

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 ۱۱۵-۱۴۹۹۵

دریافت: ۷۸/۱۶/۲۰، پذیرش: ۷۹/۵/۱۶

چکیده

برای درک بهتر فرایندهای انتقال حرارت و تغییر شکل در اکستروژن فیلم دمش، مطالعات نظری و تجربی انجام شده و مدل‌سازی فرایند اکستروژن فیلم دمش به وسیله حل معادلات موازنه انرژی و نیرو روی حباب دمیده شده در حال صعود صورت گرفته است. بررسیهای تجربی ناهم‌ما با استفاده از پلی اتیلن سبک انجام شده و پارامترهای عملیاتی اندازه‌گیری شده است. چهار معادله دیفرانسیلی غیرخطی پیچیده با استفاده از روش ران کاناوی مرتبه پنجم به صورت عددی حل شده است. در این روش، با در نظر گرفتن اثر جاذبه روی فیلم صعودکننده دقت مضاعفی در محاسبات ایجاد شده و در نتیجه نتایج نسبتاً خوب شایع 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، گراژی کششی، اکستروژن فیلم دمش، انتقال حرارت، تغییر شکل

Key Words: blow-up ratio, elongational viscosity, extrusion film blowing, heat transfer, deformation

مقدمه

وجود پیچیدگی فراوان از انعطاف‌پذیری قابل ملاحظه‌ای در تولید فیلمهایی با خواص فیزیکی و مکانیکی متنوع برخوردار است [۵]. این فرایند نتیجه جبهه‌ای 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 قطر نهایی به قطر حدیده است و نسبت کاهش ضخامت، که نسبت ضخامت ماده اکستروژد شده به ضخامت فیلم نهایی است.

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

تولید فیلم پلی اتیلن یا جهتگیری مولکولی مورد نظر به وسیله اکستروژر 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 اکستروژد 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 دمش یا

که ξ_2 و ξ_3 است [۹]

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

$$c_{11} = \frac{\partial v_1}{\partial \xi_1}, \quad c_{22} = \frac{\partial v_2}{\partial \xi_2}, \quad c_{33} = \frac{\partial v_3}{\partial \xi_3} \quad (1)$$

$$c_{22} = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{1}{h} \frac{dh}{d\xi_1} \frac{d\xi_1}{dt} = v_1 \cos \theta \frac{1}{h} \frac{dh}{dz} \quad (2)$$

$$c_{33} = \frac{1}{a} \frac{da}{dt} = \frac{1}{a} \frac{da}{d\xi_1} \frac{d\xi_1}{dt} = v_1 \cos \theta \frac{1}{a} \frac{da}{dz} \quad (3)$$

از معادله پیوستگی داریم:

$$c_{11} + c_{22} + c_{33} = 0 \quad (4)$$

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

$$c_{11} = -(c_{22} + c_{33}) = -v_1 \cos \theta \left(\frac{1}{h} \frac{dh}{dz} + \frac{1}{a} \frac{da}{dz} \right) \quad (5)$$

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

$$\frac{d\xi_1}{dt} = v_1 = \frac{Q}{\pi a h} \quad (6)$$

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

$$c_{11} = -\frac{Q \cos \theta}{\pi a h} \left(\frac{1}{a} \frac{da}{dz} + \frac{1}{h} \frac{dh}{dz} \right) \quad (7)$$

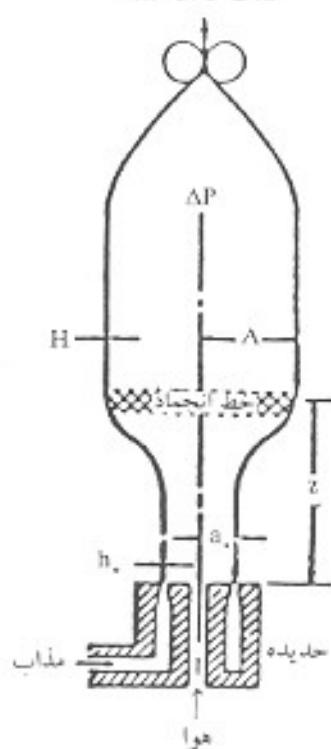
$$c_{22} = \frac{Q \cos \theta}{\pi a h^2} \frac{dh}{dz} \quad (8)$$

$$c_{33} = \frac{Q \cos \theta}{\pi a^2 h} \frac{da}{dz} \quad (9)$$

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

$$T_{ij} = -P \delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (10)$$

فلنک تخت کننده



شکل ۱- تشکیل فیلم دمشی.

بقای 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 a، h و z فرضیات مطرح شده به وسیله پیرسون و پتری مورد استفاده گرفته است [۸]. فرض اصلی در مدلسازی فرایند، نازک بودن فیلم است $(\frac{h}{a} \ll 1)$.

برای محاسبه نشتها، مرسومترین روش در نظر 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 (معاس بر فیلم)، ξ_2 عمود بر فیلم و ξ_3 در جهت عرضی (محیطی) است. همچنین، v_1 و v_2 و v_3 اجزای سرعت در مختصات

از جایگزینی معادله ۱۲ در معادله ۱۰ خواهیم داشت:

$$T_{11} = \tau_{11} - \tau_{22} \quad (15)$$

$$T_{22} = \tau_{33} - \tau_{22} \quad (16)$$

که T_{11} و T_{33} به ترتیب تنش کششی در جهت جریان و در جهت عرضی (یعنی تنش hoop) است. همچنین، با جایگزینی معادله ۱۳ در معادله های ۱۵ و ۱۶ داریم:

$$T_{11} = \eta_B(\Pi)(\epsilon_{11} - \epsilon_{22}) \quad (17)$$

$$T_{33} = \eta_B(\Pi)(\epsilon_{33} - \epsilon_{22}) \quad (18)$$

بنابراین، گرانیروی کششی در کشش دو محوری غیریکواخت به صورت زیر بیان می شود [۹]

$$\eta_B(\Pi) = \frac{T_{11}}{\epsilon_{11} - \epsilon_{22}} \quad (19)$$

$$\eta_B(\Pi) = \frac{T_{33}}{\epsilon_{33} - \epsilon_{22}} \quad (20)$$

که ϵ_{11} ، ϵ_{22} و ϵ_{33} را از معادله های ۷، ۸ و ۹ می توان جایگزین کرد.

معادلات موازنه نیرو

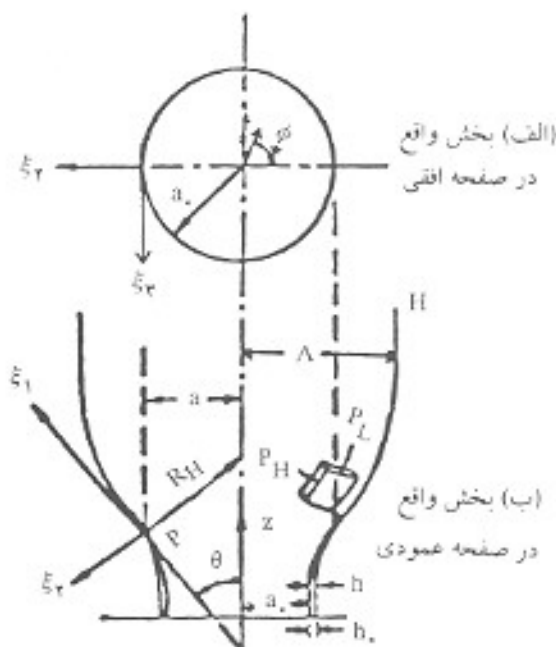
با توجه به شکل ۲، موازنه نیرو روی فیلم به صورت زیر نوشته می شود [۹، ۱۰]

$$\tau_{33} \cos \theta P_L + \pi \Delta P (A^2 - a^2) + \tau_{33} \rho g \int_z^Z ah \sec \theta dz = F_z \quad (21)$$

که a و A شعاعهای حباب در z و Z (خط انجماد)، h ضخامت فیلم در z ، P_L نیرویی که در جهت جریان عمل می کند (یعنی جهت ماشین)، ΔP اختلاف فشار در سرتاسر فیلم، ρ چگالی مذاب، g شتاب جاذبه ای و F_z نیروی کششی در $Z=L$ (یعنی در خط انجماد) است. کشش در یک نقطه $z=L$ نزدیک غلتکهای گیرانداز، به صورت زیر بیان می شود [۹، ۱۱، ۱۲]:

$$F_z = F_L - 2\pi \rho_s g A H (L - Z) \quad (22)$$

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



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 می شود که هیچ نیروی خارجی روی حباب اعمال نشده و نیروهای تنش سطحی نسبت به نیروهای گرانیروی قابل چشمپوشی است (شرط مرزی)، بنابراین تنش عمود بر سطح آزاد (T_{22}) به صورت زیر نتیجه می شود:

$$T_{22} = 0 \quad (11)$$

با جایگزینی معادله ۱۱ در معادله ۱۰ داریم:

$$P = \tau_{22} \quad (12)$$

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

$$\tau_{ij} = \eta_B(\Pi) \epsilon_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (13)$$

که Π اینواریانس (invariant) دوم از تانسور سرعت برش ϵ به صورت زیر تعریف می شود [۹]:

$$\Pi = (\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2 + \epsilon_{33}^2) \quad (14)$$

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

$$r = \frac{a}{a_0}, \quad w = \frac{h}{a_0}, \quad x = \frac{z}{a_0}, \quad s = \frac{T}{T_0} \quad (31)$$

که در آن a شعاع جاب در $x=0$ و T_0 دما در $z=0$ (یعنی در خروجی حدیده) است. معادلات ۲۱ و ۲۳ به کمک معادلات ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ به صورت زیر نوشته می‌شوند [۱۱، ۱۲]:

$$\frac{w'}{w} = -\frac{r'}{r} - \frac{\eta_0 [Tg + r^2 B] \sec^2 \theta}{4\eta_B(H,s)} \quad (32)$$

$$r^2 [Tg + r^2 B] r'' = \frac{r^2 \eta_B(H,s)}{\eta_0} + r \sec^2 \theta [Tg - 3r^2 B] \quad (33)$$

که در آن:

$$B = \frac{a^2 \pi \Delta p}{Q \eta_0} \quad (34)$$

$$Tg = \frac{a_0}{Q \eta_0} [F_z - \pi \rho g a_0^2 \int_x^X r w \sec^2 \theta dx] - B \left[\frac{a}{a_0} \right]^2 \quad (35)$$

$$X = \frac{Z}{a_0} \quad (36)$$

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

$$\frac{da}{dz} = \tan \theta \quad (37)$$

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

$$r' = \tan \theta \quad (38)$$

$$r'' = \sec^2 \theta r' \quad (39)$$

با جایگزینی معادلات ۳۸ و ۳۹ در معادله ۳۳ داریم:

$$r^2 [Tg + r^2 B] \theta' = \frac{r \sin^2 \theta \eta_B(H,s)}{\eta_0} + r [Tg - 3r^2 B] \quad (40)$$

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

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

در ناحیه‌ای که جاب باد می‌شود ($0 \leq z \leq Z$) نیرو در جهت عرضی P_{II} و جهت کشش P_L به صورت زیر موازنه می‌شود [۱۰، ۱۱]:

$$\Delta P = \frac{P_L}{R_L} + \frac{P_{II}}{R_{II}} - \rho g h \sin \theta \quad (41)$$

که در آن R_L و R_{II} شعاعهای اصلی انحای فیلم‌اند و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$R_{II} = \frac{a}{\cos \theta} \quad (42)$$

$$R_L = \frac{\sec^2 \theta}{d^2 a / dz^2} \quad (43)$$

به عبارت دیگر، P_L و P_{II} را می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۱۰-۱۲]:

$$P_L = \int_0^h T_{11} d\xi_r = h T_{11} \quad (44)$$

$$P_{II} = \int_0^h T_{\theta\theta} d\xi_r = h T_{\theta\theta} \quad (45)$$

تجزیه و تحلیل فرایند انتقال حرارت و تغییر شکل

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

$$\eta_B(H,T) = \eta_0 \cdot \text{EXP} \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \left[\frac{H}{\eta_0} \right]^{(n-1)/n} \quad (46)$$

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

$$T_{11} = \eta_B(H,T) (\dot{c}_{11} - \dot{c}_{22}) \quad (47)$$

$$T_{\theta\theta} = \eta_B(H,T) (\dot{c}_{\theta\theta} - \dot{c}_{r\theta})$$

بنابراین:

$$P_L = h T_{11} = -\frac{\eta_B(H,T) Q \cos \theta}{2\pi a} \left[\frac{1}{a} \frac{da}{dz} + \frac{r}{h} \frac{dh}{dz} \right] \quad (48)$$

$$P_{II} = h T_{\theta\theta} = -\frac{\eta_B(H,T) Q \cos \theta}{2\pi a} \left[\frac{1}{a} \frac{da}{dz} - \frac{r}{h} \frac{dh}{dz} \right] \quad (49)$$

$$s' = rD \sec \theta (S - S_0) + rE \sec \theta (S^F - S_0^F) \quad (50)$$

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]:

$$D = [UT_0] / \left[\frac{\rho C_p Q T_0}{\gamma \pi a^2} \right] \quad (51)$$

$$E = [T_0^F \lambda \epsilon] / \left[\frac{\rho C_p Q T_0}{\gamma \pi a^2} \right]$$

روش حل معادلات حاکم در شبیه‌سازی فرایند فیلم دمشی

به منظور شبیه‌سازی فرایند ناهمدمای فیلم دمشی یک سیال غیرنیوتنی تابع قانون توانی، باید معادلات ۲۳، ۳۹، ۴۱ و ۵۰ به کمک معادلات ۳۶ و ۴۲ حل شوند. با توجه به تأثیرپذیری شدید متغیرها از یکدیگر، حل دسته معادلات دیفرانسیل - 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

$$x = X = \frac{Z}{a_0}, \quad r = \frac{\Lambda}{a_0}, \quad w = \frac{H}{a_0}, \quad s = \frac{T_0}{T_0}, \quad \theta = 0 \quad (52)$$

تا

$$x = 0, \quad r = 1, \quad w = \frac{h_0}{a_0}, \quad s = 1, \quad \theta = \theta_0 \quad (53)$$

و با چشمپوشی از اثر جاذبه در محاسبه T_0 ، انتگرال گیری شده‌اند. در مراحل بعدی با منظور کردن اثر جاذبه در محاسبات، مقدار T_0 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_0 ضخامت

صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta_B(\Pi, s) = \alpha \epsilon \beta s \left[\frac{Q \cos \theta}{\gamma \pi a^2} \right]^{n-1} \left[\frac{1}{rw} \right]^{n-1} \left[\left(\frac{w'}{w} \right)^2 + \left(\frac{r'}{r} \right)^2 + \left(\frac{r' w'}{rw} \right)^{2(n-1)/n} \right] \quad (42)$$

که α و β به صورت زیر تعریف می‌شوند:

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

معادله موازنه انرژی

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

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

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_1 است.

با ضرب کردن طرفین معادله در $\delta \xi_1$ و انتگرال‌گیری از $\xi_1=0$ تا $\xi_1=h$ داریم:

$$\rho C_p \frac{Q \cos \theta}{\gamma \pi a} \frac{dT}{dz} = U(T - T_0) + \lambda \epsilon (T^F - T_0^F) \quad (45)$$

که در سطح درونی $\xi_1=0$ داریم:

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

و در سطح بیرونی $\xi_1=h$ داریم:

$$q = U(T - T_0) + \lambda \epsilon (T^F - T_0^F) \quad (47)$$

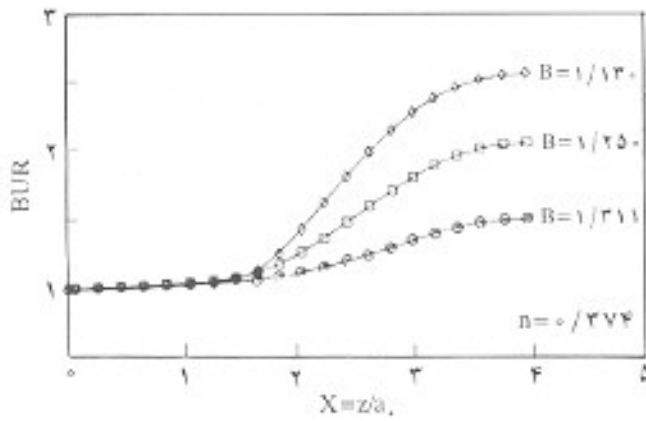
در معادله ۴۵ از معادلات زیر استفاده شده است:

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

$$v_1 = \frac{Q}{\gamma \pi a h} \quad (49)$$

که U ضریب انتقال حرارت کلی، λ ثابت استفان - بولتزمن، ϵ ضریب انتشار، T_0 دمای محیط و Q سرعت جریان حجمی است.

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



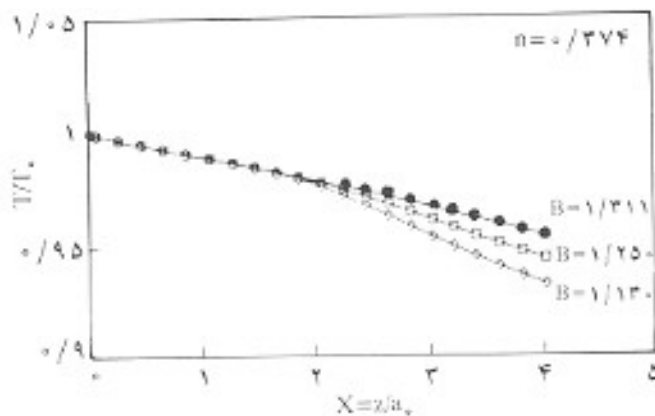
شکل ۵- اثر تغییرات B روی شکل حباب، $(V_L/V_\infty = 4/0.8, T_c = 200^\circ C, Q = 8/0.7 \text{ g/s})$

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

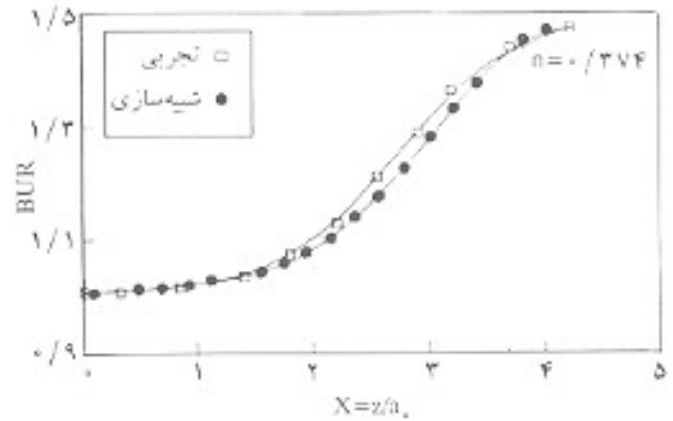
نتایج و بحث

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

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



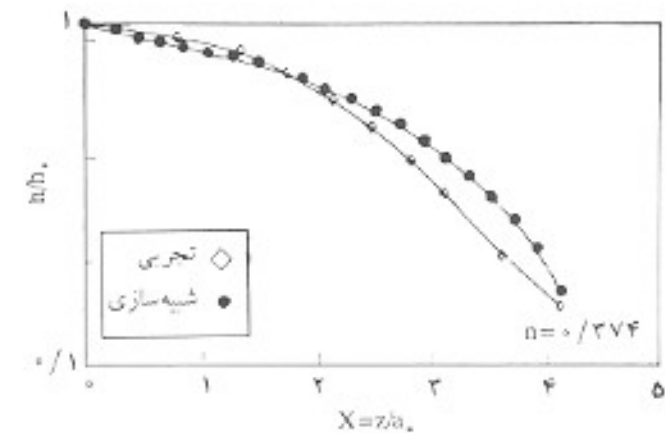
شکل ۶- اثر تغییرات B روی شکل نیم‌رخ دما، $(V_L/V_\infty = 4/0.8, T_c = 200^\circ C, Q = 8/0.7 \text{ g/s})$



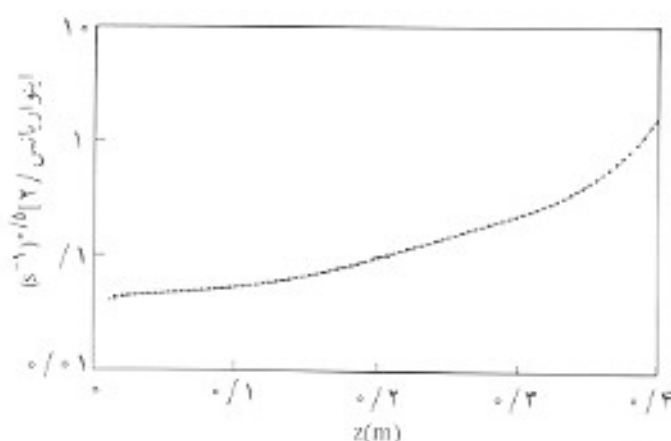
شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند فیلم دمش با نتایج تجربی بدست آمده برای شکل حباب $(T_c = 200^\circ C, dp = 0/0.071 \text{ psi}, Q = 8/0.7 \text{ g/s})$

حباب از خروجی جدیده 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 سریعاً متوقف می‌شود. به کمک بادی که از پیرامون به قسمت خارجی حباب می‌خورد حباب خشک شده و در نتیجه با کاردک این حباب از خروجی جدیده بریده می‌شود. سپس، ضخامت تا خط انجماد که نقطه ثابت شدن شعاع حباب است اندازه‌گیری می‌شود. همچنین، از نمونه بریده‌شده تغییرات شعاع معین می‌شود، جایی که تغییرات شعاع وجود ندارد در واقع A همانجاست.

تابتهای مواد مورد نیاز در این شبیه‌سازی (ρ_f, ρ) از دستگاه رنومتر موین (منحنیهای گرانروی بر حسب سرعت برش $\dot{\gamma}$) در دماهای



شکل ۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند فیلم دمش با نتایج تجربی بدست آمده برای ضخامت فیلم، $(T_c = 200^\circ C, dp = 0/0.071 \text{ psi}, Q = 8/0.7 \text{ g/s})$



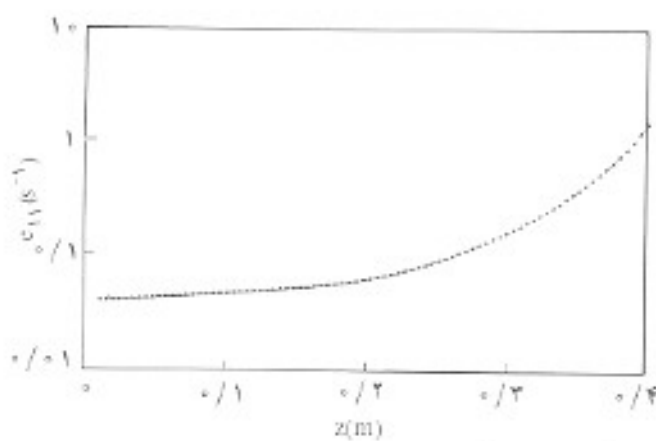
شکل ۸- سرعت کشش بر حسب فاصله از حدیده.

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 ران کاتای مرتبه پنجم به صورت عددی حل شده است. تحلیل انتقال حرارت فرایند فیلم دمشی، به صورت ناهمدمای بررسی شده است که درک بهتری از فرایند را نسبت به حالت همدمای نشان می‌دهد. علاوه بر این، در نظر گرفتن اثر جاذبه بر فیلم صعودکننده دقت مضاعفی در محاسبات ایجاد کرده است و در نتیجه توافق نسبتاً خوب نتایج حاصل از شبه‌سازی با داده‌های تجربی امکان استفاده از مدل‌سازی پاد شده را در مقیاس صنعتی فراهم می‌سازد.

برای فهم بهتر گرادیان 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
- a₀ شعاع حباب در z = 0
- C_p ظرفیت گرمایی ویژه
- E انرژی فعال‌سازی
- T₀ اجرای تنش کل
- v₁ گرادیان سرعت موضعی
- v₂ گرادیان سرعت موضعی
- v₃ گرادیان سرعت موضعی
- F_L نیروی کششی واقعی در Z = L



شکل ۷- تغییر گرادیان سرعت موضعی بر حسب فاصله از حدیده.

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 با قانون لاپلاس ($\Delta P = \frac{2\sigma}{r}$) بیان می‌شود. بنابراین، با افزایش فشار (B) شعاع حباب کاهش می‌یابد. شکل ۶ اثر B را بر نیم‌رخ دمایی فیلم در جهت محور حدیده نشان می‌دهد. با افزایش B، شعاع حباب کاهش می‌یابد که در نتیجه دمایی نهایی فیلم افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۷ تغییر گرادیان 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 یکواخت 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 تغییر شکل در اکستروژن فیلم دمشی مطالعات نظری و تجربی انجام گرفته است. مدل‌سازی فرایند

مراجع

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

- F_r نیروی کششی در $Z=Z_0$
 ξ شتاب جاذبه‌ای
 H ضخامت فیلم در Z_0
 h ضخامت فیلم در Z
 n ثابت ماده
 P فشار ایزوتروپیک (هیدروستاتیک)
 P_0 نیرو در جهت جریان
 P_1 نیرو در جهت عرضی
 Q سرعت جریان حجمی
 q شار حرارتی در جهت z_0
 R ثابت گازها
 R_1, R_2 شعاعهای اصلی انحناي فیلم
 S دمای بدون بعد
 U_1 سرعت در جهت z_0
 T_{11} تنش کششی در جهت جریان
 U_2 سرعت در جهت z_1
 T_{22} تنش کششی در جهت عرضی
 U_3 سرعت در جهت z_2
 T_z دما در $z = 0$
 Π ابوابریانس دوم از تئور سرعت برش
 η_{II} گراتروی کششی
 T_0 دمای محیط
 $\frac{V_1}{V_0}$ نسبت کشش
 η گراتروی کششی در دمای T_0
 U ضریب انتقال حرارت کلی
 x فاصله فیلم مذاب از حدیده تا خط انجماد
 Z فاصله خط انجماد از حدیده
 θ زاویه انحراف از محور z
 δ_{ij} دلتای کرونکر (Kronecker)
 τ_{ij} تنشهای برشی
 AP اختلاف فشار در کل فیلم
 ρ چگالی مذاب (سیال)
 ρ_s چگالی فیلم جامد
 λ ثابت استفان - بولتزمن
 ϵ ضریب انشمار