delta C = \pi.r^2.h.(c_\circ - c)$$

زمان لازم برای انتقال ماده از سطح به داخل لیف (زمان به تعادل رسیدن لیف)

$$\tau = \frac{\pi.r^2h.(c_\circ - c).r}{D_l.(c_\circ - c)2\pi.r.h} \Rightarrow \boxed{\tau = \frac{r^2}{2D_l}}$$




مثال آماده سازی توده الیاف

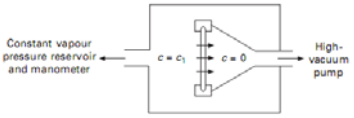
- آماده سازی در سه مرحله انجام می شود:
  - انتقال رطوبت از منبع رطوبتی به سطح بسته(A)
  - انتقال از سطح بسته به فضای خالی بین الیاف درون بسته (B)
  - انتقال از سطح الیاف به داخل الیاف ( c )
  - دو مرحله اول، انتقال رطوبت در هوا را شامل میشود.
  - هدف تعیین زمان لازم برای آماده سازی یک بسته از الیاف پنبه به وزن خشک ۱۰۰ گرم، مطابق شکل می باشد.
  - شعاع الیاف $10^{-3}$ سانتیمتر
  - $Da = 0.25\ cm^2/s$
  - $Df = 10^{-7}\ cm^2/s$
  - $M = 7$ گرم

$$\tau = \frac{M.l}{D_v(C_s - C_1)A} = \frac{7\times10}{0.25\times10^{-5}\times400\tau} = 20\times10^3\ Sec \cong 5\ h$$

$$\tau = \frac{r^2}{2D_l} = \frac{(0.001)^2}{2\times10^{-7}} = 5\ Sec$$



# اندازه گیری ضریب نفوذ



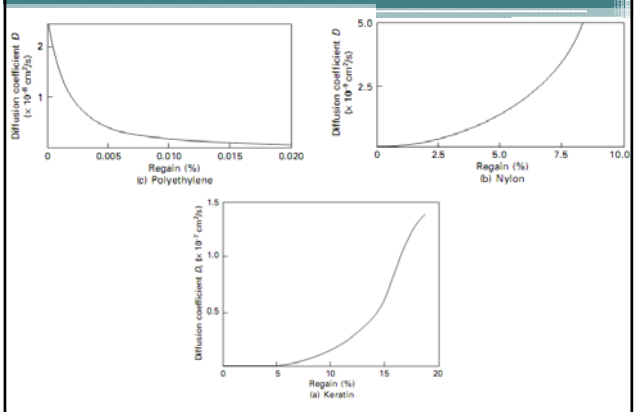

سرعت انتقال رطوبت از فیلم درحالت تعادل اندازه گیری می شود.
با تکرار عمل فوق در $C_1$ های مختلف، می توان ضریب نفوذ را بدست آورد.
تا زمانی که سیستم در حالت پایدار است، $dm/dt$ در عرض فیلم مستقل از $x$ است.

- با توجه به رابطه فیک :

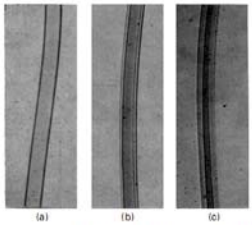
$$\int_0^l \frac{dm}{dt}dx = \frac{dm}{dt}\int_0^l dx = l\frac{dm}{dt}$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{l}\int_0^l -D\frac{dc}{dx}dx = -\frac{1}{l}\int_{C_s}^{0} -Ddc$$







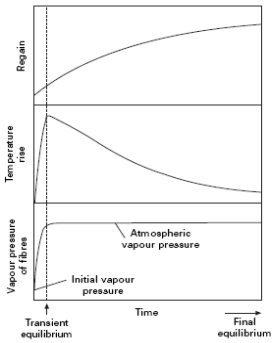




*9.8* Micrographs showing boundary gradually penetrating into filament. After Hermans and Vermaas [7].

- الیاف آبدوست مثل پشم و پنبه در حین بالا رفتن رطوبت، بخار مرطوب را از هوای مجاور جذب می کنند و گرما آزاد می کنند و برعکس.
- تحت شرایط ناپایدار این رفتار جذبی الیاف میتواند نقش مهمی در تبادل حرارتی بین بدن انسان و ایجاد راحتی حرارتی ایفا کند



## فرایند آماده سازی




*9.11* Changes in regain, temperature and vapour pressure during conditioning.



گرمایی (Q) که در اثر تغییر ریگین ۱۰۰ گرم نمونه خشک ایجاد می شود:

$Q = Q_V \Delta R$

$Q_V$ گرمای جزیی جذب

از طرفی :

$Q = m.C.\Delta T$

$Q_V \Delta R = m.C.\Delta T = (100 + R)\Delta T.C$

$$\boxed{\frac{\Delta T}{\Delta R} = \frac{Q_V}{(100+R).C}}$$

$T\Delta$ افزایش درجه حرارت
$C$ گرمای ویژه

این رابطه تغییر دما در حین رسیدن به تعادل گذرا را نشان می دهد.



- مثال: ۱۰۰ گرم الیاف پنبه
- RH=28% → RH= 70%
- T=20C → T=20C
- R=3.7% → R=7.7%
- ریگین در حالت تعادل گذرا برابر است با 4.3٪
- افزایش درجه حرارت ناشی از افزایش 0.6درصدی ریگین برابر است با:

$$\frac{\Delta T}{\Delta R} = \frac{Q_V}{(100+R).C} \Rightarrow \Delta T = \frac{2600}{104 \times 1.45} \times 0.6 = 10.3 \deg C$$

$$T = 20 + 10.3 = 30.3$$

$$for \;\; R = 4.3 \;, T = 30.3\ ^{\circ}C \longrightarrow RH = 38.6\%$$

$$RH = \frac{vapour\ pressure\ at\ T(P)}{saturation\ vapour\ pressure\ at\ T(P_s)} \times 100 \Rightarrow P = \frac{31.8 \times 38.6}{100} = 12.25\ mmHg$$

$$P_{atm} = \frac{17.5 \times 70}{100} = 12.25\ mmHg$$

- نتایج فوق نشان می دهد که تغییر رطوبت در حال تعادل گذرا بسیار جزیی است و زمان آماده سازی بیشتر به انتقال حرارت بعدی بستگی دارد.

- به علت تماس مستقیم لباس با بدن انسان درمدت به تن داشتن آن، بین بدن و لباس بطور پیوسته و دینامیکی اثر متقابل وجود دارد، این اثرات باعث بوجود آمدن احساسات مختلفی مانند حرارتی و مکانیکی می شود که تحت عنوان احساس راحتی بیان می شود.
- بدن انسان بندرت تحت شرایط پایا است و بطور مداوم درمعرض تغییرات شرایط محیطی و فعالیت فیزیکی قرار دارد.
- قابلیت انتقال رطوبت منسوجات، نقش تعیین کننده ای را در رابطه با راحتی در پوشش بخصوص در شرایط تعریق دارد.



**فرآیندهای فیزیکی که باعث راحتی در پوشش می شوند:**

- **انتقال حرارت بوسیله**
  - **هدایت،**
  - **جابجائی**
  - **تشعشع**
- **انتقال رطوبت**
  - **نفوذ رطوبت در حفره ها**
  - **نفوذ رطوبت در الیاف**
  - **میعان و یا تبخیر در سطح الیاف**
  - **انتقال مایع در پارچه توسط اثرات موئینگی**

- **اثرات متقابل مکانیکی به فرم فشار، اصطکاک و تماس نامنظم دینامیکی**



**رفتار انتقال یک پارچه خشک در اثر تغییر رطوبت نسبی، شامل سه مرحله است :**

- مرحله اول
  نفوذ بخار آب و آب مایع در فضاهای بین الیاف است که درکسری از ثانیه با شرایط رطوبتی جدید به حالت تعادلی پایدار می رسد.
- مرحله دوم
  جذب رطوبت الیاف است که فرآیند نسبتاً آرامی است و بسته به فرآیندهای انتقال حرارت، برای کامل شدن به چند دقیقه تا چند ساعت زمان احتیاج دارد.
- مرحله سوم،
  مرحله رسیدن به یک حالت پایدار است، که در این مرحله هر چهار فرم فرآیند انتقال رطوبت ثابت و یکنواخت میشود.
  در نتیجه توزیع غلظت بخار آب، رطوبت محتوی لیف، کسر حجمی مایع و نرخ تبخیر با زمان ثابت و بدون تغییر می شود.



- در حین فرآیند های تغییر فاز مثل:

✓ جذب یا دفع رطوبت
✓ میعان یا تبخیر

گرما آزاد و یا جذب می شود.

- فرایندهای انتقال رطوبت با انتقال حرارت توأم است.

- از مدتها پیش اهمیت حیاتی رفتار انتقال رطوبت و حرارت لباس بر بقای انسان شناخته شده و تحقیقات زیادی در این رابطه انجام شده است.
- اولین بار فرآیند همزمان انتقال رطوبت و حرارت در مجموعهٔ الیاف نساجی، توسط هنری در سال ۱۹۳۹ مورد بررسی قرار گرفت.
  و بعدها در سال ۱۹۴۸ با در نظر گرفتن مکانیزمهای فیزیکی پیچیده مختلف، یک مدل در این رابطه توصیف کرد. در این مدل، او مجموعه معادلات دیفرانسیلی را برای تشریح فرآیندهای مورد بحث ارائه داد که از قانون بقای جرم و انرژی مشتق شده بودند.
- در سال ۱۹۹۹، لی و لو، یک روش ریاضی پیشرفته برای فرایند جذب رطوبت در الیاف پیشنهاد کردند که شامل معادله نفوذ شعاعی در سیلندر بود.



## مدل سازی

- **فرضیات مدل**
  - تغییرات حجمی الیاف در اثر تغییر رطوبت محتوی نادیده گرفته شد.
  - ریز لایه ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است.
  - در حین فرآیند بین الیاف و هوای محبوس در فضای بین الیاف تعادل حرارتی آنی صورت می‌گیرد.
  - از انتقال رطوبت توسط پدیده موئینگی صرفنظر شد.
  - از پدیده میعان که در دماهای پایین رخ می‌دهد، صرفنظر شد.
  - انتقال حرارت به روش هدایت در نظرگرفته شد.

**معادلات مدل**

$$\varepsilon\frac{\partial C_a}{\partial t}+(1-\varepsilon)\frac{\partial C_f}{\partial t}=\frac{D_a\varepsilon}{\tau}\frac{\partial^2 C_a}{\partial x^2}$$

$$C_v\frac{\partial T}{\partial t}-\lambda\frac{\partial C_f}{\partial t}=K\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial C_f}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left\{rD_f(x,t)\frac{\partial C_f}{\partial r}\right\}$$

$$c^{n}=\{x\}=\{c^{n}\}$$

معادلات فوق توسط شرایط مرزی و شرایط اولیه به روش عددی قابل حل هستند



## شرایط اولیه و مرزی

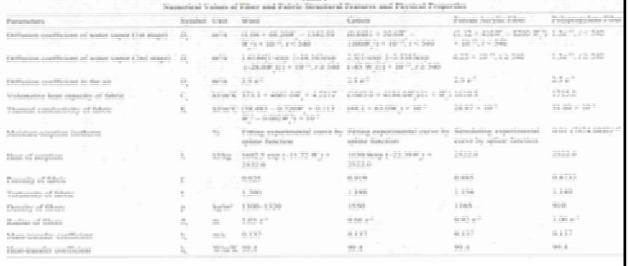
$$T(x,0)=T_0$$
$$C_a(x,0)=C_{a0}$$
$$C_f(x,0)=f(H_{a0},T_0)$$

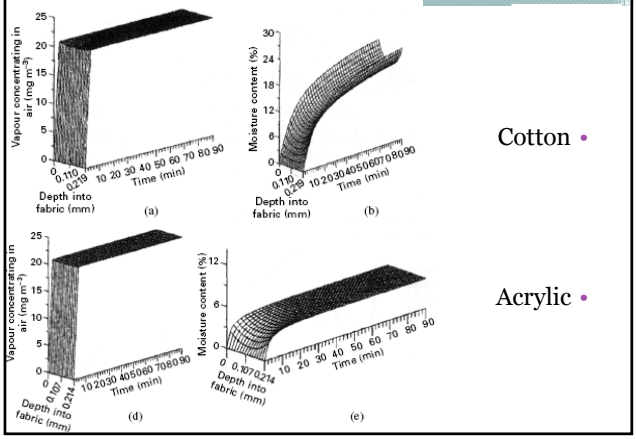
شرایط اولیه

شرایط مرزی

$$D_a\varepsilon\frac{\partial C_a}{\partial x}\Big|_{x=0}=h_{c0}\left(C_{a0}^{\,n}-C_{sk}\right)$$
$$D_a\varepsilon\frac{\partial C_a}{\partial x}\Big|_{x=L}=-h_{c1}\left(C_{aL}^{\,n}-C_{env}\right)$$
$$K\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0}=h_{t0}\left(T_{a0}^{\,n}-T_{sk}\right)$$
$$K\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=L}=-h_{t1}\left(T_{aL}^{\,n}-T_{env}\right)$$



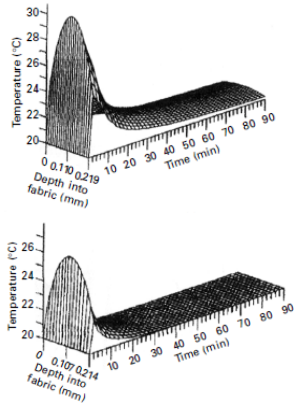





Cotton •

Acrylic •

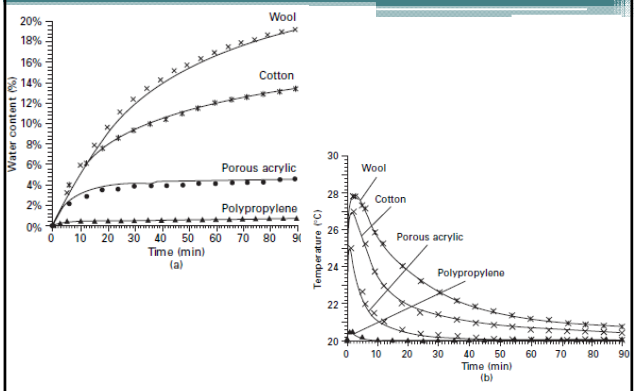





Cotton •

Acrylic •






*9.16* Diffusion into fabrics in change from 0 to 99% r.h. Theoretical lines and experimental points: (a) moisture uptake; (b) temperature change at surface of fabric. From Li and Luo [17].



Penetration of a change into a mass of fibers

*9.12* Steady-state conditions: (a) vapour pressure gradient at constant temperature; (b) temperature gradient at constant vapour pressure.

- انتقال یک تغییر توسط دو موج صورت می گیرد. این دو موج دارای دو ضریب نفوذ متفاوت $D_M$, $D_H$ یا D1, D2 هستند.
- $D_H$ عبارت است از ضریب نفوذ حرارت در سیستمی بدون تغییر رطوبت
- $D_M$ عبارت است از ضریب نفوذ رطوبت در سیستمی بدون تغییر حرارت

- در حالتی که اثرات رطوبت و حرارت مستقل از یکدیگر باشند یا ارتباط بسیار ضعیفی داشته باشند:

$D_1=D_M$

$D_2=D_H$

- در سیستمهای نساجی گرمای جذب زیاد است و رطوبت محتوی در فشار بخار ثابت با تغییر درجه حرارت سریعاً تغییر میکند لذا :

$$1-\lambda\upsilon=\frac{1}{1+\frac{Q_V}{C}\left(-\frac{\partial M}{\partial T}\right)_C}$$

- $Q_V$=حرارت جزیی جذب از حالت بخار
- $C$ = حرارت مخصوص مواد
- $(-\partial M/\partial T)c$=سرعت کاهش رطوبت محتوی با افزایش دما و غلظت بخار آب ثابت باشد.

For cotton at room temperature, the values of $(1 - \lambda v)$ are as follows:

| r.h. (%) | 10 | 30 | 50 | 70 | 90 |
|---|---|---|---|---|---|
| $(1 - \lambda v)$ | 0.35 | 0.22 | 0.15 | 0.08 | 0.025 |



- هنری نشان داد که وقتی مقدار $1-\lambda\upsilon$ در مقایسه با ۱ خیلی کوچک است ( در مورد بسیاری از کاربردهای نساجی) داریم:

$$D_1=\frac{D_M D_H}{D_M+D_H}$$

$$D_2=\frac{D_M+D_H}{1-\lambda\upsilon}$$

- بنابراین یک موج با سرعتی کمتر از سرعت موج انتقال تغییر درحالت استقلال، منتقل می شود( موج آهسته)

$$if\ \ D_H=D_M=\mathrm{D}\Rightarrow \mathrm{D}_1=\frac{D}{2}$$

$$if\ \ D_H\neq D_M\Rightarrow \mathrm{D}_1\prec D_H\ \ or\ D_M$$

- و چون $1-\lambda\upsilon$ خیلی کوچک است $D_2$ بزرگ است و در نتیجه موج دیگر با سرعتی بیش از سرعت تغییر در حالت مستقل از میان ماده عبور می کند.(موج تند)



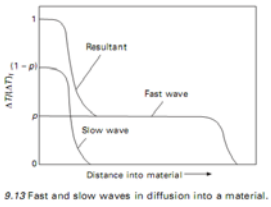
*Table 9.2* Coupled diffusion for cotton assemblies [15]

| Density (g/cm³) | Temperature (°C) | r.h. (%) | Diffusion coefficients × $10^{-5}$ cm²/s | | | | p | n |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $D_M$ | $D_H$ | $D_1$ | $D_2$ | | |
| 0.2 | 70 | 20 | 4.5 | 34 | 4.1 | 130 | 0.094 | 0.0037 |
| | | 65 | 3.1 | 12 | 2.5 | 140 | 0.192 | 0.0040 |
| | | 90 | 0.93 | 3.2 | 0.72 | 160 | 0.22 | 0.0013 |
| | 50 | 65 | 21 | 16 | 9.3 | 230 | 0.39 | 0.041 |
| | 80 | 65 | 90 | 20 | 17 | 690 | 0.17 | 0.11 |
| 0.5 | 20 | 20 | 1.4 | 16 | 1.3 | 63 | 0.050 | 0.0016 |
| | | 65 | 0.92 | 5.7 | 0.80 | 66 | 0.13 | 0.0019 |
| | | 90 | 0.28 | 1.5 | 0.24 | 62 | 0.15 | 0.0006 |
| | 50 | 65 | 5.7 | 7.7 | 3.4 | 99 | 0.38 | 0.023 |
| | 80 | 65 | 27 | 9.8 | 7.4 | 210 | 0.24 | 0.087 |



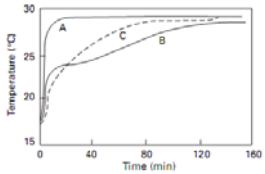
هنری نشان داد که اگر $f_1$ و $f_2$ توابعی از زمان و مکان و همچنین حلهای مناسبی از معادلات نفوذ باشند که در مقیاس زمانی ( بدلیل ثابتهای نفوذ متفاوت) تفاوت دارند. در آنصورت تغییر دما در توده، بدون تغییر فشار بخار:

$$\frac{\Delta T}{(\Delta T)_f}=(1-p)f_1+pf_2$$




*9.13* Fast and slow waves in diffusion into a material.

$p$ اهمیت نسبی تغییر را نشان میدهد



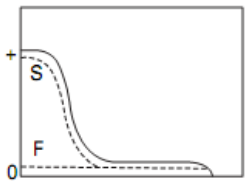

*9.14* Transmission of temperature change through a cotton cylinder by diffusion. A, outer air temperature; B, observed temperature at centre of cylinder; C, theoretical temperature at centre of cylinder. After Cassie and Baxter [16].

تغییر رطوبت در توده، در اثر تغییر دما بدون تغییر فشار بخار و یا در اثر تغییر فشار بخار بدون تغییر دما:

$$\frac{\Delta M}{(\Delta M)_f} = (1+n)f_1 - nf_2$$

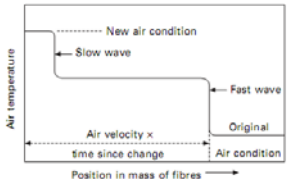
$n$ اهمیت نسبی تغییر را نشان میدهد

Moisture content change



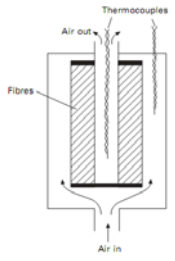


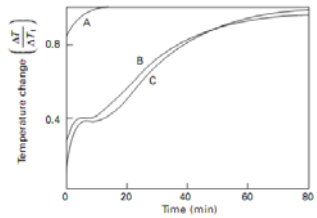

# تغییرات تحت وزش باد




*9.18* Ideal transmission of change by a forced draught.

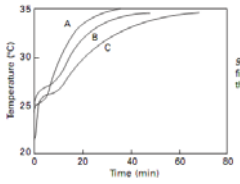





*9.20* Transmission of temperature change through a textile cylinder by forced draught: A, ingoing air temperature; B, temperature after passing through cylinder, experimental; C, temperature after passing through cylinder, theoretical. After Daniels [19].






*9.21* Transmission of temperature change from 20 to 35 °C through various fibres in textile cylinder. The curves show temperature of air after passing through cylinder: A, acetate; B, cotton; C, wool. After Baxter and Cassie [20].

- نتیجه:
- انتقال دما و رطوبت در الیاف جاذبه الرطوبه توسط دو موج آهسته و سریع صورت میگیرد.
- هر دو موج حامل رطوبت و دما می باشند لیکن درصدی از رطوبت و حرارت که منتقل میکنند متفاوت است.
- هرچه الیاف جاذبه الرطوبه تر باشند تغییر آهسته تر صورت میگیرد.
- در الیاف غیر جاذبه الرطوبه، رطوبت و دما بطور مستقل نفوذ می کنند.

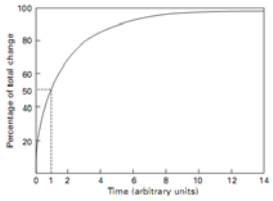
# آماده سازی
# Conditioning

$$R = R_\circ\left(1 - e^{-kt}\right)$$

$$\frac{R}{R_\circ} = 1 - e^{-kt}$$

$$e^{-kt} = 1 - \frac{R}{R_\circ}$$

$$-kt = \ln\left(1 - \frac{R}{R_\circ}\right)$$




*9.22* Rate of conditioning in practice.

چون تغییر رطوبت با زمان تقریباً نمایی تغییر می کند لذا نسبت معینی از کل تغییرات در زمان مشخصی صورت می گیرد.