

ارزیابی آرایش یافتگی الیاف در لوله‌های تولیدی با استفاده از سامانه حديد چرخان

Evaluation of Fibers Orientation in Pipes Produced by Rotating Die System

مهرداد کوبی^{۱*}، فاطمه هادی^۱، آرش جعفریان^۱، غلامحسین لیاقت^۲

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، ۱- بخش مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر،

۲- بخش مهندسی مکانیک، گروه مهندسی طراحی کاربردی، صندوق پستی ۱۴۱۱۵/۱۴۳

دریافت: ۸۴/۷/۱۳، پذیرش: ۸۵/۷/۱۵

چکیده

کیفیت تولید لوله به وسیله اکستروژن و مقدار خروجی از اکستروژر تا حد زیادی به طراحی حديد بستگی دارد. تولید لوله با استفاده از اکستروژن با حديد ثابت به علت آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری در راستای محوری و بوجود آمدن خط جوش ناشی از وجود بازوهای نگهدارنده کاری غیرعلمی است و لوله‌های تولیدی فاقد استحکام لازم در جهت محیطی هستند. یکی از روشهای بکار رفته برای کنترل خواص نهایی لوله‌های پلیمری، کاهش اثر خط جوش و تولید لوله‌های مقاوم در جهت محیطی، استفاده از سامانه حديد چرخان است. در این نوع حديد عضو داخلی، خارجی یا هر دو می‌چرخند. ساختار ساده حديد چرخان به شکل دو استوانه هم مرکز که یکی یا هر دو آنها قابلیت چرخیدن دارند، در نظر گرفته می‌شود. سیال از فضای بین دو استوانه در اثر اختلاف فشار $\Delta P/L$ جریان می‌یابد و به طور همزمان در برش ناشی از حرکت چرخشی استوانه‌ها قرار می‌گیرد. در این پژوهش، برای توصیف رفتار سیال در حالت غیرنیوتنی از مدل قانون توان استفاده شده است. جریان سیال غیر نیوتنی و آرایش یافتگی الیاف در حديد لوله‌ای شکل با استفاده از روش جزء محدود از جنبه نظری بررسی شده است. سپس، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی آرایش یافتگی الیاف، مقایسه شده است. این مقایسه به وضوح بیانگر صحت این موضوع است که بردار سرعت برآیند عامل کنترل کننده آرایش یافتگی است.

واژه‌های کلیدی

استحکام محیطی، حديد چرخان، روش جزء محدود، خط جوش، لوله پلاستیکی

مقدمه

می‌شود که تنش محیطی دو برابر تنش محوری است. این موضوع بدان معناست که لوله باید در جهت محیطی استحکام بیشتری نسبت به جهت محوری داشته باشد. بنابراین، تولید لوله با استفاده از حديد ثابت غیرعلمی است و لوله‌های تولیدی فاقد استحکام لازم هستند [۱-۳].

در تولید لوله‌های پلیمری با استفاده از حديد ثابت، زنجیرهای پلیمری در جهت محوری آرایش یافته، در نتیجه استحکام محصول در این راستا افزایش و در جهت محیطی کاهش می‌یابد، در حالی که با عبور سیال از درون لوله، دو تنش محوری و محیطی در لوله ایجاد

Key Words

hoop strength, rotating die, finite element method, weld line, plastic pipe,

شد [۲]. همچنین، تولید لوله‌های مستحکم پلی اتیلن با چگالی زیاد به وسیله سامانه حدیده با عضو داخلی چرخان انجام شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد انتخاب درست دما، فشار و سرعت چرخش مقاومت محیطی را تا ۹۰ MPa افزایش می‌دهد [۶].

هدف از این بررسی، تحلیل جریان مارپیچ (helical flow) پلیمرهای گرمانرم در سامانه حدیده چرخان است. معادلات در حالت نیوتنی و غیرنیوتنی با استفاده از روش تحلیل عددی مناسب، یعنی روش جزء محدود حل شده است. برای توصیف رفتار سیال در حالت غیرنیوتنی، از مدل قانون توان استفاده شده است. سپس، نتایج با داده‌های آزمایشگاهی زاویه آرایش یافتگی الیاف، مقایسه شده است.

مدل سازی و تحلیل عددی

جریان در حدیده چرخان به دو نوع تقسیم می‌شود. جریان محوری (axial flow) که به واسطه اختلاف فشار در حدیده ایجاد می‌شود و جریان مماسی (tangential drag flow) که ناشی از چرخش عضو داخلی، خارجی یا چرخش هر دو عضو است. ترکیب جریان محوری و مماسی موجب ایجاد جریان مارپیچ در حدیده می‌شود. ساختار ساده حدیده چرخان به شکل دو استوانه هم‌مرکز که یکی یا هر دو آنها قابلیت چرخیدن دارند، در نظر گرفته می‌شود. سیال از فضای بین دو استوانه در اثر اختلاف فشار، جریان می‌یابد و به طور همزمان تحت برش ناشی از حرکت چرخشی استوانه‌ها قرار می‌گیرد. در فرضیات بکار رفته برای مدل سازی، جریان کاملاً توسعه یافته، آرام، پایدار و همدمای فرض می‌شود و در این حالت رفتار رئولوژی سیال به کمک قانون توان مطابق معادله (۳) توصیف می‌شود:

$$\eta = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (3)$$

در این معادله K شاخص پایداری جریان، n شاخص قانون توان و η گرانروی است. در این حالت معادلات حاکم بر جریان به شکل زیر است:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) = 0 \quad (4)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) = 0 \quad (5)$$

$$\tau_{rz} = \eta \frac{\partial u}{\partial r} \quad (6)$$

$$\tau_{r\theta} = \eta r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) \quad (7)$$

مطالعات زیادی روی تولید لوله با استفاده از حدیده چرخان انجام شده است. استفاده از حدیده چرخان باعث افزایش آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری در راستای محیطی، توزیع خطوط جوش ناشی از وجود نگهدارنده‌های عضو داخلی در مقطع لوله و افزایش مقاومت لوله می‌شود. این مسأله در مورد لوله‌های تقویت شده با الیاف نیز بهتر مشهود است. در اکستروژن با حدیده ثابت، الیاف در جهت محور اکستروژر آرایش می‌یابند. اما در اثر چرخش حدیده، الیاف زاویه‌ای با جهت محوری می‌سازد که بستگی به سرعت چرخش حدیده، همچنین بزرگی جریان محوری دارد. در مورد آرایش زنجیرهای پلیمری دو نظریه وجود دارد:

کلیمرن (Cleerman) در سال ۱۹۷۶ در فرایند تزریق ادعا کرد که آرایش زنجیرهای پلیمری تابع براین تنشهای برشی است. همین ادعا را ورث (Worth) و همکارانش نیز بیان کردند. آنها اعتقاد داشتند که زاویه‌ای که الیاف در هر نقطه با جهت محوری می‌سازد برابر است با:

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{\tau_{xy}}{\tau_{yz}} \right) \quad (1)$$

که τ_{xy} تنش برشی در جهت چرخش در آن نقطه و τ_{yz} تنش برشی در جهت محوری در نقطه مورد نظر است [۴].

در سال ۱۹۸۱ ادعا شد که این نظریه در مورد فرایند اکستروژن قابل قبول نیست و آرایش زنجیرهای پلیمری و الیاف در هر نقطه تابع براین سرعتهای مماسی و محوری در نقطه مورد نظر است. یعنی:

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{v_x}{v_z} \right) \quad (2)$$

که در این معادله v_x سرعت در جهت چرخش و v_z سرعت در جهت محوری در نقطه مورد نظر است.

تحلیل جریان مارپیچ در حدیده چرخان برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ انجام شد. برای بررسی رفتار مذاب به کمک مدل قانون توان فرض شد که پلیمر مذاب بین دو صفحه موازی جریان دارد [۴]. با استفاده از مدل قانون توان و فرض حرکت مذاب بین دو صفحه موازی رفتار سیال در حدیده چرخان توصیف شد [۴].

در پژوهشی جریان مارپیچ سیال ویسکوالاستیک در حدیده چرخان با استفاده از مدل لیانوف بررسی و با نتایج تجربی مربوط به پلی پروپیلن مقایسه شد [۵].

با طراحی حدیده با عضو خارجی چرخان، مطالعاتی روی لوله‌های PVC انجام و از قانون توان نیز استفاده شد [۱]. با استفاده از مدل لیانوف، نحوه آرایش زنجیرها در ضخامت لوله‌های پلیمری تولیدی پیش بینی

در این معادله‌ها v^* سرعت مماسی بدون بعد، u^* سرعت محوری بدون بعد، r_i شعاع داخلی و R شعاع خارجی است. همان‌طور که مشخص است، معادله‌های ذکر شده به هندسه حدیده و پارامترهای رئولوژی وابسته نیستند [7]. در معادله‌ها، v^* سرعت بدون بعد در جهت شعاعی و u^* سرعت بدون بعد در جهت محوری است. برای مذاب پلیمری زنجیرهای پلیمر در هر نقطه تحت تأثیر دو مولفه v^* و u^* هستند. در این حالت می‌توان زاویه θ را از معادله (۲) بدست آورد.

از آنجا که u^* روی محیط استوانه برابر صفر است و چرخش استوانه‌ها خلاف جهت یکدیگر است، $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ قرار می‌گیرد. همچنین، اگر مذاب پلیمری که در حدیده چرخان جریان دارد دارای الیاف کوتاه باشد، زاویه آرایش یافتگی الیاف از معادله (۲) بدست می‌آید که می‌تواند با نتایج تجربی مربوط به آرایش یافتگی الیاف به وسیله پراش پرتو X مقایسه شود. مدل‌سازی در حالت نیوتنی به طور تحلیلی امکان‌پذیر است، اما در حالت غیر نیوتنی از روش تحلیل عددی مناسب، یعنی روش جزء محدود، استفاده شده است. در این حالت مسأله یک مرتبه برای حالت $n=1$ با استفاده از روش جزء محدود حل می‌شود و نتایج با داده‌های بدست آمده از حل تحلیلی معادله‌ها در حالت نیوتنی مقایسه شده است که نتایج حل تحلیلی در حالت $n=1$ به شکل زیر است:

$$v^* = \frac{1}{1 - (\Omega_i/\Omega_0)} r^* - \frac{1}{1 - (1/k)^2} (r^* - \frac{1}{r^*}) \quad (19)$$

$$u^* = -\frac{1}{\xi} \frac{dp^*}{dz^*} (1 - r^{*2}) + \frac{1 - k^2}{\ln(1/k)} \ln r^* \quad (20)$$

تحلیل عددی

حل عددی با استفاده از روش جزء محدود انجام می‌شود. در اینجا از روش جزء محدود گالرکین استفاده شده است. این روش چهار مرحله، گسسته‌سازی دامنه، نوشتن معادلات جزء (برای همه اجزای موجود در مش)، سرهم کردن معادلات و بدست آوردن معادلاتی برای کل مسأله و وارد کردن شرایط مرزی در معادلات کلی و حل معادلات سرهم بندی شده را شامل می‌شود. در حل این مسأله از تعداد ده جزء درجه دو (سه گره) استفاده شده است. تعداد کل گره‌های موجود ۲۱ گره است. برای هر جزء مثل جزء ۵ ابتدا شکل انتگرال وزنی و شکل ضعیف معادلات (۱۴) و (۱۵) نوشته می‌شود. اصولاً روش جزء محدود گالرکین بر مبنای تقریب جواب استوار است. در این روش جواب چند جمله‌ای به شکل زیر است [۸]:

در این معادله‌ها τ_{rz} تنش برشی در جهت محوری، $\tau_{r\theta}$ تنش برشی در جهت چرخش، u سرعت محوری و v سرعت مماسی است. با تعریف گروهای بدون بعد می‌توان معادله‌های کلی تری بدست آورد:

$$r^* = \frac{r}{R} \quad (8)$$

$$z^* = \frac{z}{R} \quad (9)$$

$$v^* = \frac{v}{R(\Omega_0 - \Omega_i)} \quad (10)$$

$$u^* = \frac{u}{R(\Omega_0 - \Omega_i)} \quad (11)$$

$$p^* = \frac{p}{k(\Omega_0 - \Omega_i)^2} \quad (12)$$

$$\gamma^* = \frac{\gamma}{\Omega_0 - \Omega_i} \quad (13)$$

با قرار دادن پارامترهای بدون بعد در معادله‌های (۴) و (۵):

$$-\frac{\partial p^*}{\partial z^*} + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^* \frac{\partial u^*}{\partial r^*} [\gamma^*]^{n-1}) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{1}{r^{*2}} \frac{\partial}{\partial r^*} (r^{*3} \frac{\partial}{\partial r^*} (\frac{v^*}{r^*}) [\gamma^*]^{n-1}) = 0 \quad (15)$$

$$\gamma^* = \sqrt{[r^* \frac{\partial}{\partial r^*} (\frac{v^*}{r^*})]^2 + (\frac{\partial u^*}{\partial r^*})^2} \quad (16)$$

شرایط مرزی بدون بعد نیز عبارت است از:

$$v^* = k \frac{\Omega_i/\Omega_0}{1 - \Omega_i/\Omega_0}, u^* = 0 \quad @ r^* = k \quad (17)$$

$$v^* = \frac{\Omega_0}{\Omega_0 - \Omega_i}, u^* = 0 \quad @ r^* = 1 \quad (18)$$

$$k = \frac{r_i}{R} \quad kr < r \leq R$$

با معادله (۲۳) یعنی حرکت در جهت Z که جریانی فشاری است ظاهر می‌شود ولی در معادله حرکت در جهت θ که جریانی برشی است ظاهر نمی‌شود. انتگرالهای k_{ij} و \bar{k}_{ij} با استفاده از روش گوس محاسبه می‌شوند. بعد از محاسبه ماتریس سفتی و بردار بار برای هر جزء، معادله‌های (۳۰) و (۳۱) در دستگاه کلی با جایگزینی شرایط مرزی حل می‌شوند. با حل این دستگاه u^e, v^e, γ, θ بدست می‌آید. در حل این مسئله چون دو استوانه خلاف جهت هم می‌چرخند، جهت چرخش استوانه داخلی منفی و خارجی مثبت فرض می‌شود. در ضمن برنامه به زبان دلفی نوشته شده است [۹].

تجربی

مواد

در این پژوهش، از پلی پروپیلن (ساخت هیوسانگ کره) با شاخص قانون توان برابر 0.38 و شاخص پایداری جریان (K) برابر 22000 Pa.s^n و 20 درصد وزنی الیاف شیشه به طول $3/5 \text{ mm}$ استفاده شد.

دستگاهها

اکسترودر مورد استفاده در این پژوهش، اکسترودری تک پیچ (با قطر خارجی 67 mm و طول 90 cm) با سر متقاطع به انضمام اندازه‌کننده‌ای مجهز به حمام خلأ و قسمت کشنده است. قطر قسمت اندازه‌کننده با قطر خارجی حدیده برابر است. برای تماس بهتر پلیمر مذاب و اندازه‌کننده، هوای فشرده با فشار 12 psi داخل لوله دمیده می‌شود. سرعت واحد کشنده متناسب با سرعت پیچ تنظیم می‌شود. ابعاد حدیده مورد استفاده $R_i = 20 \text{ mm}$ ، $R_o = 22/5 \text{ mm}$ و $L = 245 \text{ mm}$ است.

روشها

از روش ریزپرتونگاری تماسی با پرتو X (X-ray contact micro-radiography) برای اندازه‌گیری زاویه آرایش یافتگی الیاف استفاده شده است [۴۸].

نتایج و بحث

همان‌طور که ذکر شد زاویه آرایش یافتگی الیاف در فرایند اکستروژن، در جهت برآیند مؤلفه‌های سرعت سیال است. با استفاده از این فرض

$$u^e(r) = \sum_{j=1}^n u_j^e \Psi_j^e(r) \quad (21)$$

$$v^e(r) = \sum_{j=1}^n v_j^e \Psi_j^e(r) \quad (22)$$

Ψ_j تابعی از r است و با عنوان تابع درونیاب شناخته می‌شود. u_j^e مؤلفه سرعت u روی گره j ام، v_j^e مؤلفه سرعت v روی گره j ام، γ زیروند مربوط به شماره گره و n تعداد گره در هر جزء است. اصولاً Ψ_j با توابع وزنی w_1 و w_2 برابر است. بعد از نوشتن توابع انتگرال وزنی و شکل ضعیف معادله‌های (۱۴) و (۱۵) و قرار دادن معادلات (۲۱) و (۲۲) در آن، معادله‌ها به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\sum_j k_{ij} u_j^e - f_i^e - F_{zi}^e = 0 \quad (23)$$

$$\sum_j \bar{k}_{ij} v_j^e - F_{\theta i}^e = 0 \quad (24)$$

که k_{ij} و \bar{k}_{ij} ماتریس سفتی، f_i^e بردار بار ناشی از اختلاف فشار و F ثابت انتگرال گیری است.

$$k_{ij} = 2\pi \sum_j \left(\int_{r_i^e}^{r_j^e} [\gamma^*]^{n-1} r^* \frac{\partial \Psi_i}{\partial r^*} \frac{\partial \Psi_j}{\partial r^*} dr^* \right) u_j^e \quad (25)$$

$$\bar{k}_{ij} = 2\pi \sum_j \left(\int_{r_i^e}^{r_j^e} [\gamma^*]^{n-1} r^{*3} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(\frac{\Psi_i}{r^*} \right) \frac{\partial}{\partial r^*} \left(\frac{\Psi_j}{r^*} \right) dr^* \right) v_j^e \quad (26)$$

$$F_{zi} = 2\pi r_i^* [\gamma^*]^{n-1} \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{r_i^*} \quad (27)$$

$$F_{\theta i} = 2\pi r_i^* [\gamma^*]^{n-1} r^* \frac{\partial}{\partial r^*} \left(\frac{v}{r^*} \right) \Big|_{r_i^*} \quad (28)$$

$$f_i = 2\pi \int_{r_i^e}^{r_j^e} \Psi_i \left(-\frac{\partial p}{\partial z} \right) r^* dr^* \quad (29)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود معادله‌های (۲۳) و (۲۴) معادلات جزء به شکل اندیس هستند و می‌توان آنها را به شکل ماتریس نوشت:

$$[k]^e \{u\}^e = \{f\}^e + \{F_z\}^e \quad (30)$$

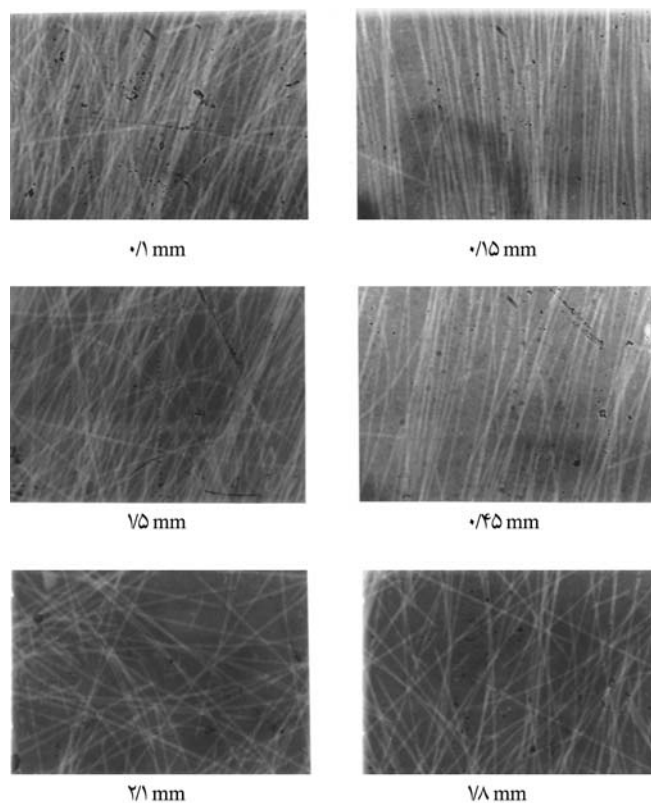
$$[\bar{k}]^e \{v\}^e = \{F_\theta\}^e \quad (31)$$

بردار بار ناشی از اختلاف فشار است و تنها در مدل جزء محدود معادل

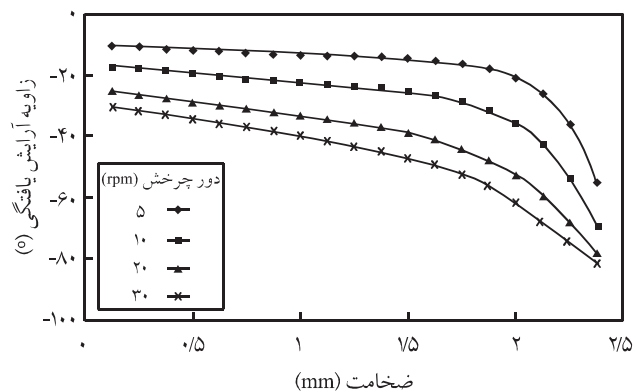
که از شکل مشخص است شتاب کاهش زاویه در ابتدا بسیار سریع است و در واقع از همان نزدیکیهای سطح متحرک تا حدود $0/6$ ضخامت شتاب کاهش زاویه زیاد است، بعد از آن با شتاب کمتری کاهش می‌یابد تا در نزدیکیهای سطح ساکن به صفر می‌رسد. همچنین، منحنیها نشان می‌دهد که زاویه آرایش یافتگی در نزدیک سطح متحرک تقریباً به 90° می‌رسد. در شکل ۱ ضخامت لایه‌های متفاوت از سطح بیرونی لوله اندازه گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت چرخش حادیده زاویه آرایش یافتگی نیز افزایش می‌یابد و هر چه به سطح ساکن نزدیک می‌شود زاویه آرایش یافتگی کمتر می‌شود.

مقایسه با نتایج تجربی

برای بدست آوردن زاویه آرایش یافتگی از پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه به طول $3/5$ mm و روش ریزرتونگاری تماسی با پرتو X استفاده شده است. در شکل ۲ تصویر بزرگ شده‌ای (بزرگنمایی $62/5$) از تغییر زاویه آرایش یافتگی الیاف برای حادیده معمولی داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است زاویه آرایش یافتگی الیاف نامنظم است و تفاوت زیادی بین سطح داخل و خارج وجود ندارد و الیاف

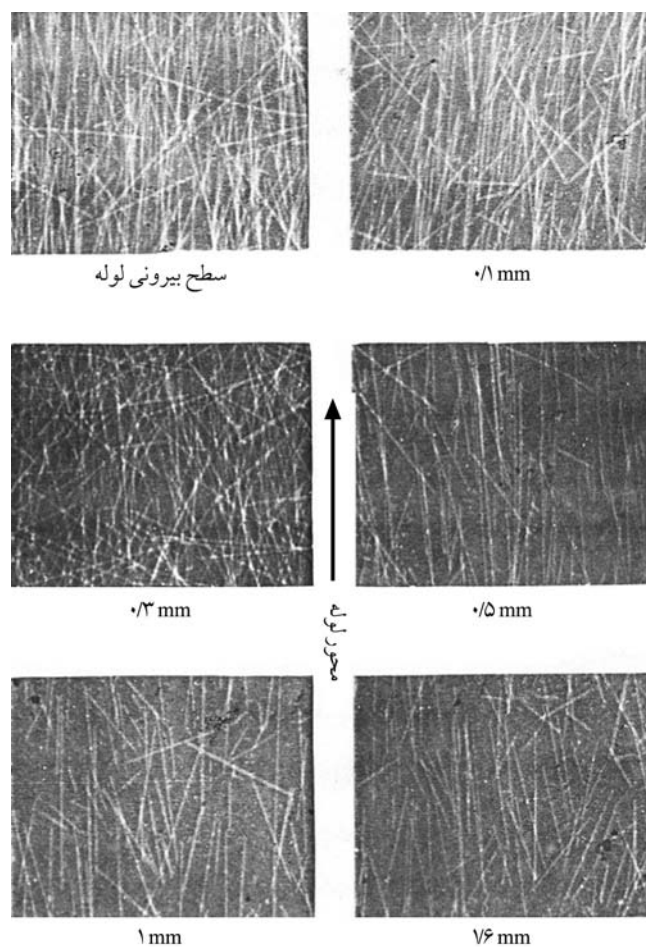


شکل ۳ تغییرزاویه آرایش یافتگی پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه در دور چرخش 10 rpm عضو داخلی.

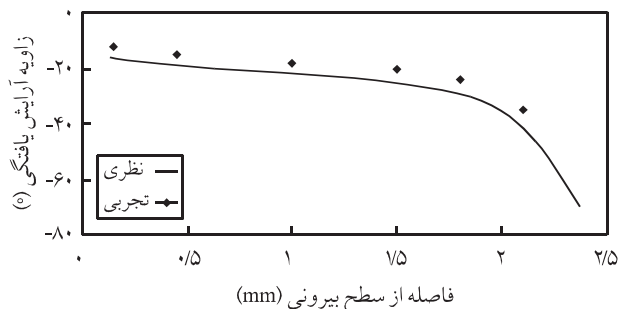


شکل ۱ تغییر زاویه آرایش یافتگی پلی پروپیلن در ضخامت لوله در دورهای چرخش متفاوت عضو داخلی.

زاویه آرایش یافتگی الیاف پلی پروپیلن در شکل ۱ آمده است. همان‌طور



شکل ۲ تغییر زاویه آرایش یافتگی پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه در حادیده معمولی.

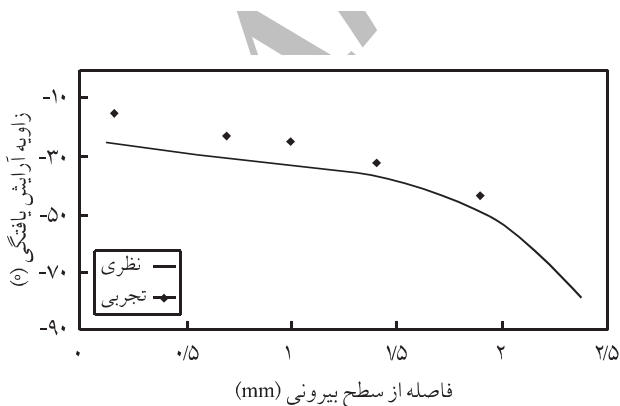


شکل ۶ نتایج نظری و تجربی آرایش زنجیرهای پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه در دور چرخش ۱۰ rpm عضو داخلی.

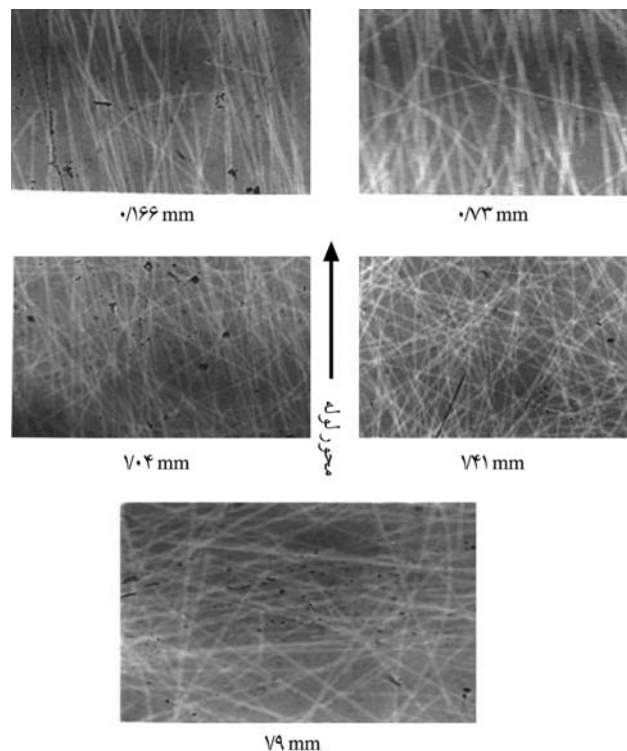
بیشتر به سمت محور لوله (جهت کشش) آرایش یافته‌اند. شکل ۳ نیز تغییر زاویه آرایش یافتگی الیاف را در دور ۱۰ rpm عضو داخلی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است آرایش یافتگی ترجیحی در سطح داخلی یعنی ضخامت (۲/۱ mm)، در جهت محیطی یا عمود بر محور لوله حاصل شده است و در سطح خارجی این آرایش یافتگی موازی محور لوله است.

شکل‌های ۴ و ۵ نیز تغییر زاویه آرایش یافتگی الیاف را به ترتیب در دورهای ۲۰ و ۲۵ rpm عضو داخلی نشان می‌دهد. نتایج تجربی همراه با نتایج نظری به طور نمونه در دورهای چرخش ۱۰، ۲۰ و ۲۵ rpm برای عضو داخلی در شکل‌های ۶ تا ۸ آمده است.

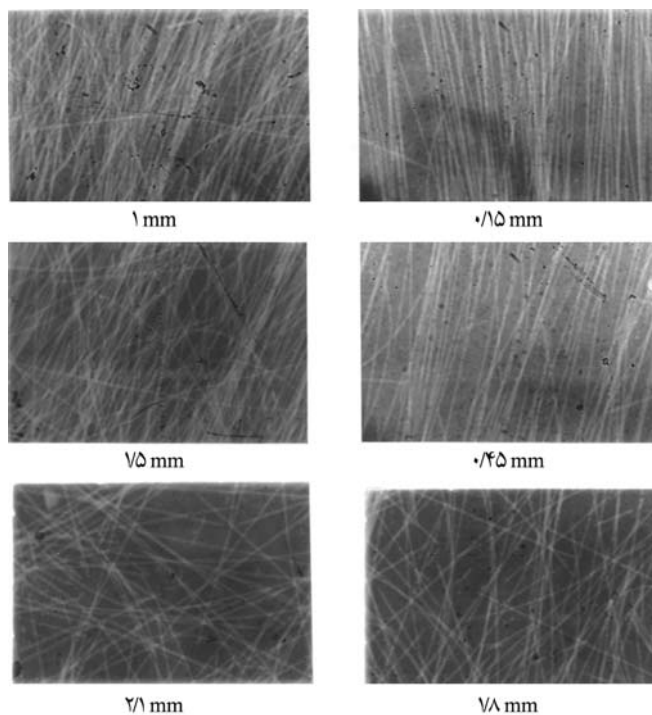
همان‌طور که مشاهده می‌شود در نزدیکی سطح ساکن نتایج با هم تطابق بیشتری دارند. ولی، به هر حال بین نتایج تجربی و نظری اختلاف وجود دارد، علت این اختلاف ممکن است به این دلیل باشد که الیاف شیشه موجود در پلی پروپیلن پارامترهای مدل قانون توان را تغییر می‌دهد. همچنین، باعث ایجاد اصطکاک و افزایش کاهش فشار می‌شود



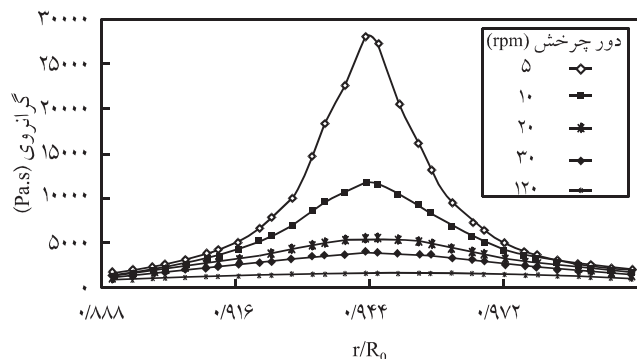
شکل ۷ نتایج نظری و تجربی آرایش زنجیرهای پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه در دور چرخش ۲۰ rpm عضو داخلی.



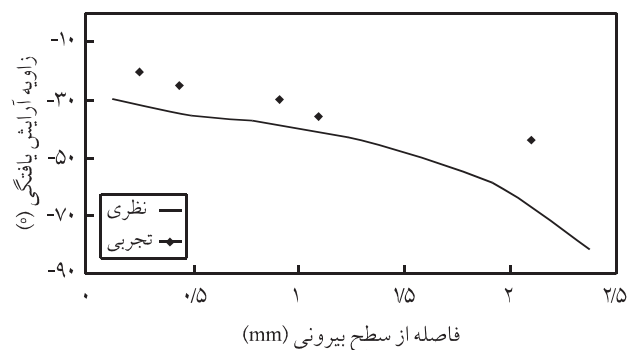
شکل ۴ تغییر زاویه آرایش یافتگی پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه در دور چرخش ۲۰ rpm عضو داخلی.



شکل ۵ تغییر زاویه آرایش یافتگی پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه در دور چرخش ۲۵ rpm عضو داخلی.



شکل ۹ تغییرات گرانشی در کانال حدیده در دورهای متفاوت چرخش عضو داخلی.



شکل ۸ نتایج نظری و تجربی آرایش زنجیرهای پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه در دور چرخش ۲۵ rpm عضو داخلی.

نتیجه‌گیری

- زاویه آرایش یافتگی پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه تابعی از پروفیل سرعت است.
- با افزایش دور چرخش، زاویه آرایش یافتگی الیاف افزایش می‌یابد.
- روش جزء محدود روش مناسبی برای پیش‌بینی زاویه آرایش یافتگی است.
- با استفاده از حدیده چرخان می‌توان آرایش یافتگی در جهت محیطی ایجاد و خط جوش را در مقطع لوله توزیع کرد، در نتیجه لوله‌های مستحکم پلیمری تولید کرد.

مراجع

1. Saheban M., *Design and Manufacture of Die with Rotating Member to Produce High Performance Pipe*, MSc Thesis, Polymer Engineering Group, Tarbiat Modares University, Iran, 1994.
2. Bakhtiari M.R., *Extrusion Production of Weld-less High Performance Pipe by Rotating Die System and Investigation of Mechanical Properties*, MSc Thesis, Polymer Engineering Group, Tarbiat Modares University, Iran, 1996.
3. Baradaran Ajili S., *Manufacture of High Performance Polymeric Pipe Using Rotating Die System*, MSc Thesis, Polymer Engineering Group, Tarbiat Modares University, Iran, 1997.
4. Bilgin S., *Extrusion of Pipe Using a Rotating Die System*, MSc Thesis, University of Manchester, Mechanical Department, UK, 1981.
5. Ramirez G. and Isayev R., *Helical Flow of Viscoelastic Fluid: An Approximation Toward the Analysis Rotational Extrusion*, *J. Rheol.*, **36**, 1183-1211, 1992.
6. long J., Kaizh S. and Guan Q., *Mandrel Rotating Die to Produce High-hoop Strength HDPE Pipe*, *J. Appl. Polym. Sci.*, **96**, 323-328, 1998.
7. Middleman S., *Fundamentals of Polymer Processing*, McGraw Hill, New York, Chap. 6, 1977.
8. Kokabi M., *Fiber Reinforced Plastics Pipe*, MSc Thesis, Victoria University of Manchester, UK, 1986.
9. Reddy J.N., *An Introduction to the Finite Element Method*, 2nd ed., McGraw Hill, New York, 1993.