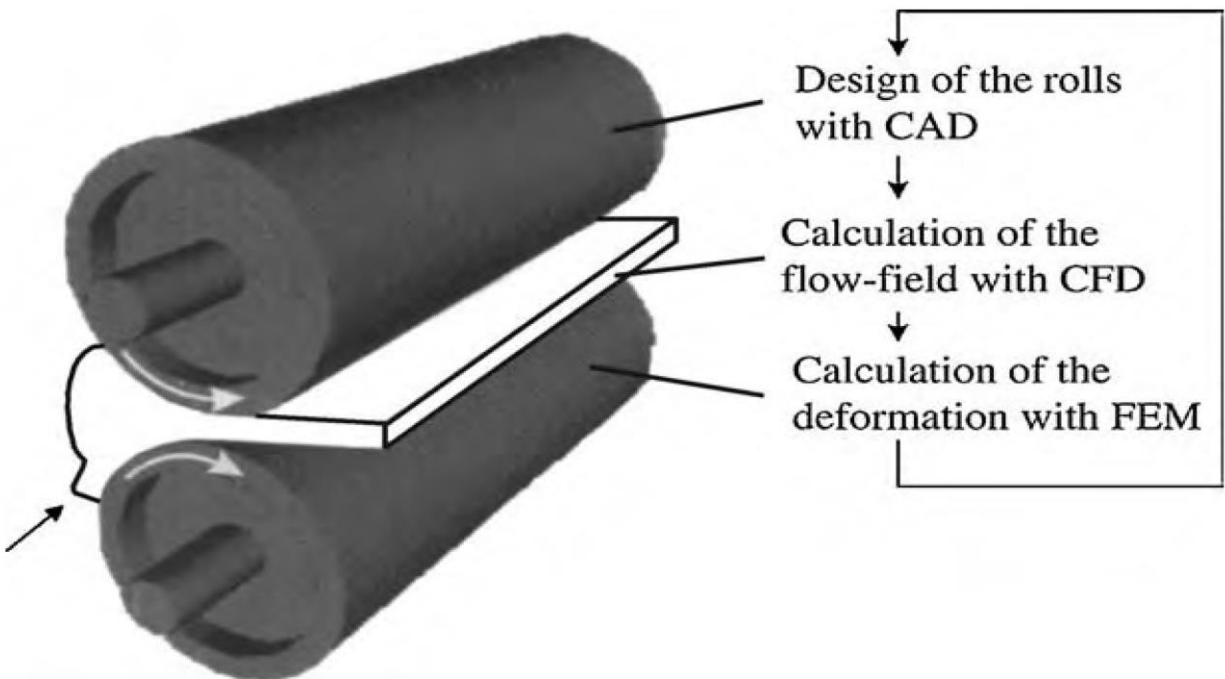


# CALENDERING

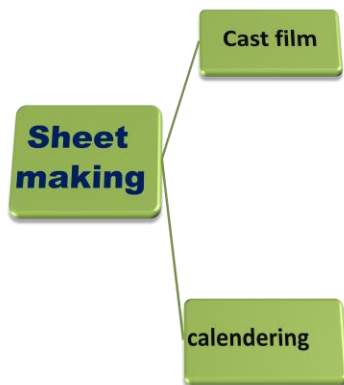
ADVISOR: PROFESSOR SAEED BAZGIR

BY MOHAMADREZA HAGHANI

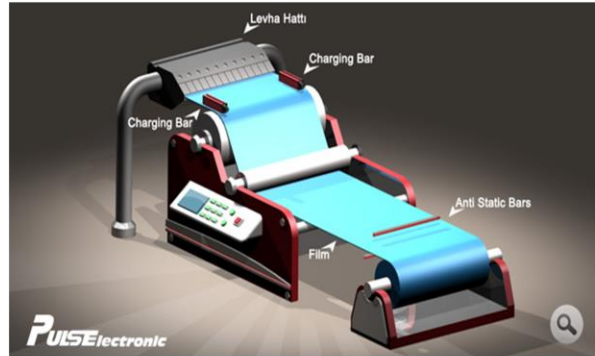
1394



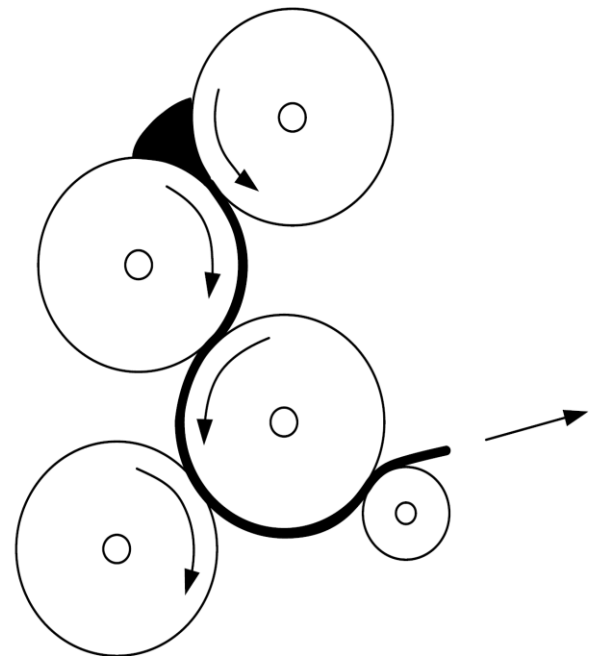
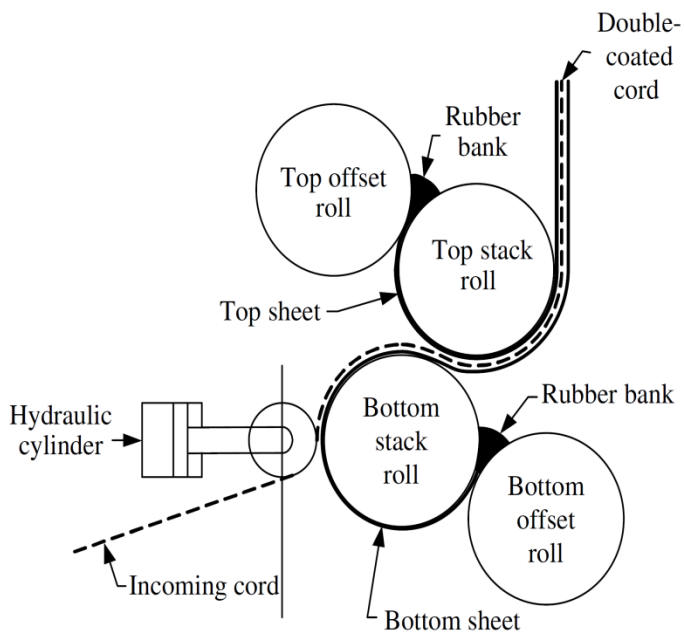
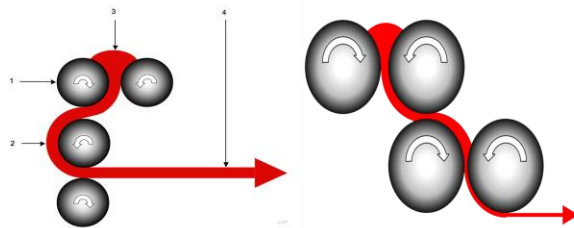
# روشهای اصلی تولید ورق (sheet) یا صفحات پلیمری



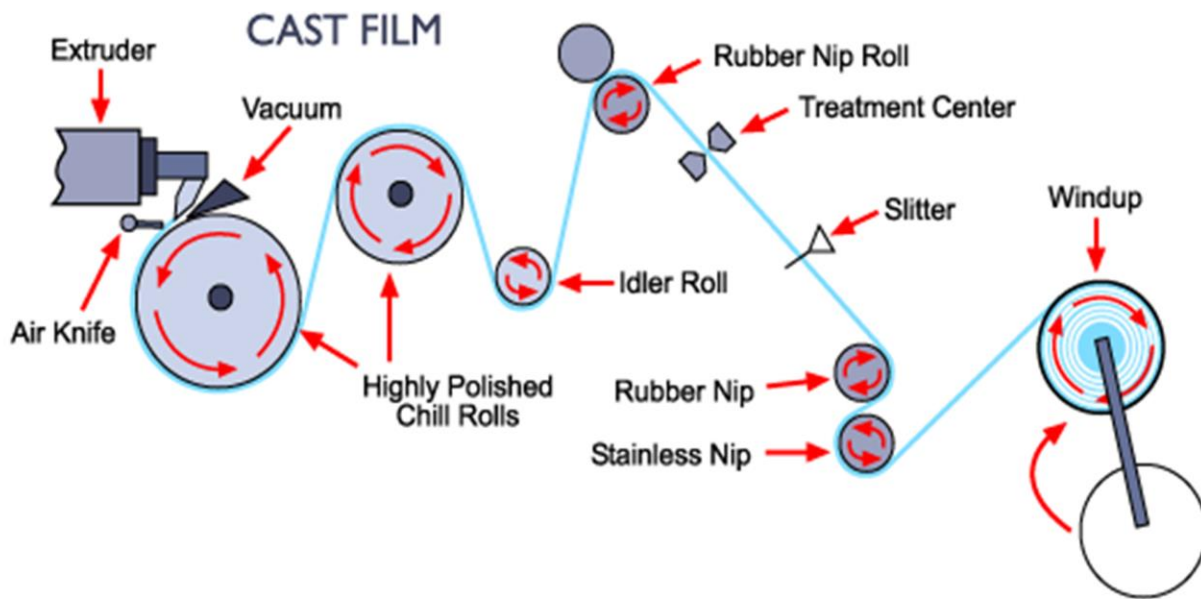
T-die  
or coat hanger die  
(sheeting die)



More than 3 roll



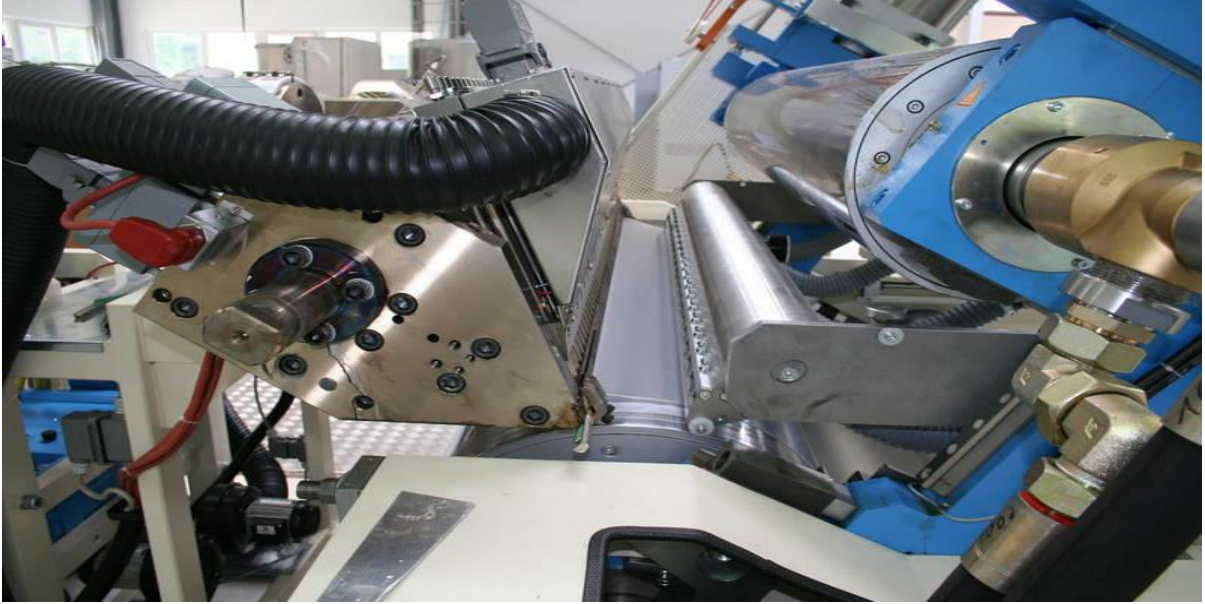
# Cast film process



## Cast film

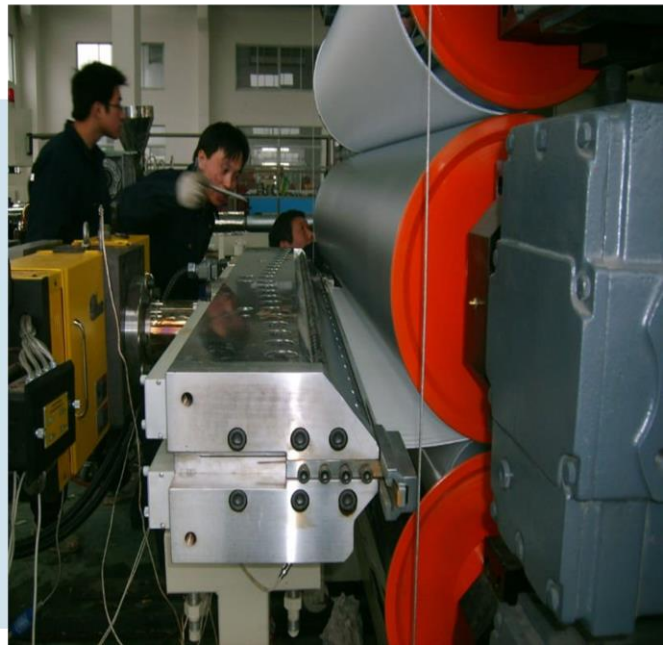


رسیدن به درجه بالایی از پرداخت و جلای سطحی  
صافی و یکنواختی در سطح



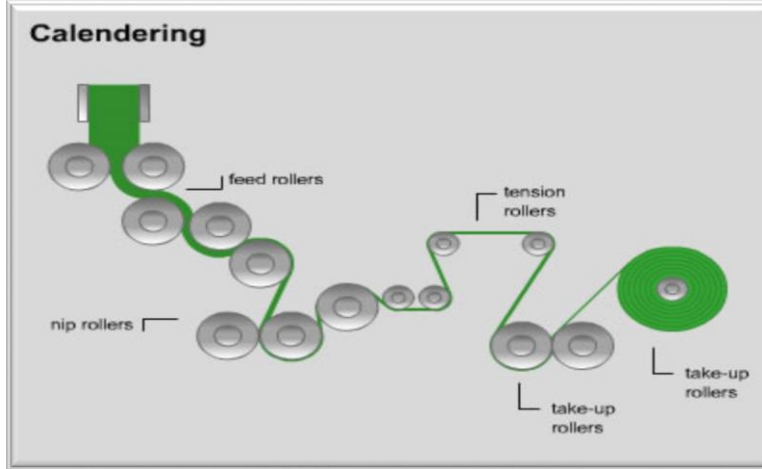
تعیین ضخامت بسیار دقیق و کنترل شده ورق بصورت کاملا یکنواخت

## Casting roller



روش خیلی گران قیمت  
دستگاه ها میلیون دلاری  
حساس به خش و وجود فلز  
دارای حسگر وجود فلز و ناخالصی

# Calendering



- فرم چند غلتکی two roll mill است که بیش از دو غلتک دارد
- علاوه بر mixing اولیه فرم دهی-کنترل ضخامت و جمع آوری را انجام میدهد

- مواد با فشار از میان دو غلتک عبور کرده و به دلیل تفاوت سرعت غلتکها زیر جریان درگ قرار میگیرند

کلندرینگ فرایندی است که در آن ماده مذاب از میان ناحیه باریک دو غلتک نا همسو گرد کشیده شده و با این روش میتوان یک ورق تولید کرد

## تفاوت Calendering با two roll mixing mill

Two rolls mixing mill



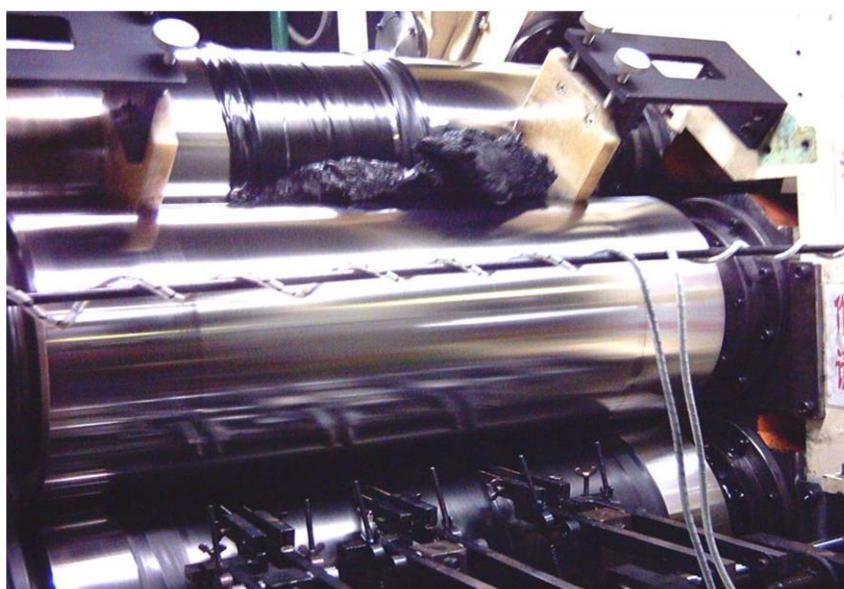
calender



## Calendering machinery



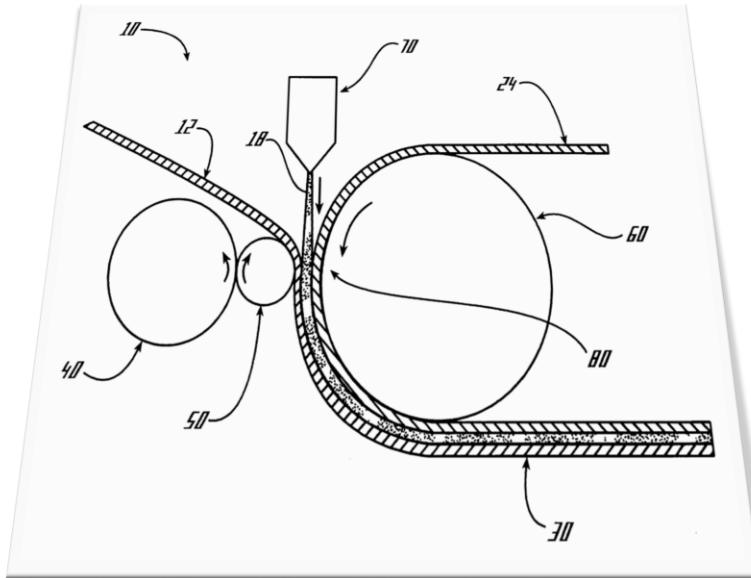
### کاربرد های کلی کالندرینگ



- اختلاط توزیعی
- تولید sheet یا ورق
- تولید ورق های چند لایه با کنترل ضخامت دقیق
- پرداخت سطوح (certain surface finish)
- رسیدن به درجات مشخص صافی یا زبری در سطح
- ایجاد شیار و نقش برجسته و طرح در سطوح
- پوشش دهی sheet coating

## Two roll mixing mill





CALENDERS-۱ ➤

TWO-ROLLS MIXING MILL -۲ ➤

cast film extrusion(film casting) -۳ ➤

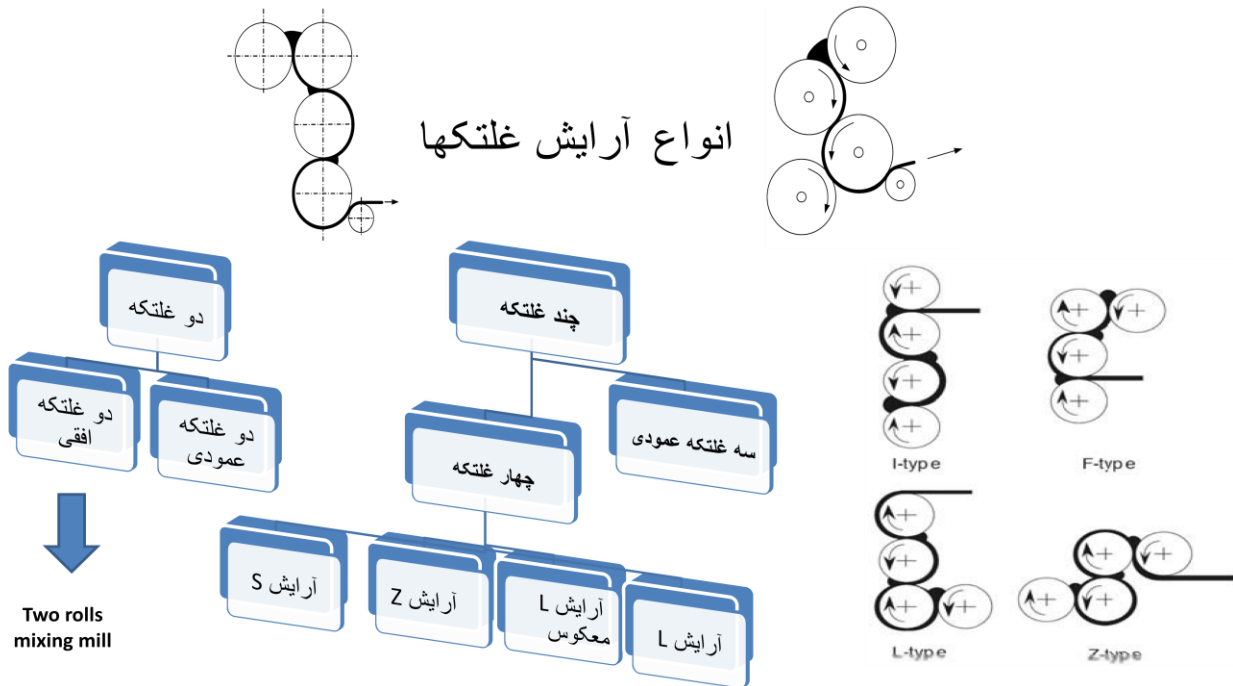
co-extrusion -۴ ➤

film blowing -۵ ➤

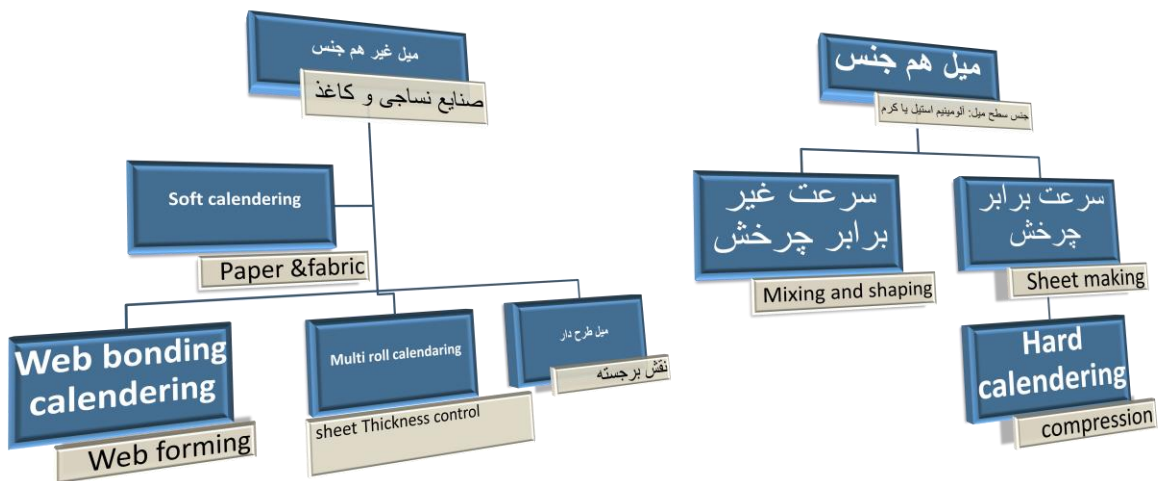
calender coating& extrusion coating -6 ➤

- ۱- winder یا جمع کننده
- سیستم های کشنده و جمع کننده و رول کننده
- ۲- صنایع نساجی (برزنت)
- ۴- در نرم کردن پارچه ها
- ۵- در صنایع کاغذ
- ۶- شیشه و تولید ورق فلزات





### انواع کلندر بر اساس نوع و سرعت غلتکها (mills)



## محصولات تولیدی به روش کلندرینگ

- ❑ 1-rubber sheeting
- ❑ 2-rubber flooring
- ❑ 3-anti-skid flooring
- ❑ 4-transit flooring
- ❑ 5-rubber matting
- ❑ 6-rubber coated fabrics
- ❑ 7-plastic SHEETS (pvc &...)
- ❑ 8-anti-abrasive sheets
- ❑ 9-water-proofing membranes
- ❑ 10-pulley lagging sheets
- ❑ 11-web forming sheets
- ❑ 12-fabric softening

تولید sheet یا ورق  
تولید ورق های چند لایه  
اختلاط توزیعی  
پرداخت سطوح (certain  
surface finish)  
رسیدن به درجات مشخص صافی  
یا زبری در سطح  
ایجاد شیار و نقش برجسته و طرح  
در سطوح  
چاپ

## محصولات تولیدی به روش کلندرینگ



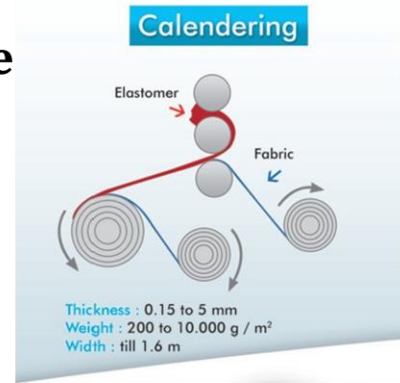
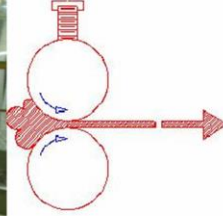
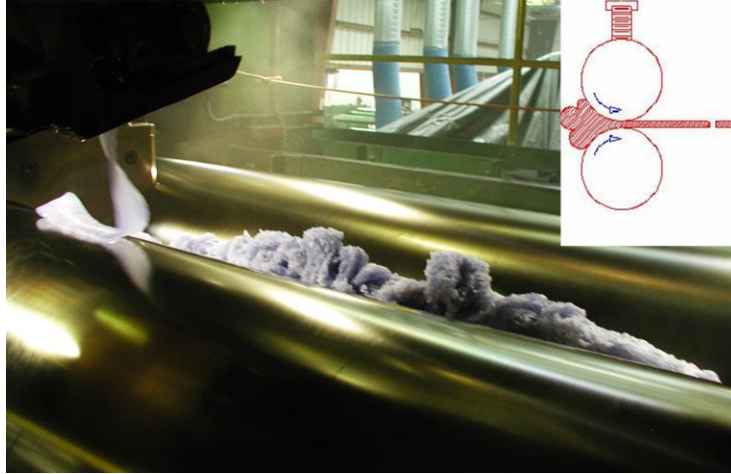
PVC ABS PET ورق تک و چند لایه

ورق های چند لایه کو اکستروود شده

صنعت لاستیک

پارچه های نرم و صنعت نساجی

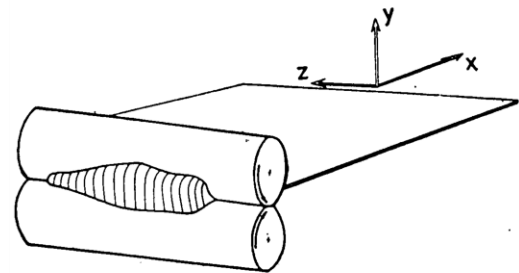
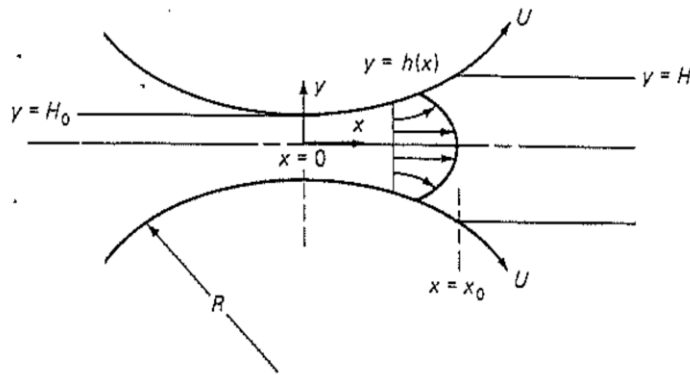
# Analysis of calendaring by mathe modeling



هدف:

روابط بین متغیر های عملیاتی  
متغیر های اجرایی و  
متغیر های طراحی  
مثل ضخامت ورقه  
فاصله-قطر و سرعت غلتکها

## Details of the geometry and the flow field



# Initial equation for mathematical modeling

## Dynamic and continuity equation

The dynamic equations:

$$\begin{aligned} \text{x component } \rho \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} \\ &+ \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{y component } \rho \left( \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} \\ &+ \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{z component } \rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} \\ &+ \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{aligned}$$

The continuity equation:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

## Components of the rate-of-deformation tensor

$$\Delta_{xx} = 2 \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad \Delta_{xy} = \Delta_{yx} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$$

$$\Delta_{yy} = 2 \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \Delta_{xz} = \Delta_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}$$

$$\Delta_{zz} = 2 \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad \Delta_{yz} = \Delta_{zy} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y}$$

# The Newtonian model of calendaring

$$\rho \left( u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right)$$

$$\rho \left( u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0$$

## The general assumptions:

- ▶ 1-the flow is steady state and laminar
- ▶ 2-the flow is isothermal
- ▶ 3-the flow is incompressible
- ▶ 4-there is no slip between the fluid and the rolls
- ▶ 5-the flow is strictly two-dimensional
- ▶ در معادلات دینامیک از ترم های اینرسی (سمت چپ) در برابر ترم های ویسکوز (سمت راست) صرف نظر می نمایم

## lubrication approximations

$$H_0 \ll R.$$

$$u_y \ll u_x$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\partial}{\partial y}$$

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$p = p(x)$$

۱- اگر شعاع میل از فاصله بین دو میل خیلی بیشتر باشد میتوان جریان را معادل جریان بین دو صفحه موازی فرض کرد.

۲- در این صورت سرعت جریان در محورهای عمود بر آن قابل چشم پوشی است و سرعت تنها در جهت ضخامت لایه تغییر میکند

۳- ترم ها و اثرات اینرسی قابل صرف نظر کردن بوده از آنها چشم پوشی میکنیم

۴- بعلاوه فشار تنها تابعی از ( x ) میباشد.

## Second Order (ODE) Integration

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$u_x = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + ay + b$$

$$u_x = U \quad \text{on } y = h(x)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = 0 \quad \text{on } y = 0$$

$$u_x = U + \frac{y^2 - h^2(x)}{2\mu} \frac{dp}{dx}$$

### Boundary conditions

- ▶ 1- there is no-slip between the fluid and the rolls
- ▶ 2- symmetry in flow
- برای حل معادله درجه دوم نیاز به دو شرط مرزی داریم
  - ▶ شرط عدم لغزش در دیواره و تقارن جریان در جهت ضخامت سیال خروجی از نیپ
  - ▶ - در نهایت پروفایل سرعت بصورت تابعی از ( y ) بدست می آید

## Approximation of $h(x)$

$$u_x = U + \frac{y^2 - h^2(x)}{2\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$h = H_0 + R - (R^2 - x^2)^{1/2}$$

$$h(x) = H_0 \left( 1 + \frac{x^2}{2H_0 R} \right)$$

۱- پروفایل سرعت تابعی از  $(y)$  و از طریق  $(h(x))$  و  $(p(x))$  تابعی ضمنی از  $(x)$  است.

۲-  $h(x)$  معادله سطح استوانه غلتکها و  $y$  فاصله محور افقی تا سطح غلتکها میباشد.

۳-  $h(x)$  را برای سهولت محاسبات بصورت یک سری دو جمله ای بسط میدهم.

## Define dimensionless variables

$$x' = \frac{x}{\sqrt{2RH_0}}$$

$$u'_x = \frac{u_x}{U}$$

$$y' = \frac{y}{H_0}$$

$$p' = \frac{pH_0}{\mu U}$$

$$h(x) = H_0 \left( 1 + \frac{x^2}{2H_0 R} \right)$$

$$u_x = U + \frac{y^2 - h^2(x)}{2\mu} \frac{dp}{dx}$$

Velocity profile

$$u'_x = 1 + \sqrt{\frac{H_0}{8R}} [y'^2 - (1 + x'^2)^2] \frac{dp'}{dx'}$$

۱- تعریف متغیرهای بدون بعد:

۲- با جایگذاری این متغیرها در پروفایل سرعت میتوان پروفایل سرعت بدون بعد را بدست آورد

## Pressure gradient

We may find an expression for the pressure gradient by using a mass balance

$$Q = 2 \int_0^h u_x dy = 2h(x) \left[ U - \frac{h^2(x)}{3\mu} \frac{dp}{dx} \right]$$

۱- با استفاده از معادله دبی جریان دو بعدی ابتدا دبی جریان را از انتگرال بست می آوریم

$$\frac{dp}{dx} = \frac{3\mu}{h^3(x)} \left( U - \frac{Q}{2h(x)} \right)$$

U=V

۲- گرادیان فشار را از معادله دبی بست می آوریم

$$\frac{dp'}{dx'} = \sqrt{\frac{18R}{H_0}} \frac{x'^2 - \lambda^2}{(1 + x'^2)^3}$$

جابجایی تابع استخوانه در معادله بالا

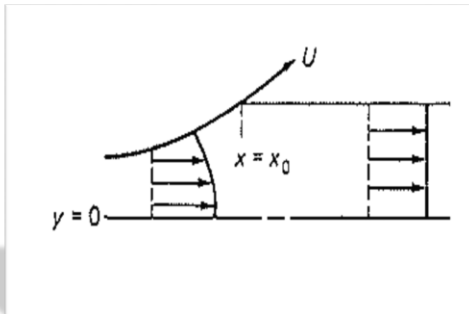
۳- فرم بدون بعد گرادیان فشار را بدست می آوریم

a dimensionless flow rate  $\lambda$  has been introduced, defined as

$$\lambda^2 = \frac{Q}{2UH_0} - 1$$

$$\lambda^2 = \frac{Q}{2UH_0} - 1$$

## Point of separation



separation of the sheet from the roll, i.e., at  $y = H$  and  $x = x_0$ .

Two simple assumption :

at  $x = x_0$ , the profile is flat.

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = 0 \text{ and } \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = 0,$$

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{dp'}{dx'} = 0 \text{ at } x' = x'_0$$

$$p' = 0 \text{ at } x' = x'_0$$

$$\frac{dp'}{dx'} = \sqrt{\frac{18R}{H_0}} \frac{x'^2 - \lambda^2}{(1 + x'^2)^3}$$

$$x'_0 = \lambda$$

## Mass balance on the sheet

$$\lambda^2 = \frac{Q}{2UH_0} - 1$$

$$Q = 2UH$$

$$\lambda^2 = \frac{H}{H_0} - 1$$

$$x'_0 = \lambda$$

- ۱- با این فرض که جرم خروجی در فشار عمودی صفر خارج شود دبی حجمی جریان خروجی توسط ضخامت لایه خروجی و سرعت جریان درگ یا همان سرعت چرخش غلظک ها محاسبه میشود
- ۲- از طرف دیگر با داشتن دبی و سرعت چرخش غلظکها میتوان ضخامت لایه خروجی را محاسبه و از آن  $x'_0 = \lambda$  را بدست آورد.

در فرایند کلندرینگ ( $\lambda$ ) یکی از مهمترین متغیر های عملیاتی محسوب میشود که توسط آن میتوان فاصله دو غلظک را در تولید ورقه با ضخامت دلخواه تعیین نمود.

دبی بی بعد را به فاصله بی بعد ربط میدهم

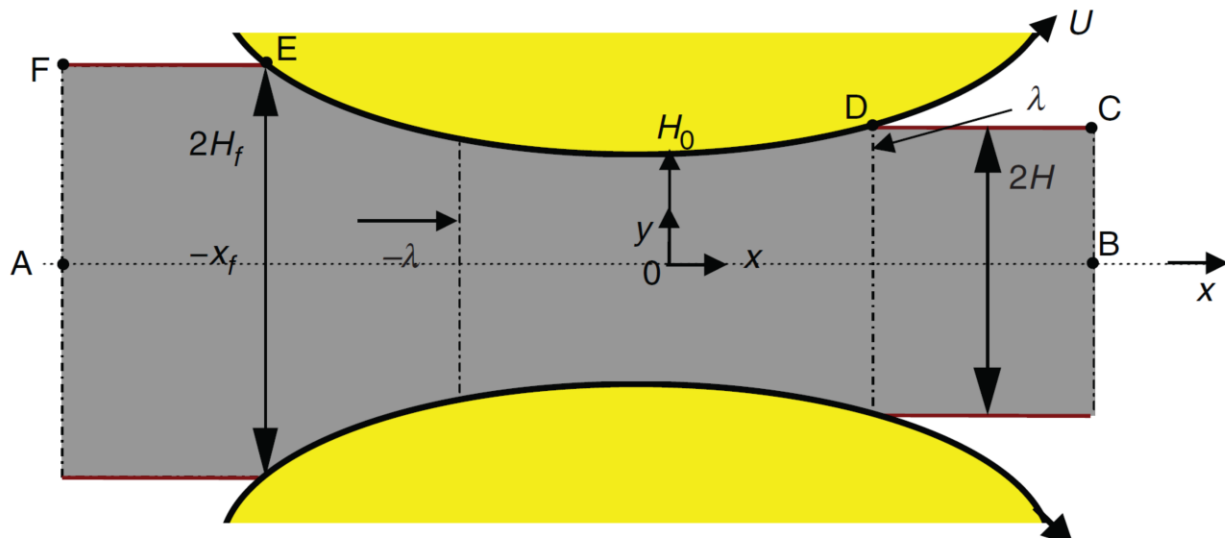
خروجی در لاندبا

خود لاندبا هم دبی بی بعد

پس حالا ارتباط این سه تا پارامتر رو بدست آوردیم



## کاربرد $\lambda$ در محاسبات عملیاتی



### Integrating of dimensionless pressure gradient

$$\frac{dp'}{dx'} = \sqrt{\frac{18R}{H_0} \frac{x'^2 - \lambda^2}{(1 + x'^2)^3}}$$

integrated with respect to  $x'$ .

▶ با انتگرال گیری از گرادیان فشار بدون بعد در نهایت تابع فشار بدون بعد بصورت تابعی از  $x'$  بدست می آید.

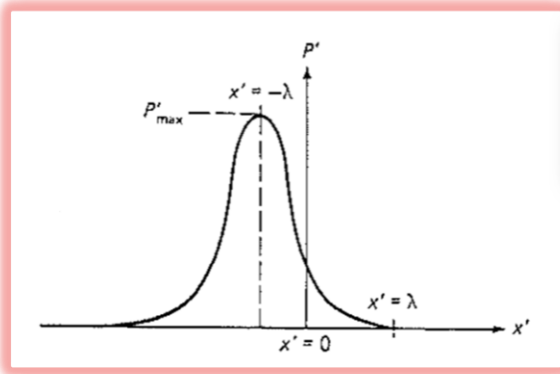
▶ شرایط مرزی نیز همچون قبل بدین صورت در نظر گرفته شده است  
 $p' = 0$  at  $x' = x'_0$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{dp'}{dx'} = 0 \quad \text{at } x' = x'_0$$

$$p' = \sqrt{\frac{9R}{32H_0}} \left[ \frac{x'^2(1 - 3\lambda^2) - 1 - 5\lambda^2}{(1 + x'^2)^2} x' + (1 - 3\lambda^2)(\tan^{-1} x' - \tan^{-1} \lambda) + \frac{1 + 3\lambda^2}{1 + \lambda^2} \lambda \right] \quad (7-24)$$

▶ **حل تحلیلی میدلمن:**

## Pressure distribution



pressure distribution

$$p' = \sqrt{\frac{9R}{32H_0}} \left[ \frac{x'^2(1-3\lambda^2) - 1 - 5\lambda^2}{(1+x'^2)^2} x' + (1-3\lambda^2)(\tan^{-1} x' - \tan^{-1} \lambda) + \frac{1+3\lambda^2}{1+\lambda^2} \lambda \right] \quad (7-24)$$

at  $x' = -\lambda$



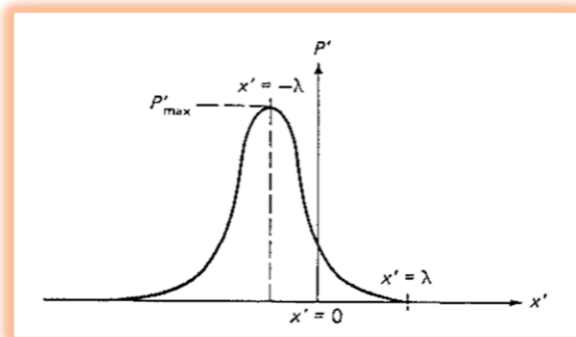
$$p'_{max} = \frac{3C(\lambda)}{2} \sqrt{\frac{R}{2H_0}}$$



$$C(\lambda) = \frac{1+3\lambda^2}{1+\lambda^2} \lambda - (1-3\lambda^2) \tan^{-1} \lambda$$

فشار ماكسيم در upstream

## The third value of $x'$



$$p' = \sqrt{\frac{9R}{32H_0}} \left[ \frac{x'^2(1-3\lambda^2) - 1 - 5\lambda^2}{(1+x'^2)^2} x' + (1-3\lambda^2)(\tan^{-1} x' - \tan^{-1} \lambda) + \frac{1+3\lambda^2}{1+\lambda^2} \lambda \right] \quad (7-24)$$

At  $x' = \lambda$  the vanishing gradient occurs at  $p' = 0$ .

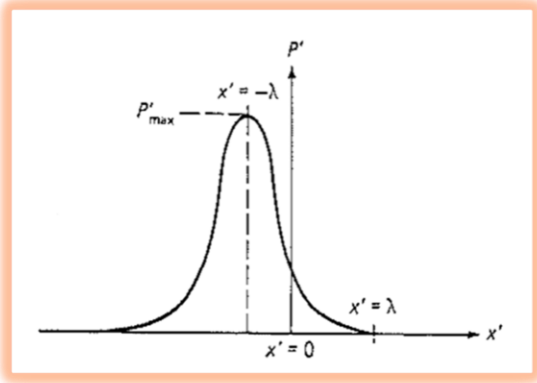
at  $x' = -\lambda$  the maxi

at  $x' = -\infty$

$$\frac{dp'}{dx'} = \sqrt{\frac{18R}{H_0}} \frac{x'^2 - \lambda^2}{(1+x'^2)^3}$$

$$p'(x' \rightarrow -\infty) = \sqrt{\frac{9R}{32H_0}} \left[ \frac{1+3\lambda^2}{1+\lambda^2} \lambda - (1-3\lambda^2) \left( \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \lambda \right) \right]$$

## Sheet thickness



$$p'(x' \rightarrow -\infty) = 0$$

$$\sqrt{\frac{9R}{32H_0} \left[ \frac{1+3\lambda^2}{1+\lambda^2} \lambda - (1-3\lambda^2) \left( \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \lambda \right) \right]}$$

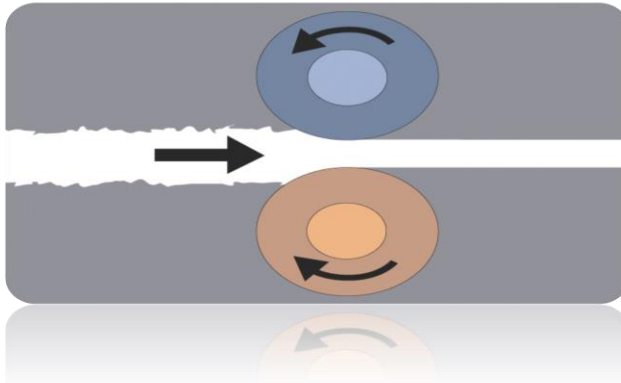
$$\frac{1+3\lambda^2}{1+\lambda^2} \lambda = (1-3\lambda^2) \left( \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \lambda \right) \rightarrow \lambda_0 = 0.475$$

$$\frac{H}{H_0} = 1 + \lambda_0^2 = 1.226$$

$$H = 1.226H_0 = 0.31 \text{ in}$$

and that the sheet thickness depends only on  $H_0$ .

## Sheet thickness



### ۱- در سیالات نیوتونی

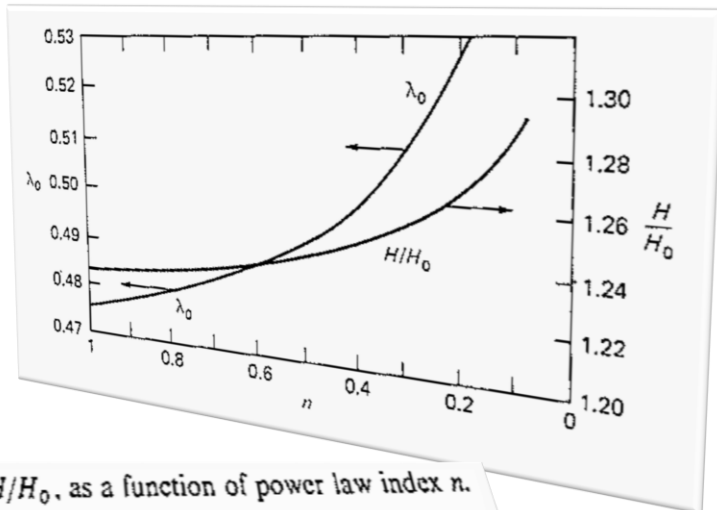
ضخامت لایه خروجی تنها تابع فاصله دو غلتک است

$$H = 1.226H_0 = 0.31 \text{ in}$$

۲- این تخمین تا حد زیادی در مورد دامنه وسیعی از سیالات پلیمری قابل قبول است و نتایج فوق با درصد کمی خطا برای بسیاری از مواد قابل بکارگیری می باشد.

۴- در مدل پاورلا با کاهش  $n$  ضخامت ورقه خروجی افزایش می یابد

## تأثیر n پاورلا پر ضخامت ورق خروجی



Calendered thickness, in terms of  $\lambda_0$  or  $H/H_0$ , as a function of power law index  $n$ .

## Velocity distribution $u(x,y)$

$$u'_x = 1 + \sqrt{\frac{H_0}{8R}} [y'^2 - (1 + x'^2)^2] \frac{dp'}{dx'}$$



$$\frac{dp'}{dx'} = \sqrt{\frac{18R}{H_0}} \frac{x'^2 - \lambda^2}{(1 + x'^2)^3}$$

۱- معادله گرادین فشار بی بعد را در معادله سرعت بی بعد قرار میدهیم

$$u_x(x, y)$$



$$u'_x = \frac{2 + 3\lambda^2(1 - \eta^2) - x'^2(1 - 3\eta^2)}{2(1 + x'^2)}$$

۲- با کمی دستکاری پروفایل سرعت بدون بعد را بصورت تابعی از  $x$  و  $y$  بیان میکنیم

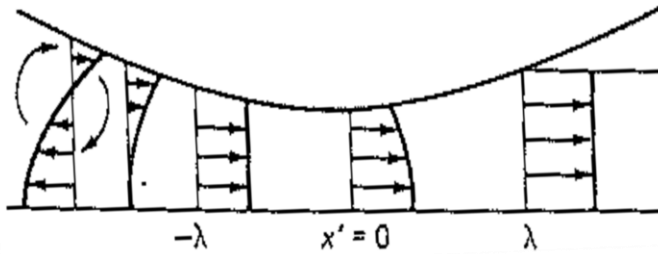
۳- در نهایت پروفایل سرعت بدون بعد توسط این معادله رسم میشود

$$\eta = y/h(x)$$

where  $y$  is now normalized to  $h(x)$  instead of to  $H_0$

$$u'_x = 1 + \sqrt{\frac{H_0}{8R}} [y'^2 - (1 + x'^2)^2] \frac{dp'}{dx'}$$

## Velocity profile



$$u'_x = \frac{2 + 3\lambda^2(1 - \eta^2) - x'^2(1 - 3\eta^2)}{2(1 + x'^2)}$$

$$\eta = y/h(x).$$

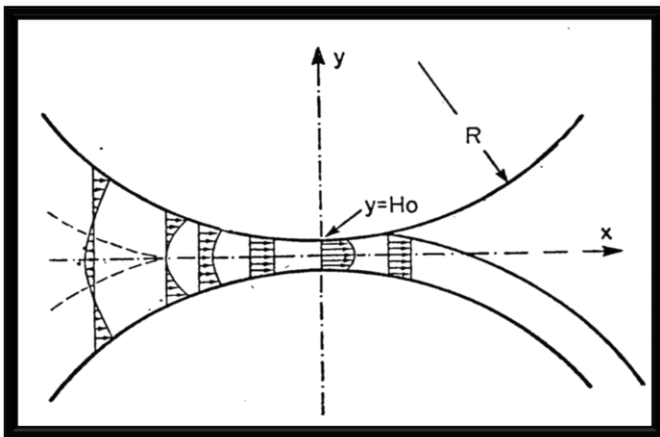
پروفایل سرعت در فاصله بین دو غلتک

the velocity gradient is positive ( $x' < \lambda$  in the newtonian case)

Flow pattern in the nip region.

the gradient is negative ( $x' > -\lambda$ ).

## Flow pattern in the nip



$$v_x^* = 1 + \frac{3}{2} \frac{(1 - y^{*2})(\lambda^2 - x^{*2})}{(1 + x^{*2})}$$

$$v_x^* = \frac{v_x}{V} \quad \text{and} \quad y^* = \frac{y}{H_0}$$

$$x^* = \frac{x}{\sqrt{2RH_0}}$$

## Pressure gradient

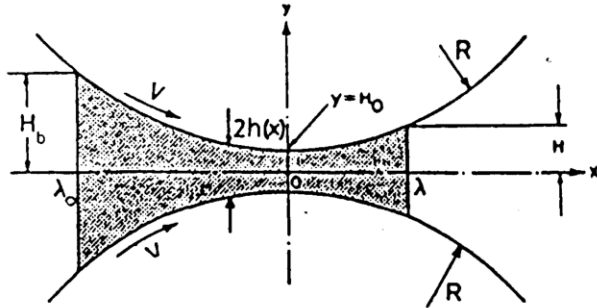


Figure 4. Notation for the lubrication flow analysis in the gap between two rotating rolls

$x^* = -\lambda$  is the point of maximum pressure.

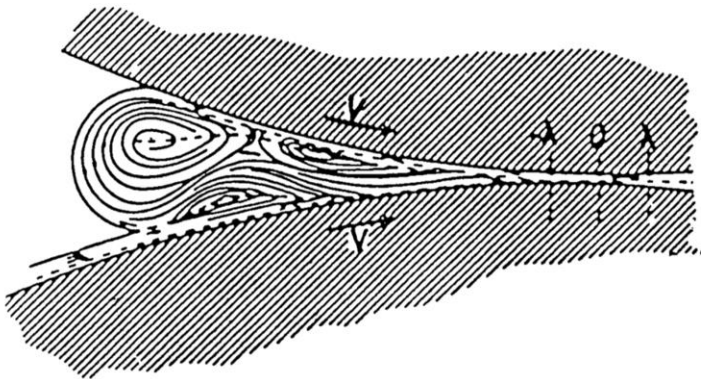
the pressure gradient is negative ( $-\lambda_0 < x^* < -\lambda$ ).

the pressure gradient is positive ( $-\lambda < x^* < \lambda$ )

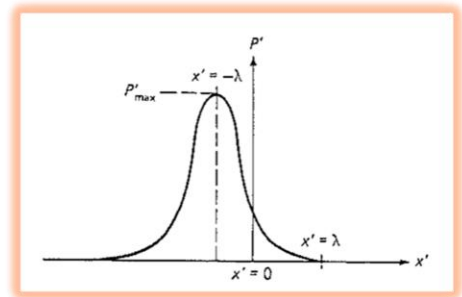
$$\frac{dp}{dx} = \frac{3\mu}{h^3(x)} \left( V - \frac{Q}{2h(x)} \right)$$

$$\frac{dp^*}{dx^*} = - \left( \frac{2n+1}{n} \right)^n \left( \frac{2R}{H_0} \right)^{1/3} \frac{(\lambda^2 - x^{*2})^{1/3} |\lambda^2 - x^{*2}|^{n-1}}{(1 + x^{*2})^{2n+1}}$$

## Flow pattern in the melt tank



Flow pattern in the melt tank



## نتیجه گیری



➤ کلندرینگ و کست رول اکستروژن  
روشهای اصلی تولید ورق پلیمری  
میباشند

▶ در این روش ضخامت لایه خروجی از بین  
دو غلطک همواره بیشتر از فاصله بین دو  
غلطک است

▶ ضخامت sheet خروجی تنها تابعی از  
فاصله دو غلطک است

▶ در پلیمرها با کاهش  $n$  پاور لا ضخامت  
sheet خروجی افزایش می یابد

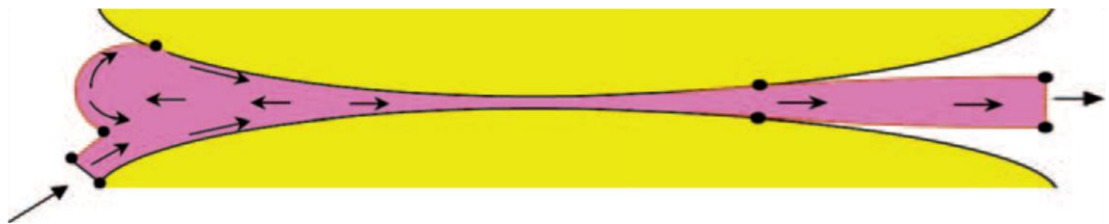
# reference

1. FUNDAMENTALS OF POLYMER PROCESSING. STANLEY MIDDLEMAN
2. FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER IN CALENDERING. J.VLACHOPOULOS AND E. MITSOULIS
3. PLASTIC ENGINEERING. R. J. CRAWFORD
4. POLYMER PROCESSING. TIM A. OSSWALD AND JUAN P. HERNANDEZ-ORTIZ
5. PRINCIPLES OF POLYMER PROCESSING. ZEHEV TADMOR
6. CALENDERING OF PLASTIC SHEETS\*\* BY Evan Mitsoulis\*
7. Finite Element Analysis of Calendering BY C. KIPARISSIDES and J. VLACHOPOULOS

## 8-SOME ISSUES ARISING IN FINDING THE DETACHMENT POINT IN CALENDERING OF PLASTIC SHEETS

Evan Mitsoulis\*

School of Mining Engineering & Metallurgy, National Technical University of Athens, Zografou, 157 80 Athens, Greece







# **Than Q FOR ATTENTION**

**ACKNOWLEDGMENT & GRATITUDE FROM DR. SAED BAZGIR**