Archive of SID

شبیه‌سازی فرایند اکستروژن فیلم دمشی: بررسی فرایندهای انتقال حرارت و تغییر شکل

Simulation of Extrusion Film Blowing Process: An Investigation on Heat Transfer and Deformation

حسین علی خنکدار، جلیل مرشدیان، محمود محراب‌زاده، عزیزالله نودهی
تهران، پژوهشگاه پلیمر ایران، صندوق پستی ۱۱۵-۱۴۹۶۵

دریافت: ۷۶/۲۰، ۷۸/۷۶، پذیرش: ۷۶/۵/۷۹

چکیده

برای درک بهتر فرایندهای انتقال حرارت و تغییر شکل در اکستروژن فیلم دمشی، مطالعات نظری و تجربی انجام شده و مدلسازی فرایند اکستروژن فیلم دمشی به وسیلهٔ حل معادلات موازنه انرژی و نیرو روی حباب دمیده شده در حال صعود صورت گرفته است. بررسیهای تجربی ناهمدما با استفاده از پلی‌اتیلن‌سبک انجام شده و پارامترهای عملیاتی اندازه‌گیری شده است. چهار معادله دیفرانسیلی غیرخطی پیچیده با استفاده از روش رانگ‌کاتای مرتبه پنجم به صورت عددی حل شده است. در این روش، با در نظرگرفتن اثر جاذبه روی فیلم صعودکننده دقت مضاعفی در محاسبات ایجاد شده و در نتیجه توافق نسبتا خوب نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی امکان استفاده از شبیه‌سازی یاد شده را در مقیاس صنعتی فراهم کرده است. با استفاده از مدل ریاضی می‌توان شکل حباب، نیم‌رخ دما و ضخامت فیلم را به صورت تابعی از فاصله در طول محور ماشین پیش‌بینی کرد.

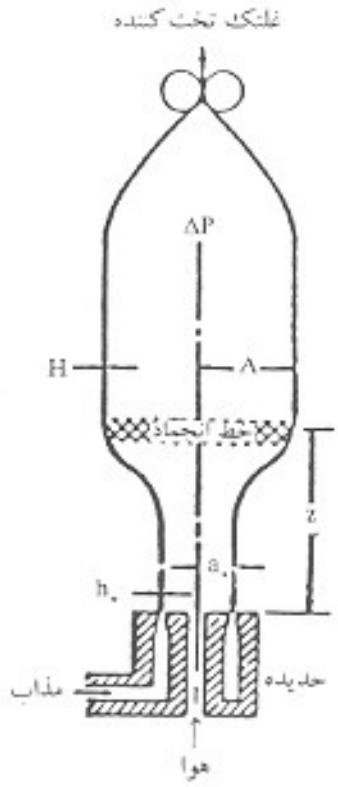
واژه‌های کلیدی: نسبت دمش، گرانروی کششی، اکستروژن فیلم دمشی، انتقال حرارت، تغیر شکل
Key Words: blow-up ratio, elongational viscosity, extrusion film blowing, heat transfer, deformation

مقدمه

تولید فیلم پلی‌اتیلن با چهتگیری مولکولی موردنظر به وسیله اکسترودر یک فرایند صنعتی متداول است که سالها موضوع پژوهشهای وسیعی بوده است [۴-۱]. در این فرایند پلیمر مذاب از میان یک حدیده حلقوی به صورت یک لوله جداره نازک اکسترود می‌شود. هوا از میان محور داخلی حدیده وارد شده و باعث باد شدن حباب و در نتیجه افزایش قطر آن می‌گردد. در فاصله‌ای بالاتر از حدیده، حباب خنک شده و سپس فیلم جامد شده میان غلتکهایی، که فیلم را بین حدیده و ناحیه کشنده می‌کشند، به صورت تخت در می‌آید. فرایند فیلم دمشی با وجود پیچیدگی فراوان از انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه‌ای در تولید فیلمهایی با خواص فیزیکی و مکانیکی متنوع برخوردار است [۵]. این‌فرایند نتیجه جهتیابی دو محوری حاصل از کشش محوری و کشش محیطی حباب است. دو پارامتر مشخصه فیلم تولیدی به شکل لوله عبارتند از: نسبت دمش، که نسبت قطرنهایی به قطر حدیده است و نسبت کاهش ضخامت، که نسبت ضخامت ماده اکسترود شده به ضخامت فیلم‌نهایی است.

مشخصه دیگر نسبت کشش در جهت ماشین است، که به صورت نسبت سرعت کشنده به سرعت مادهٔ اکسترود شده در حدیده تعریف می‌شود. برای مواد تراکم‌ناپذیر، این سه نسبت به وسیله قانون

www.SID.ir



شکل ۱ - تشکیل فیلم دمشی.

یقای جرم به هم مرتبط می‌شوند. هدف اصلی از تحلیل این فرایند ارائه روابطی بین این مشخصه‌های هندسی و شرایط عملیاتی نظیر فشار حباب، سرعت فیلم یا کشش در کشنده، شرایط دمایی که فیلم را منجمد می‌کند و خواص رئولوژیکی پلیمر است.

اساس نظری

چگونگی تشکیل فیلم دمشی در شکل ۱ نشان داده شده است که فرایندی عمومی برای تولید فیلم پلی‌اتیلن و سایر پلیمرهاست [۶،۷]. با توجه به شکل ۱ در ناحیه‌ای که شعاع حباب (a) و ضخامت فیلم (h) با جهت ماشین (z) تغییر می‌کند، برای بیان گرادیانهای سرعت در قالب جمله‌هایی شامل h،a و z فرضیات مطرح شده به وسیله پیرسون و پتری مورد استفاده گرفته است [۸]. فرض اصلی درمدلسازی فرایند، نازک بودن فیلم است ($\frac{h}{a} << 1$).

برای محاسبهٔ تنشها، مرسومترین روش درنظر گرفتن سیستم مختصاتی است که با سیال حرکت می‌کند. در شکل ۲ یک جزء از سیال در سیستم دکارتی نشان داده شده است که محور ξ_1 در جهت جریان (مماس بر فیلم)، ξ_2 عمود بر فیلم و ξ_3 در جهت عرضی (محیطی) است. همچنین، v_1، v_2 و v_3 اجزای سرعت در مختصات ξ_1، ξ_2 و ξ_3 است [۹].

پیرسون و همکارانش نشان دادند که گرادیان سرعت موضعی (e_{11}، e_{22} و e_{33}) به سرعت موضعی (v_1)، شعاع حباب (a) و ضخامت فیلم (h) به وسیله معادله‌های زیر مرتبط می‌شود که در آن θ زاویه انحراف از محور z و e_{11}، e_{22} و e_{33} به صورت زیر تعریف می‌شوند [۸]:

Archive of SID

$$e_{11}=\frac{\partial v_1}{\partial \xi_1}, \qquad e_{22}=\frac{\partial v_2}{\partial \xi_2}, \qquad e_{33}=\frac{\partial v_3}{\partial \xi_3} \qquad (۱)$$

$$e_{22}=\frac{1}{h}\frac{dh}{dt}=\frac{1}{h}\frac{dh}{d\xi_1}\frac{d\xi_1}{dt}=v_1\cos\theta\frac{1}{h}\frac{dh}{dz} \qquad (۲)$$

$$e_{33}=\frac{1}{a}\frac{da}{dt}=\frac{1}{a}\frac{da}{d\xi_1}\frac{d\xi_1}{dt}=v_1\cos\theta\frac{1}{a}\frac{dh}{dz} \qquad (۳)$$

از معادلهٔ پیوستگی داریم:

$$e_{11}+e_{22}+e_{33}=0 \qquad (۴)$$

همچنین e_{11} را می‌توان بر حسب جمله‌هایی شامل a و h به شکل زیر بیان کرد:

$$e_{11}=-(e_{22}+e_{33})=-v_1\cos\theta\left(\frac{1}{h}\frac{dh}{dz}+\frac{1}{a}\frac{da}{dz}\right) \qquad (۵)$$

v_1 نیز در جمله‌هایی شامل سرعت جریان Q، a و h به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d\xi_1}{dt}=v_1=\frac{Q}{2\pi ah} \qquad (۶)$$

با این تعریف، معادله‌های ۲، ۳ و ۵ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$e_{11}=-\frac{Q\cos\theta}{2\pi ah}\left(\frac{1}{a}\frac{da}{dz}+\frac{1}{h}\frac{dh}{dz}\right) \qquad (۷)$$

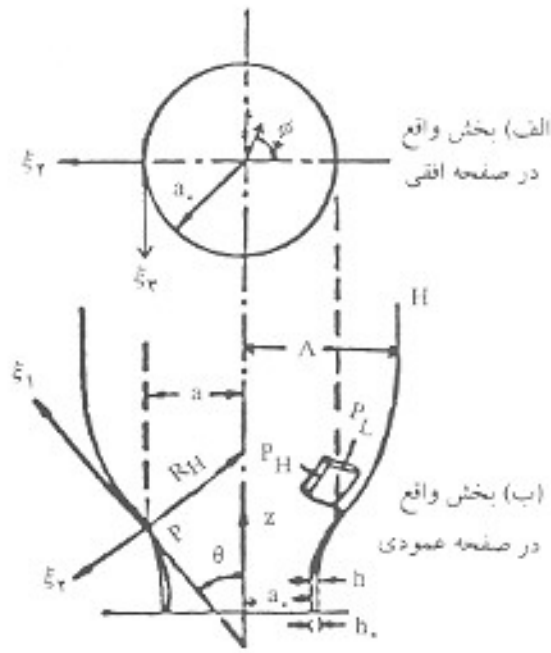
$$e_{22}=\frac{Q\cos\theta}{2\pi ah^2}\frac{dh}{dz} \qquad (۸)$$

$$e_{33}=\frac{Q\cos\theta}{2\pi a^2h}\frac{da}{dz} \qquad (۹)$$

اجزای تنش کل T_{ij} به صورت زیر بیان می‌شود [۹]:

$$T_{ij}=-P\delta_{ij}+\tau_{ij} \qquad (i,j=1,2,3) \qquad (۱۰)$$

www.SID.ir



شکل ۲ - جزئیات هندسی برای بسط معادلات مکانیکی.

که در آن P معرف فشار ایزوتروپیک (هیدروستاتیک)، δ_{ij} دلتای کرونکر (kronecker) و τ_{ij} نشان دهنده تنشهای برشی است.

با توجه به شکل ۲ فرض می‌شود که هیچ نیروی خارجی روی حباب اعمال نشده و نیروهای تنش سطحی نسبت به نیروهای گرانرو قابل چشمپوشی است (شرط مرزی)، بنابراین تنش عمود بر سطح آزاد ($T_{۲۲}$) به صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$T_{۲۲} = ۰ \qquad (۱۱)$$

با جایگزینی معادلهٔ ۱۱ در معادله ۱۰ داریم:

$$P = \tau_{۲۲} \qquad (۱۲)$$

برای سهولت، گرانروی کششی (η_B) در اکستروژن فیلم دمشی در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$\tau_{ij} = \eta_B(II)c_{ij} \qquad (i,j=۱،۲،۳) \qquad (۱۳)$$

که II اینواریانس (invariant) دوم از تنسور سرعت برش c به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$II = (c_{۱۱}^{۲} + c_{۲۲}^{۲} + c_{۳۳}^{۲}) \qquad (۱۴)$$

از جایگزینی معادلهٔ ۱۲ در معادله ۱۰ خواهیم داشت:

$$T_{۱۱} = \tau_{۱۱} - \tau_{۲۲} \qquad (۱۵)$$

$$T_{۳۳} = \tau_{۳۳} - \tau_{۲۲} \qquad (۱۶)$$

Archive of SID

که $T_{۱۱}$ و $T_{۳۳}$ به ترتیب تنش کششی در جهت جریان و در جهت عرضی (یعنی تنش hoop) است. همچنین، با جایگزینی معادلهٔ ۱۳ در معادله‌های ۱۵ و ۱۶ داریم:

$$T_{۱۱} = \eta_B(II)(c_{۱۱} - c_{۲۲}) \qquad (۱۷)$$

$$T_{۳۳} = \eta_B(II)(c_{۳۳} - c_{۲۲}) \qquad (۱۸)$$

بنابراین، گرانروی کششی در کشش دو محوری غیریکنواخت به صورت زیر بیان می‌شود [۹]:

$$\eta_B(II) = \frac{T_{۱۱}}{c_{۱۱} - c_{۲۲}} \qquad (۱۹)$$

$$\eta_B(II) = \frac{T_{۳۳}}{c_{۳۳} - c_{۲۲}} \qquad (۲۰)$$

که $c_{۱۱}$، $c_{۲۲}$ و $c_{۳۳}$ را از معادله‌های ۷، ۸ و ۹ می‌توان جایگزین کرد.

معادلات موازنه نیرو

با توجه به شکل ۲، موازنه نیرو روی فیلم به صورت زیر نوشته می‌شود [۹،۱۰]:

$$۲\pi a \cos\theta P_L + \pi\Delta P(A^{۲} - a^{۲}) + ۲\pi\rho g \int_z^Z ah \sec\theta \, dz = F_z \qquad (۲۱)$$

که a و A شعاعهای حباب در z و Z (خط انجماد)، h ضخامت فیلم در a، P_L نیرویی که در جهت جریان عمل می‌کند (یعنی جهت ماشین)، ΔP اختلاف فشار در سرتاسر فیلم، ρ چگالی مذاب، g شتاب جاذبه‌ای و F_z نیروی کششی در z=Z (یعنی در خط انجماد) است. کشش در یک نقطه z=L نزدیک غلتکهای گیراندازبه‌صورت‌زیربیان‌می‌شود[۹،۱۱،۱۲]:

$$F_z = F_L - ۲\pi\rho_s gAH(L-Z) \qquad (۲۲)$$

که F_L کشش واقعی اندازه‌گیری شده در Z=L، ρ_s چگالی فیلم جامد، A شعاع حباب در z=Z و H ضخامت فیلم در z=Z است.

www.SID.ir

در ناحیه‌ای که حباب باد می‌شود ($0 \le z \le Z$) نیرو در جهت عرضی P_H و جهت کشش P_L به صورت زیر موازنه می‌شود [۱۰،۱۱]:

$$\Delta P = \frac{P_L}{R_L} + \frac{P_H}{R_H} - \rho g h \sin\theta \qquad (۲۳)$$

که در آن R_L و R_H شعاعهای اصلی انحنای فیلم‌اند و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$R_H = \frac{a}{\cos\theta} \qquad (۲۴)$$

$$R_L = \frac{\sec^2\theta}{d^2a/dz^2} \qquad (۲۵)$$

به عبارت دیگر، P_L و P_H را می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۱۰-۱۲]:

$$P_L = \int_0^h T_{11}\,d\xi_2 = hT_{11} \qquad (۲۶)$$

$$P_H = \int_0^h T_{22}\,d\xi_2 = hT_{22} \qquad (۲۷)$$

تجزیه و تحلیل فرایند انتقال حرارت و تغییر شکل

عملیات در شرایط ناهمدما و سیال تابع قانون توانی در نظر گرفته می‌شود. برای یک سیال نیوتنی عمومی داریم [۱۰]:

$$\eta_B(II,T) = \eta_0 \exp\left[\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]\left[\frac{II}{2}\right]^{(n-1)/2} \qquad (۲۸)$$

که R ثابت گازها، E انرژی فعالسازی در جریان کششی، n ثابت ماده، η_0 گرانروی کششی در دمای مرجع T_0 و II ایواریانس دوم تنسور سرعت برش است. از این رو، T_{11} در معادله ۲۶ می‌تواند برحسب جمله‌هایی از η_B و اجزای تنسور سرعت برش بیان شود:

$$T_{11} = \eta_B(II,T)(e_{11}-e_{22}) \qquad (۲۹)$$

$$T_{22} = \eta_B(II,T)(e_{22}-e_{22})$$

بنابراین:

$$P_L = hT_{11} = -\frac{2\eta_B(II,T)Q\cos\theta}{2\pi a}\left[\frac{1}{a}\frac{da}{dz} + \frac{2}{h}\frac{dh}{dz}\right] \qquad (۳۰)$$

$$P_H = hT_{22} = -\frac{2\eta_B(II,T)Q\cos\theta}{2\pi a}\left[\frac{1}{a}\frac{da}{dz} - \frac{1}{h}\frac{dh}{dz}\right] \qquad (۳۱)$$

برای ساده‌سازی از یک مجموعه متغیرهای بدون بعد، که به صورت زیر تعریف می‌شوند، استفاده می‌کنیم:

$$r = \frac{a}{a_0}, \quad w = \frac{h}{a_0}, \quad x = \frac{z}{a_0}, \quad s = \frac{T}{T_0} \qquad (۳۲)$$

که در آن a_0 شعاع حباب در $z=0$ و T_0 دما در $z=0$ (یعنی در خروجی حدیده) است. معادلات ۲۱ و ۲۳ به کمک معادلات ۲۲، ۲۵، ۲۶ و ۳۰ و ۳۱ به صورت زیر نوشته می‌شوند [۱۱،۱۲]:

$$\frac{w'}{w} = -\frac{r'}{2r} - \frac{\eta_0[Tg + r^2B]\sec^2\theta}{4\eta_B(II,s)} \qquad (۳۳)$$

$$2r^2[Tg + r^2B]r'' = \frac{3r'\eta_B(II,s)}{\eta_0} + r\sec^2\theta[Tg - 3r^2B] \qquad (۳۴)$$

که در آن:

$$B = \frac{a_0^2\pi\Delta p}{Q\eta_0} \qquad (۳۵)$$

$$Tg = \frac{a_0}{Q\eta_0}[F_2 - 2\pi\rho g a_0^2\int_x^X r w \sec\theta\,dx] - B\left[\frac{A}{a_0}\right]^2 \qquad (۳۶)$$

$$X = \frac{Z}{a_0} \qquad (۳۷)$$

با توجه به شکل ۲، معادله هندسی زیر را می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{da}{dz} = \tan\theta \qquad (۳۸)$$

معادله بالا را می‌توان برحسب جمله‌هایی از متغیرهای بدون بعد به صورت زیر نوشت:

$$r' = \tan\theta \qquad (۳۹)$$

$$r'' = \sec^2\theta\,\theta' \qquad (۴۰)$$

با جایگزینی معادلات ۳۹ و ۴۰ در معادله ۳۴ داریم:

$$2r^2[Tg + r^2B]\theta' = \frac{3\sin 2\theta\,\eta_B(II,s)}{\eta_0} + r[Tg - 3r^2B] \qquad (۴۱)$$

در معادلات بالا w'، r' و θ' مشتقات مرتبه اول w، r و θ بر حسب x است.

جمله $\eta_B(II,s)$ به صورت تابعی از متغیرهای بدون بعد به

Archive of SID
www.SID.ir

صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta_B(\Pi,s)=\alpha e^{\beta s}[\frac{Q\cos\theta}{2\pi a_0^2}]^{n-1}[\frac{1}{rw}]^{n-1}[(\frac{w'}{w})^2+(\frac{r'}{r})^2+(\frac{r'w'}{rw})]^{n-1/2} \qquad (42)$$

که α و β به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\alpha=\eta_0 e^{-E/RT_0}, \qquad \beta=\frac{E}{RT_0} \qquad (43)$$

معادلهٔ موازنهٔ انرژی

موازنهٔ انرژی روی فیلم به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۳-۱۱]:

$$\rho C_p v_1 \frac{\partial T}{\partial \xi_1}=\frac{\partial q}{\partial \xi_2} \qquad (44)$$

که ρ چگالی سیال و C_p ظرفیت گرمایی ویژه، v_1 سرعت در جهت ξ_1 (مطابق شکل ۲) و q شار گرمایی در جهت ξ_2 است.

با ضرب کردن طرفین معادله در $\delta\xi_2$ و انتگرال‌گیری از $\xi_2=0$ تا $\xi_2=h$ داریم:

$$\rho C_p \frac{Q\cos\theta}{2\pi a}\frac{dT}{dz}=U(T-T_a)+\lambda\varepsilon(T^4-T_a^4) \qquad (45)$$

که در سطح درونی $\xi_2=0$ داریم:

$$q=0 \qquad (46)$$

و در سطح بیرونی $\xi_2=h$ داریم:

$$q=U(T-T_a)+\lambda\varepsilon(T^4-T_a^4) \qquad (47)$$

در معادله ۴۵ از معادلات زیر استفاده شده است:

$$\frac{\partial T}{\partial \xi_1}=\frac{dT}{dz}\frac{dz}{d\xi_1}=\frac{dT}{dz}\cos\theta \qquad (48)$$

$$v_1=\frac{Q}{2\pi ah} \qquad (49)$$

که U ضریب انتقال حرارت کلی، λ ثابت استفان ـ بولتزمن، ε ضریب انتشار، T_a دمای محیط و Q سرعت جریان حجمی است.

معادله ۴۵ را به صورت زیر می‌توان نوشت [۱۴،۱۵]:

$$s'=rD\sec\theta\,(S-S_a)+rE\sec\theta\,(S^4-S_a^4) \qquad (50)$$

که در آن، s دمای بدون بعد است که به وسیله معادله ۳۲ تعریف می‌شود و s' مشتق s نسبت به x است. D و E پارامترهای بدون بعدند که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۴،۱۵]:

$$D=[T_0^3\lambda\varepsilon]/[\frac{\rho C_p Q T_0}{2\pi a_0^2}], \qquad (51)$$

$$E=[T_0^4\lambda\varepsilon]/[\frac{\rho C_p Q T_0}{2\pi a_0^2}]$$

Archive of SID

روش حل معادلات حاکم در شبیه‌سازی فرایند فیلم دمشی

به منظور شبیه‌سازی فرایند ناهمدمای فیلم دمشی یک سیال غیرنیوتنی تابع قانون توانی، باید معادلات ۳۳، ۳۹، ۴۱ و ۵۰ به کمک معادلات ۳۶ و ۴۲ حل شوند. با توجه به تأثیرپذیری شدید متغیرها از یکدیگر، حل دسته معادلات دیفرانسیل ـ انتگرال بالا از پیچیدگی فراوانی برخوردار است.

در این پژوهش، معادلات یاد شده به روش حدس و خطا و به صورت معکوس یعنی از شرایط

$$x=X=\frac{Z}{a_0}, \quad r=\frac{A}{a_0}, \quad w=\frac{H}{a_0}, \quad s=\frac{T_S}{T}, \quad \theta=0 \qquad (53)$$

تا

$$x=0, \quad r=1, \quad w=\frac{h_0}{a_0}, \quad s=1, \quad \theta=\theta_0 \qquad (52)$$

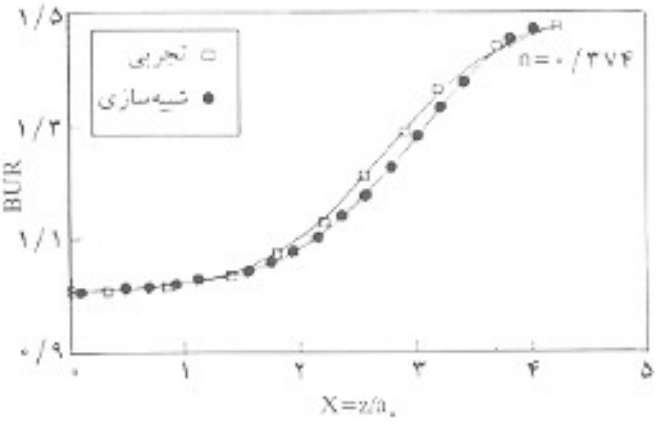
و با چشمپوشی از اثر جاذبه در محاسبه T_g، انتگرال گیری شده‌اند. در مراحل بعدی با منظور کردن اثر جاذبه در محاسبات، مقدار T_g اولیه تصحیح می‌گردد.

تجربی

بررسیهای تجربی ناهمدمای فیلم دمشی با استفاده از پلی‌اتیلن سبک مورد مطالعه قرار گرفت. برای این کار بعد از تنظیم شرایط فرایند فیلم دمشی، پارامترهای عملیاتی نظیر اختلاف فشار، دما و نیروی کششی اندازه‌گیری شده است. اختلاف فشار با استفاده از یک فشارسنج آب متصل به هوای ورودی به حدیده اندازه‌گیری شده است.

h_0 ضخامت حباب در $z=0$ (خروج از حدیده) است که در واقع برابر تفاوت قطر خارجی و قطر داخلی حدیده است. h ضخامت

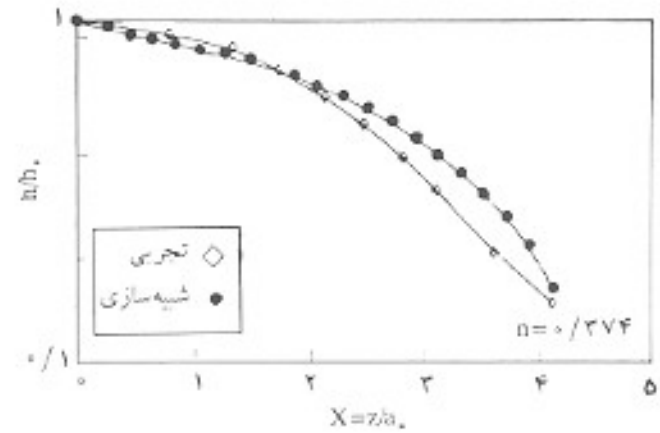
www.SID.ir



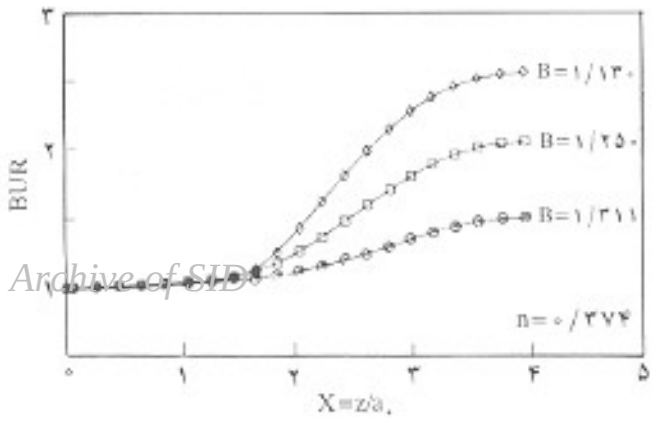
شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند فیلم دمشی با نتایج تجربی بدست آمده برای شکل حباب (T_a = ۲۰۰ °C, dp = ۰/۰۰۷۱ psi, Q = ۸/۰ Vg/s)

حباب از خروجی حدیده تا خط انجماد است. A جایی است که تغییرات شعاع حباب مشاهده نمی‌شود. برای اندازه‌گیری این متغیرها، دستگاه اکسترودر و کشنده همزمان خاموش می‌شود. در این حالت حباب در حال حرکت به سمت بالا سریعا متوقف می‌شود. به کمک بادی که از پیرامون به قسمت خارجی حباب می‌خورد حباب خنک شده و در نتیجه با کاردک این حباب از خروجی حدیده بریده می‌شود. سپس، ضخامت تا خط انجماد که نقطه ثابت‌شدن شعاع حباب است اندازه‌گیری می‌شود. همچنین، از نمونه بریده‌شده تغییرات شعاع معین می‌شود، جایی که تغییرات شعاع وجود ندارد در واقع A همانجاست.

ثابتهای مواد مورد نیاز در این شبیه سازی (η_0, n) از دستگاه رئومتر مویین (منحنیهای گرانروی بر حسب سرعت برش ($\dot{\gamma}$) در دماهای



شکل ۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند فیلم دمشی با نتایج تجربی بدست آمده برای ضخامت فیلم (T_a = ۲۰۰ °C, dp= ۰/۰۰۷۱ psi, Q= ۸/۰ Vg/s)



Archive of SID

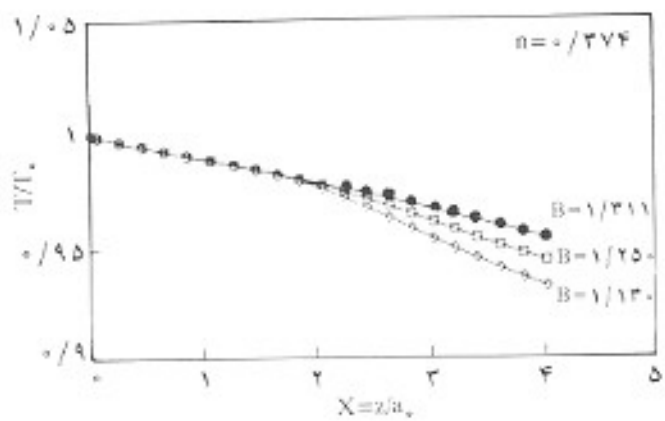
شکل ۵- اثر تغییرات B روی شکل حباب (V_L/V_a = ۴/۰۸, T_a = ۲۰۰ °C, Q= ۸/۰ Vg/s)

مختلف) بدست آمده و چگالی فیلم، ρ_0، با استفاده از یک ستون آب ـ الکل معین شده است.

نتایج و بحث

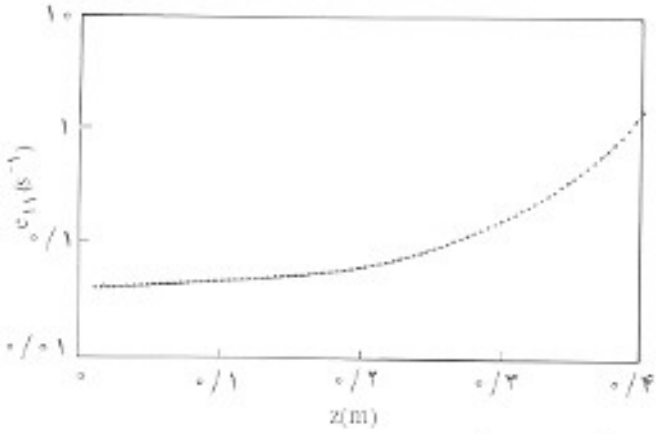
با شبیه‌سازی انجام شده براساس مدل ریاضی ارائه شده برای فرایند فیلم دمشی می‌توان شکل حباب، نیم رخ ضخامت فیلم و دما را براساس متغیرهای عملیاتی نظیر اختلاف فشار (ΔP) و نسبت کشش V_L/V_a پیش‌بینی کرد.

شکل ۳ تغییرات شکل حباب بر حسب فاصله از محور حدیده (خروجی حدیده تا خط انجماد) را در کنار نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از شبیه سازی

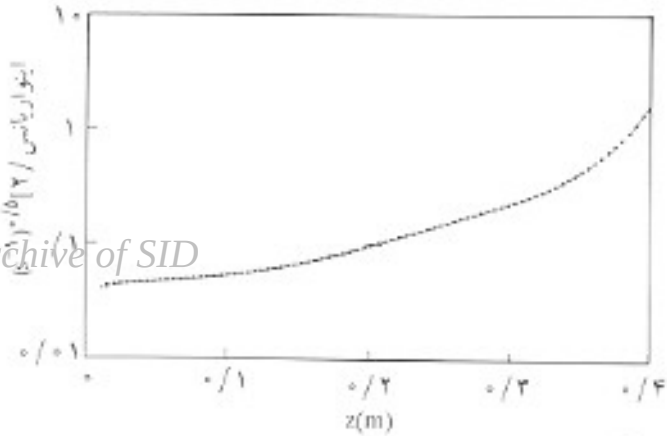


شکل ۶- اثر تغییرات B روی شکل نیم‌رخ دما (V_L/V_a = ۴/۰۸, T_a = ۲۰۰ °C, Q= ۸/۰ Vg/s)

www.SID.ir



شکل ۷ ـ تغییر گرادیان سرعت موضعی برحسب فاصله از حدیده.



شکل ۸ ـ سرعت کشش برحسب فاصله از حدیده.

Archive of SID

با داده‌های تجربی دارای توافق خوبی است.

شکل ۴ تغییرات ضخامت فیلم بر حسب فاصله از محور حدیده را در کنار نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد. اختلاف جزئی در شکل ناشی از خطای اندازه‌گیری تجربی است.

شکل ۵ اثر تغییرات B (پارامتر اختلاف فشار) را بر شکل حباب در جهت محور حدیده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این پارامتر به مقدار B بسیار حساس است و بر خلاف انتظار با افزایش B، حباب کوچکتر می‌شود. دلیل این امر موازنه نیروی کشش سطحی با فشار هوای درون حباب است که باقانون لاپلاس ($\Delta P = \frac{\sigma}{a}$) بیان می‌شود. بنابراین، با افزایش فشار (B) شعاع حباب کاهش می‌یابد.

شکل ۶ اثر B را بر نیم‌رخ دمای فیلم در جهت محور حدیده نشان می‌دهد. با افزایش B ،شعاع حباب کاهش می‌یابد که در نتیجه دمای نهایی فیلم افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۷ تغییرگرادیان سرعت موضعی در جهت محوری را بر حسب فاصله از محور حدیده نشان می‌دهد.با افزایش فاصله از محور و اعمال نیروی کشش، گرادیان سرعت موضعی در جهت محور طولی حدیده افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۸ سرعت کشش بر حسب فاصله از محور حدیده را برای کشش دو محوری غیر یکنواخت نشان می‌دهد.با توجه به شکل، با افزایش فاصله محوری (یعنی جهت ماشین) سرعت کشش افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

برای درک بهتر فرایندهای انتقال حرارت و تغییرشکل در اکستروژن فیلم دمشی مطالعات نظری و تجربی انجام گرفته است. مدلسازی فرایند اکستروژن فیلم دمشی به وسیله حل معادلات موازنه نیرو و انرژی روی حباب دمیده شده در حال حرکت به سمت بالا صورت گرفته است. معادلات غیر خطی پیچیده حاصل از معادلات موازنه نیرو و انرژی با استفاده از روش رن کاتای مرتبه پنجم به صورت عددی حل شده‌است. تحلیل انتقال حرارت فرایند فیلم دمشی، به صورت ناهمدما بررسی شده است که درک بهتری از فرایند را نسبت به حالت همدما نشان می‌دهد. علاوه‌براین، در نظرگرفتن اثر جاذبه بر فیلم صعودکننده دقت مضاعفی در محاسبات ایجاد کرده است و در نتیجه توافق نسبتاً خوب نتایج حاصل از شبیه سازی با داده‌های تجربی امکان استفاده از مدلسازی یاد شده را در مقیاس صنعتی فراهم می‌سازد.

برای فهم بهترگرادیان سرعت موضعی و سرعت کشش که با حافظه کشسان در نمونه فیلم قابل انقباض به کمک گرما ارتباط مستقیم دارند، این پارامترها نیز بر حسب فاصله از محور حدیده بررسی شده‌اند.

علائم و نشانه‌ها

A شعاع حباب در Z

a شعاع حباب در z

a_0 شعاع حباب در $z = 0$

C_p ظرفیت گرمایی ویژه

E انرژی فعالسازی

T_{ij} اجزای تنش کل

v_{11} گرادیان سرعت موضعی v_1

v_{22} گرادیان سرعت موضعی v_2

v_{33} گرادیان سرعت موضعی v_3

F_L نیروی کششی واقعی در $Z = L$

www.SID.ir

F_z نیروی کششی در $z=Z$

g شتاب جاذبه‌ای

H ضخامت فیلم در Z

h ضخامت فیلم در z

n ثابت ماده

P فشار ایزوتروپیک (هیدروستاتیک)

$P_\perp$ نیرو در جهت جریان

$P_{//}$ نیرو در جهت عرضی

Q سرعت جریان حجمی

q شار حرارتی در جهت ξ_2

R ثابت گازها

$R_\perp, R_{//}$ شعاعهای اصلی انحنای فیلم

S دمای بدون بعد

v_1 سرعت در جهت ξ_1

T_{11} تنش کششی در جهت جریان

v_2 سرعت در جهت ξ_2

T_{22} تنش کششی در جهت عرضی

v_3 سرعت در جهت ξ_3

T_s دما در $z = 0$

Π اینواریانس دوم از تنسور سرعت برش

η_0 گرانروی کششی

T_a دمای محیط

$\frac{V_L}{V_0}$ نسبت کشش

η_s گرانروی کششی در دمای T_s

U ضریب انتقال حرارت کلی

z فاصله فیلم مذاب از حدیده تا خط انجماد

Z فاصله خط انجماد از حدیده

θ زاویهٔ انحراف از محور z

δ_{ij} دلتای کرونکر (Kronecker)

τ_{ij} تنشهای برشی

ΔP اختلاف فشار در کل فیلم

ρ چگالی مذاب (سیال)

ρ_s چگالی فیلم جامد

λ ثابت استفان ـ بولتزمن

ε ضریب انتشار

مراجع

1. White J.L. and Spruiell J.E.; *Polym. Eng. Sci.*; **23**, 5, 247, 1983.
2. Gilbert M., Hemsley D.A. and Patel S.A.; *British Poly. J.*; 19, 1987.
3. Pazur R.J. and Prudhomme R.E.; *Macromolecules*; **29**, 119, 1996.
4. Yu T. H. and Wilkes G.L.; *Polymer*; **37**, 21, 4675, 1996.
5. White L. and Spruiell E.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **25**, 2777, 1980.
6. Chandran P. and Jabarin S.; *Adv. Polym. Tech.*; **12**, 2, 119-65, 1993.
7. Pearson J.R.A. and Petrie C.J.S., *Mechanical Principles of Polymer Processing*, Pergamon, Oxford, 1966.
8. Han C. D. and Park J.Y.; *J. Appl. Polym. Sci.*; **29**, 3257, 1975.
9. Pearson J.R.A. and Petrie C.J.S.; *Plast. Polym.*; **38**, 85, 1970.
10. Bird R. B., Armstorng R.C. and Hassager O., *Dynamics of Polymer Liquids, Fluid Mechanics*, 1. 2nd ed., Wiley, New York, 1987.
11. Middleman S., *Fundamentals of Polymer Processing*, McGraw-Hill, 1977.
12. J.R.A. Pearson and S.M. Richardson, *Computational Analysis of Polymer Processing*, Applied Science, London and New York, 1983.
13. White J. L. and Cakmak M.; *Adv. Polym. Tech.*; **8**, 1, 27, 1988.
14. Kanai T. and White J.L.; *Polym. Eng. Sci.*; **24**, 1185, 1984.
15. Kanai T. and White J.L.; *J. Polym. Eng.*; **5**, 135, 1985.
16. Baird D.G. and Collias D.I.; *Polymer Processing*; John Wiley & Sons, 1998.

Archive of SID

www.SID.ir