

بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار الیاف انعطاف پذیر در حوزه جریان سیال تابع قانون توان در لوله با مقطع دایروی یکنواخت

Analysis of The Parameters Affecting the Behaviour of Flexible Fibers in Power Law Fluid Flow Field in a
Uniform Circular Pipe

نورالله کثیری^{۱*}، آرش فیروزی

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی نسبی

دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۹/۸/۸

چکیده

در کامپوزیت‌های پلیمری گرمازود که از افزایش الیاف کوتاه آلی آمیخته به پلیمرها بوجود می‌آیند، استحکام قطعه در جهت افزایش الیاف افزایش می‌یابد. بنابراین، بررسی تغییر شکل و آرایش الیاف بر حسب زمان سوزند خواهد بود. به کمک یک مدل ریاضی برای محاسبه نیروهای مختلف وارد بر الیاف اصلاح یافته، آرایشی از پارامترهای مختلف می‌توان انعطاف پذیری الیاف، این بررسی در حوزه‌های جریان مختلف برای سالات غیر نیوتنی انجام داد. بر مبنای آن، نرم‌افزاری قدرتمند به نام composite simulator بوجود آمده است. به کمک این نرم‌افزار، پدیده‌هایی چون تغییر شکل، سرعت نیم جرخش و لغزینهای شعاعی و محوری لوله در حوزه جریان سیال تابع قانون توان در لوله با مقطع دایروی یکنواخت بررسی شده که نتایج در این مقاله ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف، الیاف کوتاه، چگندگی الیاف، کامپوزیت‌های پلیمری گرمازود، مدلهای نسبی

Key Words: fiber reinforced plastics, short fiber, fiber orientation, thermoplastic polymeric composites, polymeric melts

مقدمه

مدلسازیهای ریاضی تقسیم کرد. اولین قدم در زمینه مدلسازی ریاضی توسط جفری برداشته شد. وی با بررسی حرکت دره‌های بیضی شکل در یک سیال نیوتنی و با فرض عدم برخورد ذرات با یکدیگر و نبود پیچش، خمش و خورد شدن الیاف و نیز خطی بودن حوزه جریانی که به معنی ثابت ماندن سرعت بر طول ذره است، نتیجه گرفت که حرکت ذرات بیضی شکل جرخشی و تناوبی خواهد بود [۱]. تیلور با انجام آزمایشهای عملی، نتایج نظری کار جفری را تأیید کرد

بررسی حرکت الیاف کوتاه در محیطها به اوایل قرن بیستم برمی‌گردد. انگیزه اولیه در بررسی این موضوع به وسیله دیدگاه حدسازی فازی و مدلسازی رئولوژیکی سیالهای دو فازی بوجود آمد و سپس، در فرآیندهای تولید مواد کامپوزیتی جایگاهی تازه یافت. پژوهشهای انجام شده در این محنت را می‌توان به دو دسته آزمایشهای تجربی و

* مسئول مکاتبات، پناه‌نگار: kashiri@vst.ac.ir

اولیه روزنران در فرایندهای تولید کامپوزیت‌های پلیمری باشد و البته از آنجا که در بیشتر مواقع ابعاد دستگاههای شکل‌دهی نظیر اکسترودر مشخص و محدود است، مدل مزبور می‌تواند شکل نهایی لیاف را در شرایط فرایند مرتبط پیش‌گویی کند. بنابراین، با کنترل شرایط فرایند (دما، دبی، گرانیوی و...) می‌توان تا حدودی نحوه آرایش لیاف را در خروجی سیستم شکل‌دهی کنترل کرد.

اساس نظری

مبنای کار انجام شده، مدل پیتمان و کتیری بوده و برای حل مدل فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱- لیف کاملاً کش نیامدنی است و اندازه آن به حدی بزرگ است که بتوان از حرکت براونی چشم‌پوشی کرد.

۲- حرکت لیف شبه ایستاست.

۳- لیف جسمی کاملاً کشان است، یعنی اگر همه نیروها و ممانها از روی آن برداشته شود به شکل اولیه خویش بازمی‌گردد.

۴- مقاومت لیف در برابر پیچش بی‌نهایت است.

۵- نیروی شناوری خشی، سطح مقطع لیف ثابت و ماده لیف همگن است.

۶- هیچ نیروی بیرونی نظیر نیروهای وارد از طرف میدانهای الکتریکی و مغناطیسی یا سایر لیاف به لیف وارد نمی‌شود.

یکی از فرضیات اصلی مدل پیتمان کتیری، فرض نیوتنی بودن سیال است. از آنجا که این فرض در فرایندهای تولید کامپوزیت‌های پلیمری فرض نادرستی است، بنابراین بهترین گام در بهبود مدل، حذف این فرض محدود کننده و حل آن بر مبنای مدل‌های رئولوژی عملی‌تر است.

برای تعریف محور لیف در فضا از هندسه دیفرانسیلی استفاده می‌شود [۹، ۱۲، ۱۳]. برای موازنه نیرو و ممان یک المان دیفرانسیلی،

که در $s \leq s \leq s + \Delta s$ بکار گرفته می‌شود. پارامتر s بیانگر طول کمان محور در هر نقطه لیف نسبت به مبدا است که اگر مبدا مختصات بر مرکز لیف منطبق شود، در این صورت $-L \leq s \leq L$ خواهد بود. در

چنین شرایطی موقعیت هر نقطه روی لیف را نسبت به زمان t با بردار کارترین $X(s,t)$ می‌توان نمایش داد. ممان درونی و بخشی وارد بر لیف

به ترتیب M و m و نیروهای درونی و بخشی وارد بر لیف به ترتیب F و f در نظر گرفته می‌شود. با انجام موازنه‌ها معادلات زیر برای نیرو و ممان بدست می‌آیند:

$$F' + f = 0 \quad (1)$$

$$M' + m + (U) = 0 \quad (2)$$

[۲]. بری در تون معادلات جفری را به کمک مفهوم تالسور به شکل همگانی‌تر عرضه کرد [۳]. ماسون و همکارانش مطالعات مزبور را در حوزه‌های جریان‌های گوناگون آزمودند [۴]. پیتمان و کتیری با حذف فرض خطی بودن حوزه جریانی، راه را برای کاربرد مدل‌های ریاضی یاد شده در مواردی چون قالب‌گیری تزریقی هموار کردند [۵]. با ارائه نظریه اجسام قلم‌گون، برای تخمین بار امکان محاسبه میزان و حالت خمش لیف و نیز لغزش آن نسبت به سیال فراهم شد. گوناپاسک و هرل برای تخمین بار ضریب خم‌شوندگی لیف را وارد معادله کردند [۶]. فرانکو لیاف را دارای خم‌شوندگی محدود، کش‌نیامدنی و مقاوم در برابر پیچش در نظر گرفت و با برقراری موازنه نیروها و ممان روی المانی از لیف، رابطه‌های دیفرانسیلی حاکم بر سرعت و تنش لیف را معین کرد [۷]. پیتمان و کتیری با تصحیح دو ابراد عمده مدل فرانکو، مدل جدیدی را ارائه کرده‌اند [۹].

مطالب گفته شده درباره تعلیق‌های رقیق که لیاف با همدیگر و دیواره برخوردی ندارند، صحیح است. پدیده برخورد لیاف با یکدیگر در کارهای دیگری مورد بررسی ریاضی و آماری و تجربی قرار گرفته است، ولی تاکنون مدلی که بیانگر تغییر شکل لیف با محاسبه برخورد آن با لیاف دیگر یا آثار دیواره باشد، ارائه نشده است.

پژوهشگران در بخش دیگری از مطالعات به بررسی خصوصیات فیزیکی کامپوزیت مذاب دارای لیاف پرداخته‌اند. در این دسته مطالعات مطالبی چون گرانیوی مذاب، پدیده تورم دهانه، خرد شدن لیاف، جهت‌گیری لیاف و غیره مورد بررسی تجربی و مدل‌سازی ریاضی قرار گرفته است [۱۱، ۱۰]. گروه دیگری از مطالعات نیز به مدل‌سازی رفتار کامپوزیت‌های پلیمری گرماسخت که حین ساخت دچار تغییر ساختار شیمیایی می‌شوند و در نتیجه رفتار رئولوژیک آنها تغییر می‌یابد پرداخته‌اند.

در این پژوهش، بهبود مدل پیتمان و کتیری و روش حل عددی آن بررسی می‌شود. سپس، بر مبنای مدل ریاضی بهبود یافته پیتمان و کتیری، نرم‌افزاری که جهت انجام محاسبات عددی مدل نهایی و ارائه لحظه به لحظه اطلاعات حاصل به صورت گرافیکی - عددی تهیه شده و Composite Simulator نام گرفته است معرفی می‌شود. به کمک این نرم‌افزار، پدیده‌های تغییر شکل، زمان نیم چرخش، لغزش شعاعی و لغزش محوری لیف در حوزه جریانی سیال تابع قانون توان در لوله‌های با مقطع دایروی بکواخت بررسی و نتایج حاصل به صورت نمودارهایی ارائه و مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

محاسبات مدل تا زمانی ادامه می‌یابد که کاربر نرم‌افزار شرایط پایان محاسبات را مشخص کند یا لیف یک چرخش کامل انجام داده و در راستای خطوط جریانی قرار گیرد. با توجه به مسافت لازم برای رسیدن به شرایط مورد نظر، نتایج مدل می‌تواند مبنایی برای طراحی

دارای خمش ماکسیممی بیش از این مقدار باشند، در محدوده قابل قبول مدل قرار می‌گیرند. از جمله این ایفای، ایفای معدنی کربن و شیشه و یا ایفای آلومینا. برای تعیین M ، F از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$M = Bqb \quad \text{و} \quad F = T \cdot \sin(\alpha, F) \quad (4)$$

که در آن T بیانگر تنش است. B معان دوم سطح مقطع لیف و b نیز بردار نرمال عمود بر صفحه گذرنده از بردار مماس بر لیف و بردار عمود بر بردار مماس است. از آنجا که هیچ رابطه‌ای برای تعیین m (معان درونی) ارائه نشده، بنابراین از این جمله در حل معادله چشم‌پوشی شده است. نتیجه این چشم‌پوشی این است که مدل، توان پیش‌بینی چرخش مجدد لیف را پس از فرارگیری محور آن در راستای جریان نخواهد داشت.

با جایگذاری روابط یاد شده در معادلات موازنه نیرو و معان روی درازای لیف، معادله زیر برای حرکت لیف بدست می‌آید:

$$V = X' - U + \frac{Lmk}{\gamma \pi a} [(T' + Bq'q)l + \frac{1}{\gamma} (Tq - Bq'q' + Bqr^2)n] - \frac{B}{\gamma} (\tau q' + qr')b \quad (5)$$

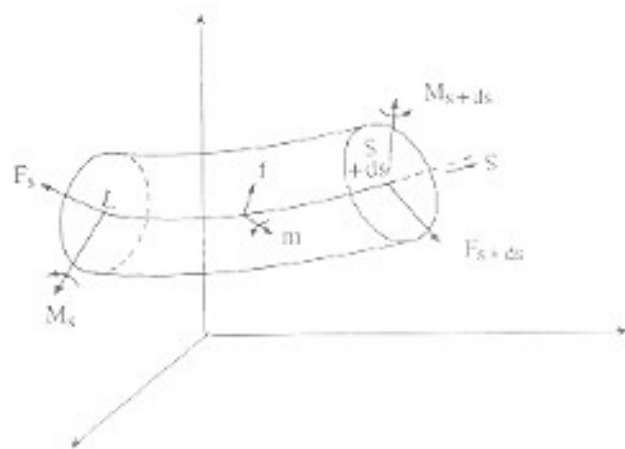
این معادله، حل مقدار اولیه مدل است، که شکل اولیه لیف به عنوان شرط نخستین این معادله است. در اینجا V سرعت حرکت لیف، X' مشتق مختصات لیف نسبت به زمان، l ، تنش در درازای لیف (مشتق تنش نسبت به s)، B نشان دهنده اندازه خم‌شوندگی لیف، b بردار یکه مماس بر لیف، n بردار عمود بر خط مماس لیف، τ سومین بردار یکه روی هر نقطه از لیف (عمود بر n)، q ، q' و q'' به ترتیب خمش لیف، مشتق اول خمش نسبت به s و مشتق دوم نسبت به s و r و r' کمیت‌های عددی نشان دهنده اندازه پیچش لیف است.

با مشتق‌گیری از معادله ۵ برای به دست آوردن V' و جانشینی آن در معادله حاصل از فرصت کش نیامدنی بودن لیف، معادله زیر برای محاسبه تنش در درازای لیف بدست می‌آید:

$$T'' - \frac{1}{\gamma} q' T + \frac{\tau}{\gamma} B q q'' + B q' r' - \frac{1}{\gamma} B q' r^2 + \frac{\gamma \pi a k}{L m k} U' l = 0 \quad (6)$$

$$q(\pm l) = q'(\pm l) = 0$$

این معادله همان حل مقدار مرزی مدل است که بدین‌گونه مدل ریاضی بیشان-کبیری کامل می‌شود. چون حل تحلیلی این معادله‌ها بسادگی ممکن نیست، معادله‌های یاد شده به روش عددی حل می‌شوند.



شکل ۱- موازنه نیرو و معان روی همان دیفرانسیلی از لیف.

که در آن l نشانه مشتق کمیت مورد نظر بر حسب s است. برای تعیین نیروی l که همان نیروی درآنگ وارد بر جسم است از نظریه اجسام نلم‌گون (Slender Bodies) استفاده می‌شود. از دیدگاه نظری اجسام نلم‌گون زمانی که لاغری یک جسم استوانه‌ای افزایش می‌یابد، رفته رفته حجم آن با سیال پیرامون گرفته می‌شود و در نهایت فقط محور آن باقی می‌ماند. بنابراین، نظریه جسمهای نلم‌گون به جای درازای یک جسم استوانه‌ای، منحنی محور آن جسم را در نظر می‌گیرد. این منحنی همان بخش نیروهای نقطه‌ای روی یک خط است.

این پدیده توسط کاکس [۸] بررسی شده و رابطه‌ای بین سرعت سیال دست نخورده و نیروی بدست آمده است که اگر نسبت ویژه ذره $k = (L/a)^2$ به اندازه کافی بزرگ باشد، یک تناسب مستقیم بین نیروهای موضعی وارد بر جسم و سرعت لغزش موضعی بدست می‌آید که معادله آن عبارت است از:

$$f(s) = \frac{\gamma \pi a}{L m k} [\gamma l - \alpha] (U - V) + O(Lnk)^2 \quad (7)$$

در این معادله l معان دوم سطح مقطع لیف و $O(Lnk)$ تابعیت خطاست. این معادله در واقع شکل ساده شده معادله نگرش جسمهای نلم‌گون است که در آن $f(s)$ نیرو و به ازای طول لیف در موقعیت s (روی محور لیف)، U سرعت سیال دست نخورده، V سرعت لیف، l نصف درازای لیف، α شعاع لیف و γ نگرانی سیال است. چون، در عمل نسبت ویژه لیف بزرگتر از ۱۰۰۰ است، بکاربردن معادله ۷ در مدل مانعی ندارد. محدودیت اصلی در انتخاب لیف مناسب عدم عدم عدول خمش ماکسیمم لیف در اثر نیروی وارد شده از طرف حوزه جریانی از مقدار 5 cm^{-1} است. این شرط بر مبنای معادله $q_{max} = T/\tau l$ بیان می‌شود. در این رابطه T بیانگر تنش، l عدول بانگ و τ شعاع لیف است. بنابراین، ایفای که

$$V_n = \left(\frac{n}{n+1}\right)^n V_0 \left(\frac{AP}{\gamma \mu + L}\right)^n R^{(n+1)n}$$

$$V_c = V_0 = 0$$

پارامترهای q و q' و q'' در معادله‌های ۵ و ۶ باید در هر نقطه واقع بر لیف تعیین شوند. برای رسیدن به این خواسته از گذراندن یک سهمی روی نقطه‌ها استفاده شده است و حالت‌های ویژه‌ای که ممکن است رخ دهد، پیش‌بینی شده و رابطه‌های آنها به دست آمده است (شکل ۲). حالت‌های ویژه هنگامی بوجود می‌آیند که نقطه مورد نظر روی قسمت عطف منحنی یا در بخشی از آن قرار گرفته باشد، که در آن جهت تقعر منحنی عوض می‌شود.

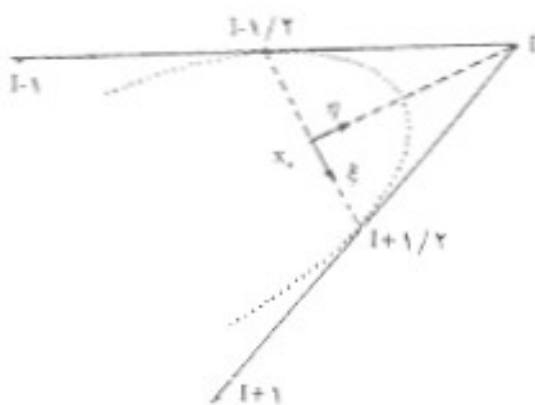
از دید روش سهمی، شکل لیف در همسایگی نقطه I با یک سهمی به شکل $z = a + bx^2$ تعریف می‌شود. بر این اساس مشتقات عددی مطلوب معین شده و سپس به روش‌های عددی حل شده‌اند. برای بدست آوردن مقدار مرزی، روش پیش‌بینی و تصحیح اولر ساده و اصلاح شده بکار رفته است.

گروه‌های بدون بعد

برای کلی‌تر بودن نتیجه‌ها و کاربرد آسانتر در صنعت، به کمک آنالیز ابعادی چند گروه بدون بعد بدست آمده است که در زیر آورده شده‌اند:

$$S = \frac{E}{\mu \gamma^2 (L \lambda)^2}, \quad R_F = \frac{L}{r}, \quad G = \frac{\gamma \gamma'}{\gamma''}, \quad t = t_1 \gamma' \quad (9)$$

در اینجا E مدول یانگ، λ گرادیان سیال، L نصف درازای لیف، r شعاع لیف، t ازمان جاری، γ' برابر du/dz و γ'' برابر d^2u/dz^2 است. L نیز رابطه سرعت سیال در جهت Z است. گروه بدون بعد S نشان دهنده اندازه انعطاف‌پذیری لیف است. هرچه S بزرگتر باشد،



شکل ۲ - سهمی گذرنده از نقطه آروی لیف.

نخستین قدم در حل عددی، مشخص کردن نقطه‌هایی با فاصله برابر روی طول لیف است. ابتدا شکل لیف در دو صفحه XY و XZ به صورت نواح درجه سه تصویر و به شکل زیر بیان شده است:

$$X_2 = f_{21}(X_1) \quad (7)$$

$$X_3 = f_{31}(X_1)$$

سپس، از روش تکرار استفاده شده است. برای تعیین شرایط مرزی، چند نقطه در دو انتهای لیف، مجدداً مکانیابی می‌شوند که روش صافکاری انتهای لیف نامگذاری شده است. با توجه به معادله ۵، L یعنی سرعت سیال دست نخورده، به شکل رابطه‌ای تحلیلی باید از پیش مشخص باشد. پیمان و کثیری با کمک این مدل، به بررسی رفتار لیف در سیال نیوتنی جاری در حوزه جریان خطی و سهمی پرداخته‌اند طبق این پژوهش مشخص شده است که مدل مناسب برای بیان رفتار سیالهای پلیمری متعارف، مدل قانون توانی یا تلفیقی از آن با مدل بینگهام است. به منظور گسترش کار پیمان و کثیری، سعی شده است که مدل در ستر حوزه‌های جریانی پیچیده‌تر و عملی‌تر پیاده شود، چون هدف اصلی در این پژوهش، بررسی پدیده‌هایی است که در حین فرایند قالبگیری در قسمت خروجی روزن اتفاق می‌افتد که از نظر رفتاری با سیال نیوتنی در حوزه‌های جریانی ذکر شده بسیار متفاوت است. روش تعیین حوزه‌های جریانی بدین صورت است که بر اساس هندسه حوزه جریانی مورد مطالعه، معادلات نوریستوکس ساده شده و با جایگذاری رابطه بین نرخ تنش و شدت برش بر اساس مدل رئولوژیکی مطلوب، معادله دیفرانسیل حاصل برای تعیین V یا سرعت نقطه‌ای سیال نسبت به جهت (جهات) فضایی مورد نظر حل می‌شود. از آنجا که تفاوت اصلی در اغلب مدل‌های رئولوژیکی بیانگر رفتار مذابهای پلیمری، ضریب گرادیان و سرعت برش است، بنابراین علاوه بر مدل سیال نیوتنی، در روابط A مدل گرادیان دیگری بررسی و جهت تعیین حوزه‌های جریانی مورد استفاده گرفته است [۱۳]. بدین ترتیب بانک اطلاعاتی نرم‌افزار شامل حوزه‌های جریانی پیچیده‌ای نظیر جریان سیال غیر نیوتنی بین دو صفحه موازی، جریان بین دو استوانه هم مرکز و جریان در کانالهای با مقطع دایره‌ای غیر یکواخت (همگرا یا واگرا) نیز می‌شود. مثلاً، معادله جریان سیال تابع قانون توان در بک لوله (که ادامه مطلب بر مبنای این حالت است) بدین ترتیب می‌باشد:

$$V_z = V_0 \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{2(n+1)} \right] \quad (8)$$

که

با کمک نرم افزار composite simulator تغییر شکل لیف در حوزه جریانی لوله با مقطع دایروی پکتواخت برای سیال قانون توان بررسی شده است که نمونه‌ای از آن در نمودار ۳ دیده می‌شود. تعداد نقاط روی لیف در کل اجراها ۲۰ انتخاب شده است. در اجرای پادشده، لیفی با شکل اولیه به صورت یک خط مستقیم با زاویه ۱۰ درجه نسبت به افق در حوزه جریانی سیال تابع قانون توان در لوله انداخته شده است. همچنان که دیده می‌شود لیف در اثر وارد شدن نیروهای مختلف بر آن، بتدریج خم شده و سپس بر اثر افزایش خمش و تاثیر مدول پانگ، به شکل نخستین خویش برمی‌گردد. اندیس توانی سیال، $n=0.7$ و شعاع لوله ۵ سانتی‌متر و حداکثر سرعت سیال ۲۰ سانتی‌متر بر ثانیه بوده است.

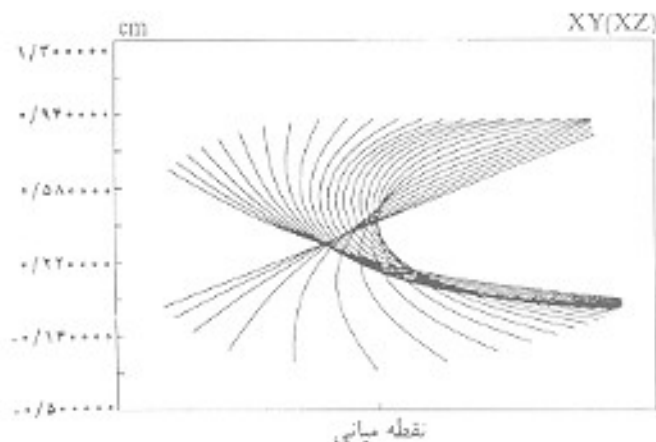
برای تخمین میزان صحت نتایج پیش‌بینی شده به وسیله مدل با نتایج بدست آمده به کمک مدل‌های دیگر، مدل مزبور در دو حالت مشابه با شرایط آزمایش‌های فرانکو [۷] اجرا و نتیجه در نمودارهای ۲۴ و ۲۵ ارائه شده است. باید توجه داشت که مدل ارائه شده توسط فرانکو فقط در حوزه‌های جریانی خطی بررسی شده است. بنابراین، امکان مقایسه نتایج مدل فعلی در حوزه جریانی لوله با مقطع ثابت برای سیال قانون توانی با نتایج فرانکو میسر نیست. همان‌گونه که دیده می‌شود، نتایج مدل فعلی همخوانی بسیار خوبی با نتایج پیش‌بینی شده مدل فرانکو نشان می‌دهد. شایان ذکر است که فرانکو نتایج مدل خویش را در بستر آزمایش‌های عملی نیز آزموده و همخوانی مناسبی بین نتایج پیش‌بینی شده به وسیله مدل با نتایج تجربی گزارش کرده است. اختلاف بین نتایج مدل فعلی با مدل فرانکو عمدتاً به دلیل قابلیت محاسبه لغزش لیف نسبت به سیال در مدل توسعه یافته فعلی است، که در مدل فرانکو و سایر مدل‌های ارائه شده مدنظر قرار نگرفته است.

شکل ۲۶ بیانگر روند نمای کلی و بخش محاسباتی نرم افزار است. همه مراحل روند نمای بخش محاسباتی، بسته به انتخاب کاربر، داخل پنجره خروجی گرافیکی یا عددی رخ می‌دهد و نتایج حاصل در هر پله زمانی در پنجره مربوط به نمایش درمی‌آید. طول پله‌های زمانی جزء ورودیهای برنامه است.

در نهایت با انجام اجراهای مختلف، می‌توان اطلاعات متنوعی درباره تاثیر تغییر هر پارامتر بر نتایج نهایی بدست آورد و نتایج حاصل را به صورت نمودارهایی برحسب پارامترهای بدون بعد رسم کرد و به تحلیل نتایج حاصل پرداخت که در ادامه به این مهم در حوزه جریانی یاد شده پرداخته می‌شود.

بررسی تغییر شکل لیف در حوزه جریانی سیال داخل لوله

در اینجا لیفی که شکل ابتدایی آن با معادله $0.4Z+8$ تعریف شده درون حوزه جریانی سیال تابع قانون توان در لوله قرار گرفته است. لیف



نقطه میانی

شکل ۳- تغییر شکل لحظه به لحظه لیفی با طول ۲/۴ cm و نسبت ویژه ۳۰۰ و مدول پانگ ۸E۱۰ در حوزه جریان سیال در لوله با اندیس توانی ۰/۷ و گرانیروی ۲۵۰ poise.

انعطاف پذیری لیف کمتر می‌شود. گروه بدون بعد Rp نشان دهنده شکل هندسی لیف است. در صورت ثابت ماندن شعاع هرچه Rp بزرگتر باشد، درازای لیف بیشتر می‌شود. G نشان دهنده اندازه تفاوت حوزه جریانی با حوزه جریانی خطی است. هرچه G بزرگتر باشد، حوزه جریانی از حالت خطی دورتر می‌شود. از زمان بدون بعد است.

روشها

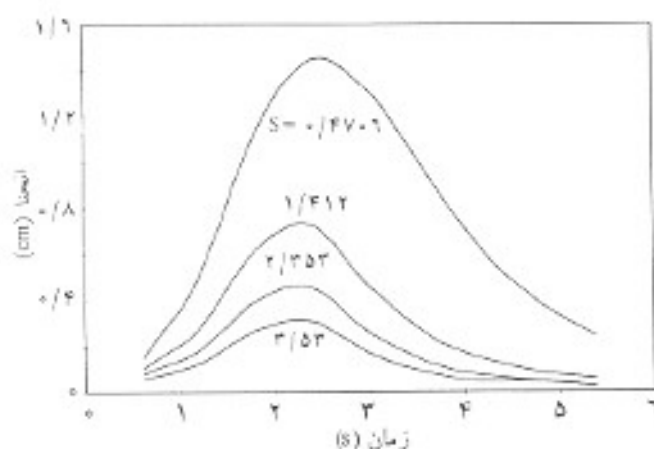
بر پایه روش حل عددی الگوی پیمان-کثیری، یک الگوسازی رایانه‌ای به نام composite simulator انجام شده است. برنامه‌های است که به زبان برنامه‌نویسی ویژوال C++ ویرایش پنجم در محیط سیستم عامل ویندوز نوشته شده است. برنامه بطور عمده از سه بخش کلی ورودی، محاسباتی و خروجی تشکیل شده است. ارتباط نرم افزار با کاربر به کمک یک پنجره اصلی و چهار پنجره فرعی انجام می‌گیرد. این پنجره‌ها به صورت بصری و قابل لمس، حجم زیادی از ورودیهای لازم جهت ادامه حل را از کاربر دریافت می‌کنند و نتایج را به صورت پویا و لحظه به لحظه برای کاربر به نمایش می‌گذارند. بدین ترتیب برنامه شامل بیش از ۱۰۰ کلاس و توابع داخلی آنها و حدود ۷۵۰۰ خط کد برنامه‌نویسی است. قابلیت‌های ارائه گرافیکی نتایج به صورت لحظه به لحظه، ذخیره و بازیابی فایل و چاپ نتایج به صورت گرافیکی و عددی از قابلیت‌های دیگر نرم افزار می‌باشند.

تغییر شکل لیف تابعی از چند پارامتر مختلف است که با مقداره‌ای به آنها، امکان بررسی تاثیر هر کدام بر تغییر شکل لحظه‌ای لیف، زمان نیم چرخش و لغزشهای محوری و شعاعی لیف فراهم می‌گردد.

انتهای جلویی به خطوط جریان پرسرعت نزدیکتر باشد. یعنی، در تمام اجزای به عمل آمده اگر ضریب زاویه یا مقدار ثابت A از شکل اولیه لیف (نه هر دو بطور همزمان) منفی گردند، لیف به جای انجام یک نیم چرخش، بتدریج در امتداد محور حرکت قرار خواهد گرفت. تاثیر تغییر پارامتر عرض از مبدا (ثابت A شکل اولیه لیف) را می توان در نمودار ۹ مشاهده کرد. تغییرات A در گروه بدون بعد G منعکس می گردد. زیرا G تابعی از موقعیت فرارگیری لیف است که به وسیله مقدار ثابت شکل اولیه لیف یعنی A مشخص می گردد. تاثیر تغییر پارامتر S بر زمان نیم چرخش را نیز در نمودار مریور می توان دید. افزایش S (افزایش مدول بانگ) مترادف با کاهش خم شونده گی است و همین امر سبب می شود که لیف خطوط جریان بیشتری را قطع کند و اختلاف سرعت بیشتری را در دو انتهای خویش احساس کند و در نتیجه باید زودتر بچرخد که این مطلب بطور کلی با مقایسه نتایج نمودار یاد شده تایید می گردد. از سوی دیگر، انتظار می رود تاثیر تغییرات R_p بر سرعت نیم چرخش، برعکس تاثیر S باشد. با مقایسه نتایج دیده شده است که با کاهش R_p در S های ثابت، سرعت چرخش افزایش می یابد. بنابراین، کاهش R_p نیز سبب کم شدن خمش پذیری لیف می شود.

تاثیر تغییر ضریب زاویه شکل اولیه لیف را می توان در تغییر سرعت رسیدن به شرایط نهایی دید. با افزایش ضریب زاویه، لیف از همان لحظه اولیه، خطوط جریان بیشتری را قطع می کند و در نتیجه از ابتدا اختلاف سرعت بیشتری را در دو انتهای خود احساس کرده و سریعتر به چرخش درمی آید. یعنی، بطور کلی سرعت نیم چرخش بستگی مستقیم با اختلاف سرعت سیال در دو انتهای لیف دارد.

نمودار ۴ بیانگر خمش ماکسیمم در هر لحظه برای کل زمان فرایند طی شده است. همان گونه که دیده می شود با افزایش S ، خمش ماکسیمم کمتر می شود و نیز از روی شکل کلی رفتار منحنی ها می توان



شکل ۴ - نمودارهای ماکسیمم خمش لیف های مختلف بر حسب زمان کل فرایند.

در اثر نیروهای وارد بر آن، رفته رفته خم شده و دوباره بر اثر افزایش خمش و تاثیر متقابل مدول بانگ، به شکل اولیه خویش برمی گردد (شکل ۳).

بررسی سرعت نیم چرخش لیف در جریان سیال درون لوله یکی از پارامترهای طراحی در فرایندهای ساخت کامپوزیت های پلیمری، سرعت نیم چرخش لیف در سیال است. هرچه سرعت نیم چرخش لیف بیشتر باشد، درازای لوله که سیال در آن جاری است، کوتاهتر می شود. در این پژوهش، منظور از نیم چرخش لیف این است که یک لیف به شکل خط راست که با افق زاویه 10° درجه می سازد، پس از خم و راست شدن و چرخش به اندازه 160° درجه دوباره با افق در جهت مخالف زاویه 10° درجه سازد. با یادداشت کردن زمان کل چرخش و معکوس کردن آن، سرعت نیم چرخش لیف بدست می آید [۹، ۱۲].

با استفاده از روند بالا سرعت نیم چرخش بر حسب S ها، R_p ها و G های مختلف بدست آمده و در نمودارهای ۹ و ۱۰ رسم شده است.

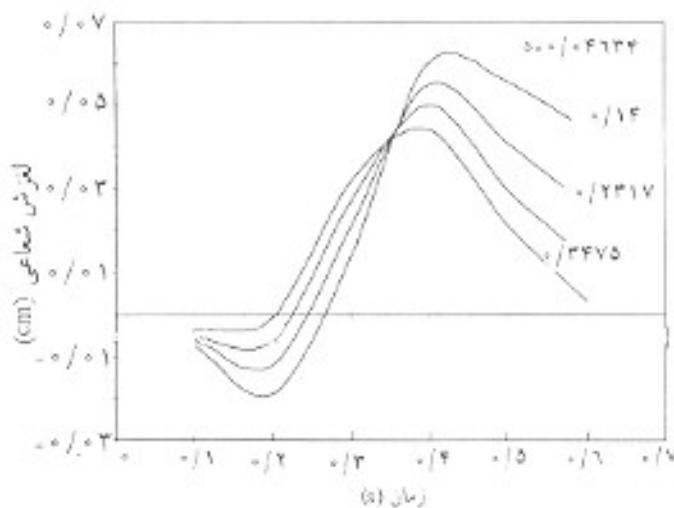
بررسی لغزش لیف در جریان سیال درون لوله تفاوت سرعت سیال در درازای لیف باعث لغزش لیف می شود. مدل ریاضی موجود با در نظر گرفتن این تفاوت می تواند برای نخستین بار لغزش لیف نسبت به سیال را محاسبه کند. لغزش می تواند در دو سوی محور و شعاع لوله رخ دهد [۹، ۱۲، ۱۳].

لغزش در سمت محور نشان می دهد که لیف چه اندازه از سیال عقب می ماند یا جلو می افتد. در اینجا لغزش در جهت محور لوله بر حسب سانتیمتر نشان داده شده و اثر R_p و G روی لغزش محوری بررسی شده است. در نمودارهای ۵ و ۶ و ۱۱ تا ۱۴ لغزش محوری در R_p های ثابت بر حسب S و G های گوناگون رسم شده است.

لغزش لیف در جهت شعاع لوله اهمیت بسیار زیادی دارد، چون همگنی و یکپارختی بخش لیفها در قطعه ساخته شده بستگی به آن دارد. هر تلاشی در کاهش لغزش شعاعی اثر زیادی بر کیفیت قطعه پایانی ساخته شده دارد. در اینجا، لغزش لیف در جهت شعاع لوله بر حسب سانتیمتر نشان داده شده و اثر پارامترهای S ، R_p و G روی آن بررسی شده است. در نمودارهای ۷، ۱۵، ۱۶، ۱۹ و ۲۰ لغزش شعاعی بر حسب $I_2(S)$ در G های مختلف رسم شده تا اثر S روی لغزش در جهت شعاع لوله بنحوی آشکار شود.

نتایج و بحث

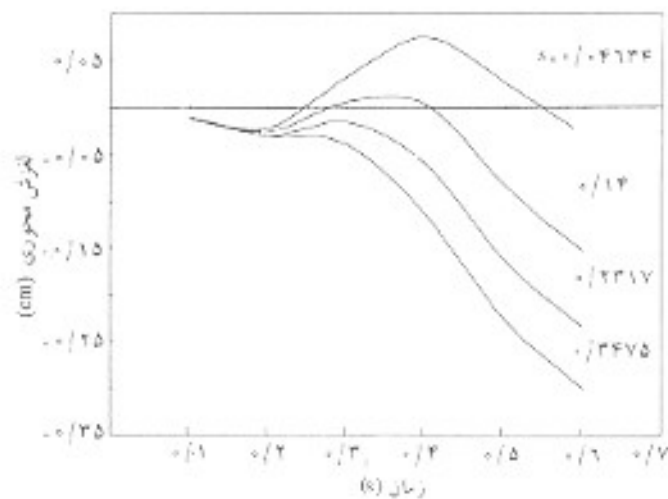
لیف زمانی به چرخش و خمش درمی آید که انتهای عقبی لیف نسبت به



شکل ۷- نمودارهای لغزش شعاعی انیاف مختلف بر حسب زمان کل فرایند در فاصله ۲/۵cm از محور لوله.

مثبت تر می‌شود، یعنی لیف از سیال پیش می‌افتد. در حوالی محور لوله لغزش منفی است. این نتایج را بدین صورت می‌توان توضیح داد که در منطقه نزدیک محور لوله، اختلاف مقدار سرعت بین لایه‌های هم سرعت مجاور یا به عبارت بهتر، گرادیان سرعت، کم است. در نتیجه، لیفی که در این ناحیه تحت تنش قرار می‌گیرد، اختلاف سرعت کمتری در نیمه‌های بالایی و پایینی خود احساس می‌کند. اگر توزیع سرعت کاملاً پلانگ (Plug) باشد، یعنی تمام نقاط سیال هم سرعت باشند، لیف از سیال عقب خواهد ماند. در منطقه نزدیک محور لوله، ابتدا بر اثر شکل نیم‌رخ که سرعت بیشتری را در روی محور لوله پیش‌بینی می‌کند، بخشی از لیف که به محور نزدیکتر است نسبت به بخش دیگر سریعتر و بیشتر به حرکت درآمده و در نتیجه لیف بطور کلی از سیال پیش می‌افتد، ولی با قرار گرفتن تدریجی در راستای بردارهای سرعت سیال، لیف رفته رفته از سیال عقب خواهد ماند. در نزدیکی دیواره لوله گرادیان سرعت بسیار بیشتر از توحی مرکزی است، از این رو لیف ابتدا در اثر خمش بخش نزدیکتر به محور لوله به منطقه با سرعت کمتر (نزدیکتر به دیواره) منتقل می‌شود و در این حالت مقداری عقب افتادگی نسبت به سیال پیرامون را تجربه می‌کند. تاثیر مدول پانگ که سبب برگشت لیف به شکل اولیه خود می‌گردد، لیف را به منطقه با سرعت بیشتر باز می‌گرداند، در نتیجه در این حالت افزایش تدریجی سرعت لیف نسبت به سیال وجود خواهد داشت. همچنین، از روی متحنه‌ها می‌توان دید که افزایش S با کاهش خم‌شوندگی، لغزش محوری را مثبت‌تر می‌کند.

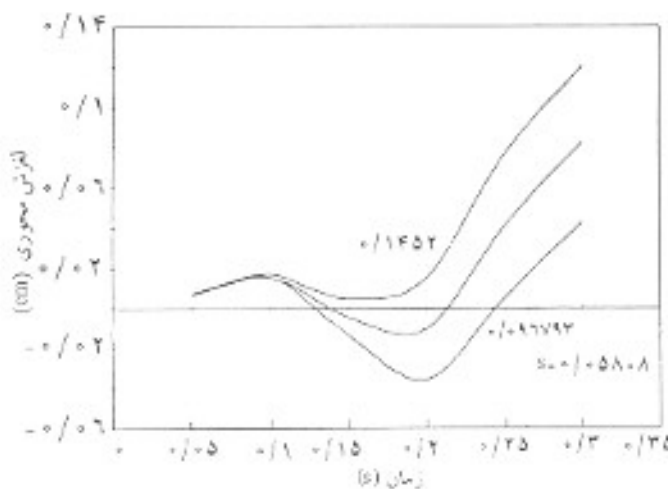
در نمودار ۷ پدیده لغزش شعاعی نقطه مرکزی محور لیف بر اساس زمان فرایند بررسی شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود لیف تقریباً برای مدت کوتاهی دچار لغزش به سمت محور لوله می‌گردد که



شکل ۵- نمودارهای لغزش محوری انیاف مختلف بر حسب زمان کل فرایند در فاصله ۲/۵cm از محور لوله.

دید که در طول فرایند، لیف ابتدا خم و خمتر شده و سپس به حالت راست برمی‌گردد. بخش صعودی منحنی‌ها بیانگر تاثیر نیروهای خارجی وارد شده از سوی سیال بر لیف بوده و بخش نزولی آن نشان دهنده تاثیر مدول پانگ است. بر مبنای نمودار، همچنین می‌توان دید که با افزایش κ ماکسیمم خمش سریعتر رخ می‌دهد.

در نمودارهای ۵ و ۶ لغزش محوری نقطه مرکزی محور لیف‌های با S متفاوت بر حسب زمان فرایند ارائه شده است. نمودار اول برای حالت نزدیک به محور لوله و نمودار دوم برای حالت نزدیک به دیواره است. همان‌طور که دیده می‌شود، رفتارها در این دو حالت کاملاً با یکدیگر تفاوت دارند. از محور به سمت دیواره لغزش محوری

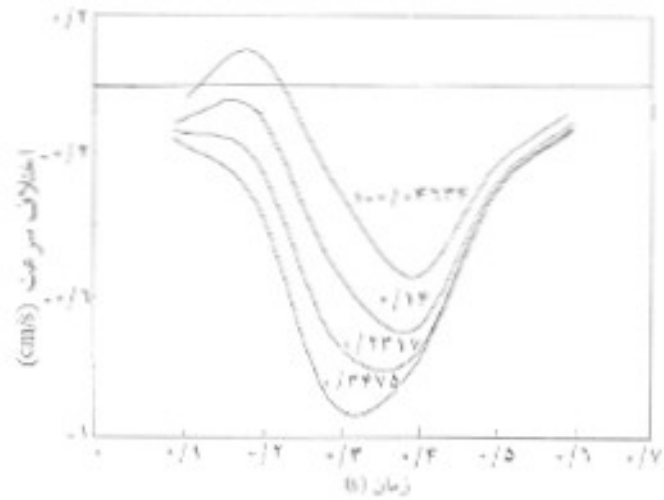


شکل ۶- نمودارهای لغزش محوری انیاف مختلف بر حسب زمان کل فرایند در فاصله ۴cm از محور لوله.

علاوه بر این، هرچه S کاهش یابد احتمال منفی شدن لغزش شعاعی نهایی بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر، افزایش گراوری سبب کاهش پدیده لغزش شعاعی می‌گردد، زیرا با افزایش گراوری ضریب بازدارنده (drag) افزایش یافته و نیروی بیشتری از طرف سیال بر لیف وارد می‌شود و آن را بیشتر به سمت راستی حرکت فشار می‌دهد.

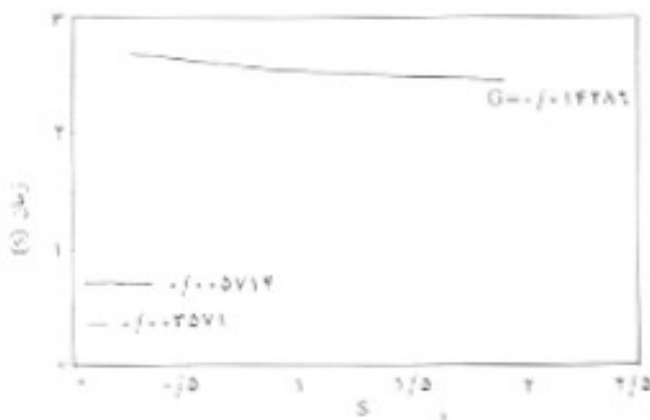
نمودار ۸ بیانگر تغییرات سرعت لیف نسبت به سیال دست نخورده است. چنانکه دیده می‌شود، این اختلاف (قدر مطلق مقدار اختلاف) بتدریج افزایش یافته و پس از طی یک ماکسیمم (میبم)، دوباره کاهش می‌یابد. این ماکسیمم از نظر موقعیت با شرایط وقوع بیشترین خمش، هماهنگی نشان می‌دهد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش خمش سبب ازدیاد اختلاف سرعت لیف و سیال می‌شود.

تعیین سرعت نیم‌چرخش (مسافت لازم برای رسیدن به شکل مورد نظر) اهمیت بسزایی در شناخت ویژگیهای قطعه حاصل از عملیات فرایندی مشابه با ورودیهای مدلسازی نرم‌افزاری دارد. چون عملاً آنچه غیر قابل تغییر است، ابعاد و هندسه تجهیزات شکل‌دهی است و در مقابل امکان تغییر پارامترهای مؤثر بر فرایند اغلب بسیار است. روی محور لوله، سرعت بیشه است و به فواصل مساوی از محور لوله توزیع سرعت متقارن است، بنابراین انتظار می‌رود لیفی که مرکز آن در لحظه اول روی محور لوله قرار داشته باشد، به علت اینکه اختلاف سرعت در دو انتهای آن صفر است، هیچ چرخشی انجام ندهد. از سوی دیگر، با مقایسه تغییر اعداد G یا تغییرات A (نمودار ۱۰) می‌توان دید که با کاهش A یا نزدیک شدن لیف به محور لوله افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش A، سرعت نیم چرخش کاهش می‌یابد و به عبارت بهتر، زمان کل فرایند یا مسافت لازم برای رسیدن به نتیجه مطلوب افزایش می‌یابد. یا نزدیک شدن به دیواره لوله، گرادپان سرعت سیال بیشتر می‌شود، یعنی دو انتهای لیف اختلاف سرعت بیشتری را احساس می‌کنند. از

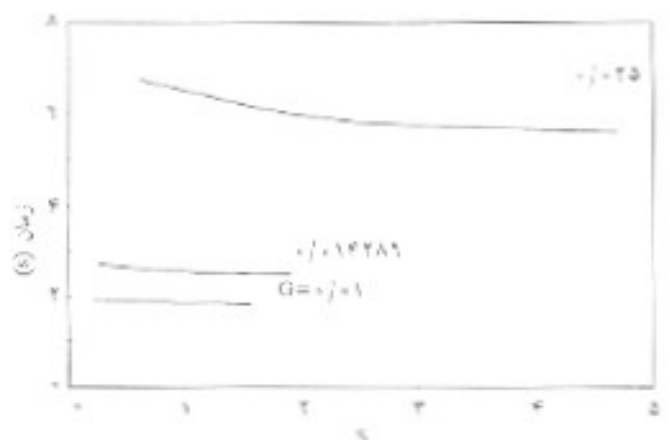


شکل ۸- نمودارهای اختلاف سرعت لیاف مختلف و سیال بر حسب زمان کل فرایند در فاصله ۲/۵cm از محور لوله.

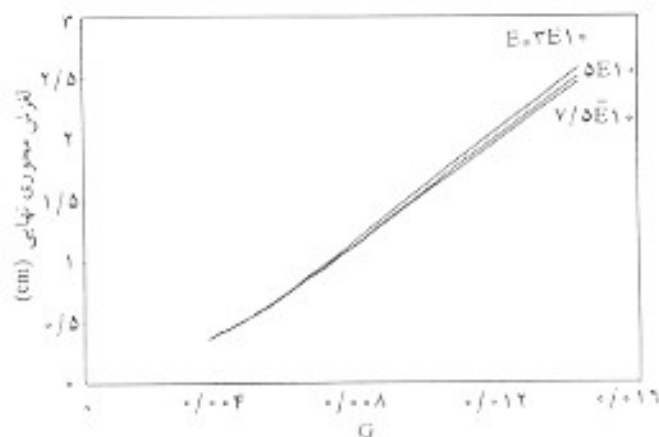
آنها با افزایش S این پدیده کاهش می‌یابد. پس، به یک مقدار ماکسیمم لغزش شعاعی رسیده و در نهایت با کاهش لغزش شعاعی به یک مقدار ثابت می‌رسد و حتی در پارهای شرایط امکان منفی شدن مقدار لغزش شعاعی وجود دارد. دلیل این امر را می‌توان چنین توضیح داد که در ابتدا به علت خمش بخش پایینی لیف و حرکت سریعتر این قسمت نسبت به بخش بالایی، لیف مقداری به سمت محور لوله منتقل می‌شود، سپس با افزایش خمش و با توجه به اینکه بخش بالایی لیف تا حدود زیادی ساکن مانده است، مرکز لیف از محور لوله دور می‌گردد. در نهایت با افزایش تاثیر مدول بانگ و صاف شدن تدریجی لیف، مرکز لیف دوباره به سمت محور لوله متمایل می‌شود. همچنین، پدیده لغزش شعاعی، همان‌طور که از نمودار دیده می‌شود، با افزایش S زیاد می‌شود.



شکل ۱۰- نمودارهای زمان نیم‌چرخش در گهای مختلف بر حسب S (تغییرات G بر حسب شعاع لوله).



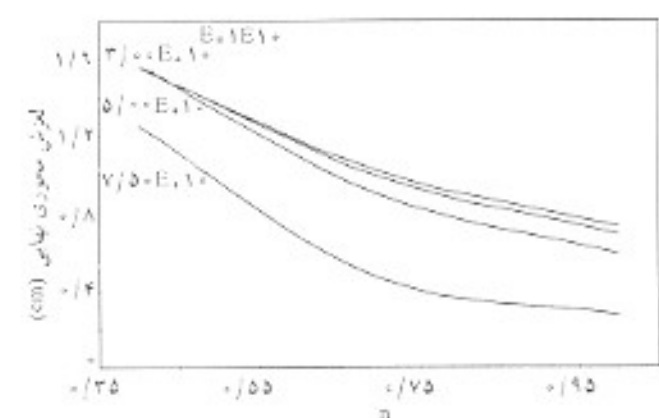
شکل ۹- نمودارهای زمان نیم‌چرخش در گهای مختلف بر حسب S (تغییرات G بر اساس اندیس توانی سیال).



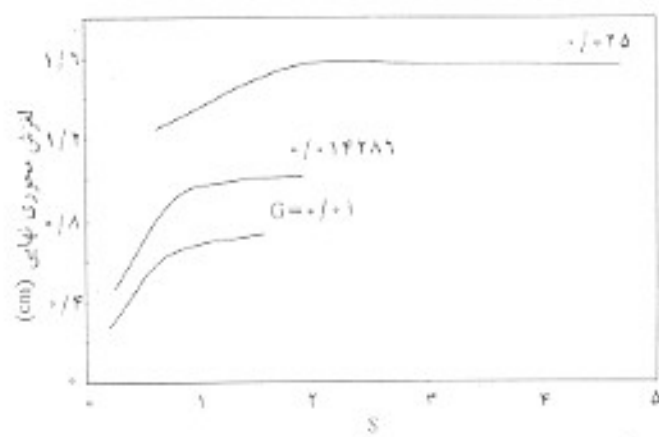
شکل ۱۳ - نمودارهای لغزش محوری نهایی در مدول یا ننگهای مختلف بر حسب G (تغییرات G بر اساس اندیس توانی سیال).

در نمودارهای ۱۱ و ۱۲ تاثیر تغییرات G (تغییرات A در نمودار ۱۱ و تغییرات n در نمودار ۱۲) روی لغزش محوری نهایی مشاهده می‌گردد. افزایش G سبب افزایش لغزش محوری می‌شود. افزایش S نیز بطور کلی همین تاثیر را دارد. البته در S های پایین، سرعت افزایش لغزش محوری با افزایش S شدید است و پس از یک مقدار معین S در هر G، روند تقریباً همگرا می‌شود. نمودار ۱۳ شکل دیگری از نمودار ۱۲ است. طبق نمودار، زیاد شدن G سبب افزایش لغزش محوری نهایی شده است و با افزایش G روندی خطی را طی کرده است.

نمودارهای ۱۵ و ۱۶ بیانگر تغییرات لغزش شعاعی نهایی بر حسب G در چند مدول یا ننگ مختلف است. نمودار ۱۵ برای حالتی است که G از تغییرات ۲، تاثیر پذیرفته است و در نمودار ۱۶ تغییرات G متاثر از تغییرات n یا اندیس توانی سیال بوده است. مدول یا ننگ



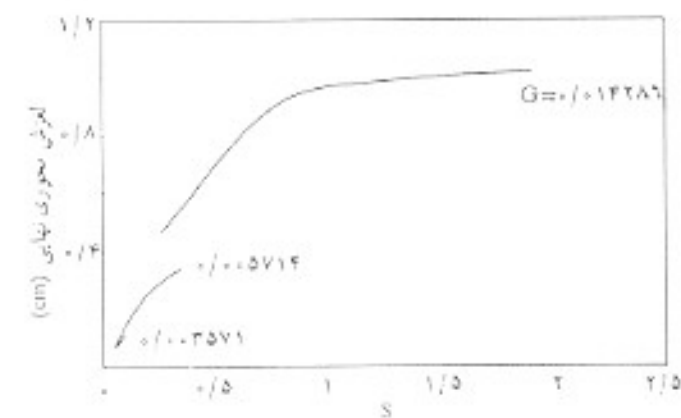
شکل ۱۴ - نمودارهای لغزش محوری نهایی برای الیاف دارای مدول یا ننگ مختلف بر حسب اندیس توانی سیال.



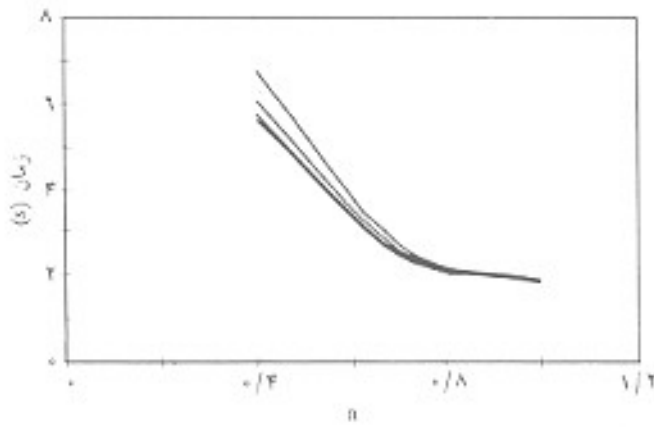
شکل ۱۱ - نمودارهای لغزش محوری نهایی در Gهای مختلف بر حسب S (تغییرات G بر اساس اندیس توانی سیال).

سوی دیگر، با افزایش S لیف کمتر خم می‌شود و در نتیجه خطوط جریان بیشتری را قطع می‌کند که این هم به مفهوم اعمال اختلاف سرعت بیشتر بر دو انتهای لیف است. از مجموع این دو مطلب می‌توان نتیجه گرفت که با نزدیک شدن به دیواره لوله، یعنی با کاهش G، تاثیر تغییرات S روی سرعت نیم چرخش افزایش یابد. در یک لیف با S و سایر پارامترهای یکسان، با نزدیک شدن به دیواره یا کاهش G، سرعت نیم چرخش لیف افزایش می‌یابد. همچنین، سرعت کاهش G نسبت به شعاع لوله کم می‌شود، ولی شیب منحنی سرعت افزایش می‌یابد. یعنی، تاثیر تغییرات G در نزدیکی دیواره (تغییرات در شعاع لوله) بر سرعت نیم چرخش بیشتر از تاثیر آن در نزدیکی محور لوله است.

نمودار ۹ تمام بحثهای مزبور را برای حالتی که تغییرات اندیس توانی سیال در G موثر است، بیان می‌کند. با مقایسه نتایج می‌توان گفت که بحثهای قبل برای این حالت نیز معتبر است.

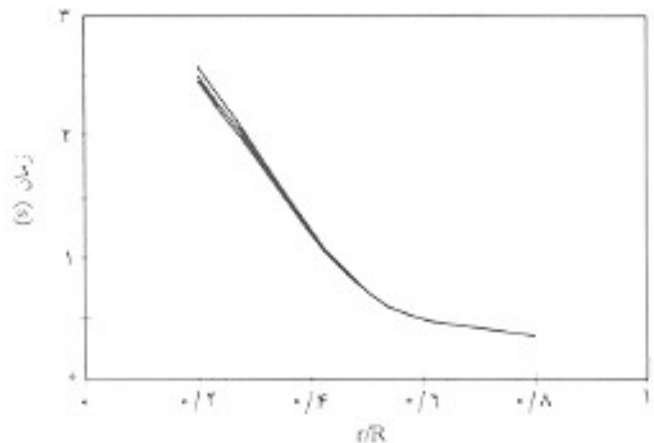


شکل ۱۲ - نمودارهای لغزش محوری نهایی در Gهای مختلف بر حسب S (تغییرات G بر حسب شعاع لوله).

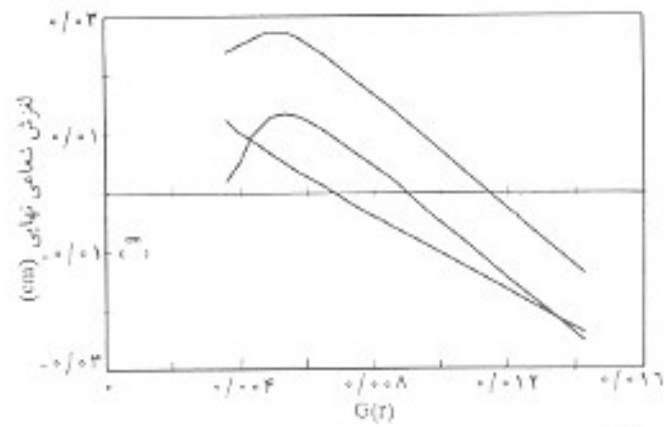


شکل ۱۷ - نمودارهای زمان کل فرایند برای الیاف دارای مدول بانگ مختلف بر حسب اندیس توانی سیال.

لوله است) می توان نتیجه گرفت که الیاف در نزدیکی دیواره به سمت محور لوله خواهند لغزید و الیاف حوالی محور لوله به سمت دیواره منتقل خواهند شد. قبلا نیز به تجربه ثابت شده است که در نزدیکی مرکز (محور مرکزی) لوله (جایی که شعاع کم است) و دیواره آن، غلظت ناچیزی از لیف وجود دارد و الیاف نظیر حلقه‌های نواحی بین مرکز و دیواره لوله را پر می‌کند [۹، ۱۲] قبلا گفته شد که هرچه اختلاف سرعت سیال در دو انتهای لیف بیشتر باشد، پدیده لغزش شعاعی بیشتر خواهد بود، بنابراین هرچه طول لیف بیشتر باشد یعنی R_p افزایش یابد، چون لیف خطوط جریانی بیشتری را قطع می‌کند، بنابراین اختلاف سرعت در دو انتهای لیف بیشتر شده و لغزش شعاعی افزایش خواهد یافت. با توجه به بحث اختلاف سرعت در دو انتهای لیف و تاثیر آن بر لغزش شعاعی می توان نتیجه گرفت که زیاد شدن S مسبب افزایش

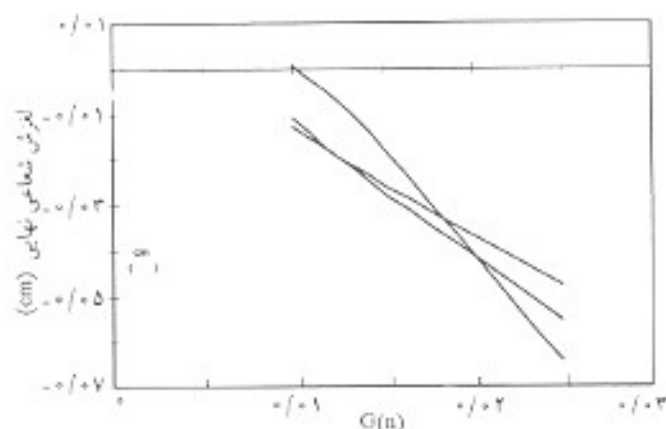


شکل ۱۸ - نمودارهای زمان کل فرایند برای الیاف دارای مدول بانگ مختلف بر حسب شعاع بدون بعد.

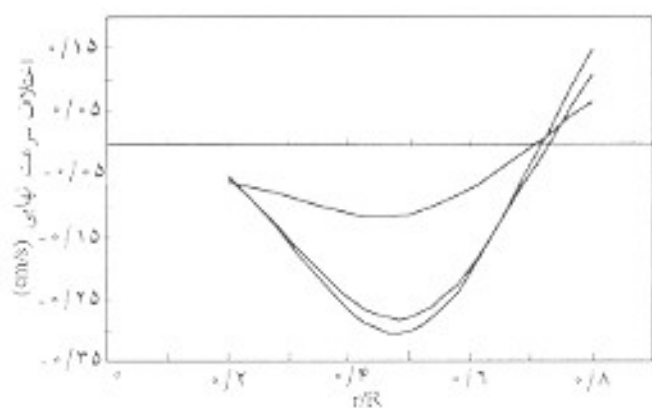


شکل ۱۵ - نمودارهای لغزش شعاعی نهایی برای الیاف دارای مدول بانگ مختلف بر حسب G (تغییرات G بر حسب شعاع لوله).

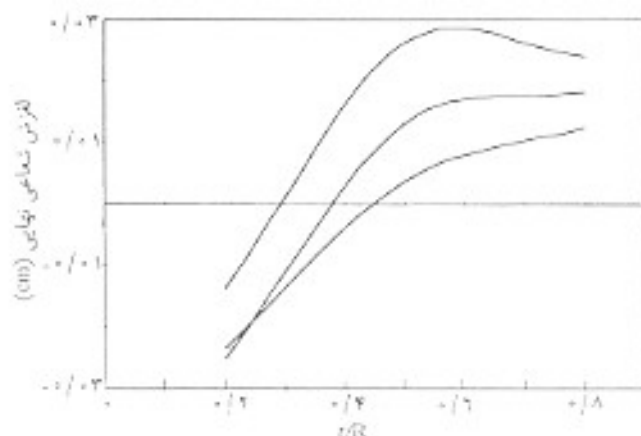
$\nu/5E:1=$ رفتاری متفاوت از سایر مدولهای بانگ نشان داده است. توجه این امر بدو صورت امکان پذیر است: یکی اینکه در این مدول، به علت عدم خمش لازم برای رسیدن به حالت S بحرانی، رفتار لیف تقریبا خطی بوده است یا اینکه لیف به شرایط حدی شکنندگی یا انقراضی نظایر آن رسیده است. در هر دو صورت مکانیسم عملکرد تغییر یافته است و در نتیجه بین این رفتار و مدولهای بانگ دیگر باید مکانیسمهای جدیدی برای مدل در نظر گرفت یا اینکه محدوده پیش بینی مدل را به این طریق معین کرد. از نمودار ۱۵ می توان دریافت که در G های اندک (نزدیک دیواره) لغزش شعاعی نهایی با افزایش G زیاد می شود. سپس، در یک مقدار معین G به مقدار ماکسیمم می رسد و در ادامه کاهش می یابد و حتی به مقادیر منفی نیز می رسد. در G های بزرگ (نزدیک محور لوله) لغزش منفی است. با توجه به نحوه تعریف محورهای مختصات در مدل سازی مزبور (جهت مثبت محور شعاعی به سمت مرکز



شکل ۱۶ - نمودارهای لغزش شعاعی نهایی برای الیاف دارای مدول بانگ مختلف بر حسب G (تغییرات G بر حسب اندیس توانی سیال).



شکل ۱۹ - نمودارهای لغزش شعاعی نهایی برای الیاف دارای مدول بانگ مختلف بر حسب شعاع بدون بعد.

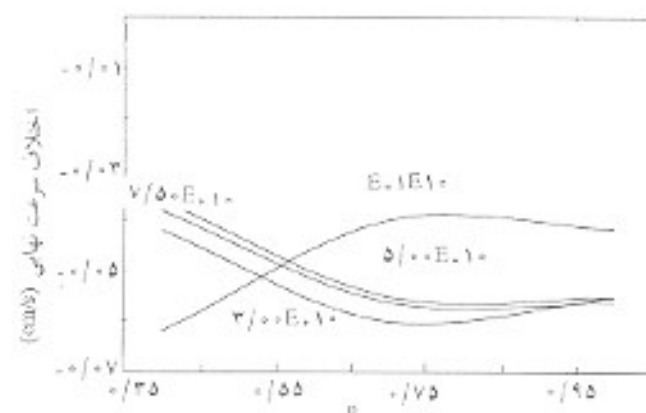


شکل ۲۰ - نمودارهای لغزش شعاعی نهایی برای الیاف دارای مدول بانگ مختلف بر حسب شعاع بدون بعد.

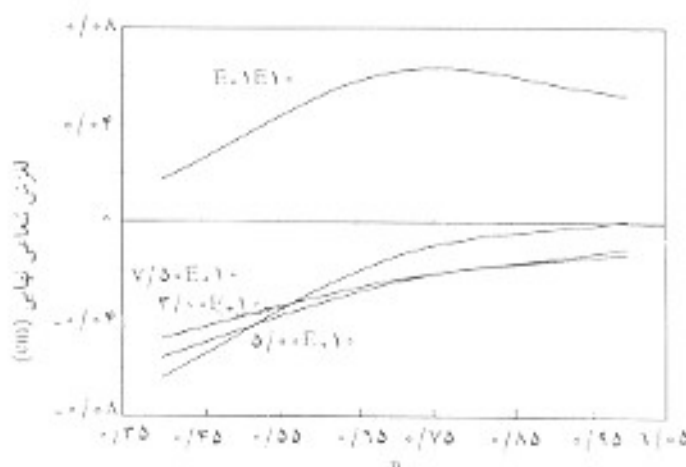
در نمودار ۱۶ تغییرات δ بر حسب n ارائه شده است. همان گونه که دیده می‌شود، افزایش n (کاهش δ) سبب کاهش لغزش شعاعی شده است. می‌توان دید که اینجا هم، مدول بانگ $7/50 E_{.10}$ رفتاری متفاوت از دو مدول بانگ دیگر نشان می‌دهد. این امر مبین وجود تغییرات رفتار بین این مقدار مدول بانگ با مقادیر دیگر است.

نمودارهای ۱۷ و ۱۸ بیانگر تغییرات مدت زمان نیم چرخش بر حسب موقعیت مکانی لیف یا تغییرات اندیس توانی سیال است (تغییرات زمان با موقعیت مکانی در نمودار ۱۸ و تغییرات زمان با اندیس توانی در نمودار ۱۷ دیده می‌شود). نکته مهم اولاً شباهت رفتار هر دو نمودار است، ثانیاً در هر دو نمودار می‌توان دید که اختلاف چندانی بین نتایج سه مدول بانگ متفاوت وجود ندارد. طبق نمودار ۱۸ با افزایش t/R ، یعنی با نزدیک شدن به دیواره لوله، زمان نیم چرخش سربها کاهش می‌یابد. این تغییرات تا میزان $t/R = 0/5$ بسیار شدید بوده است.

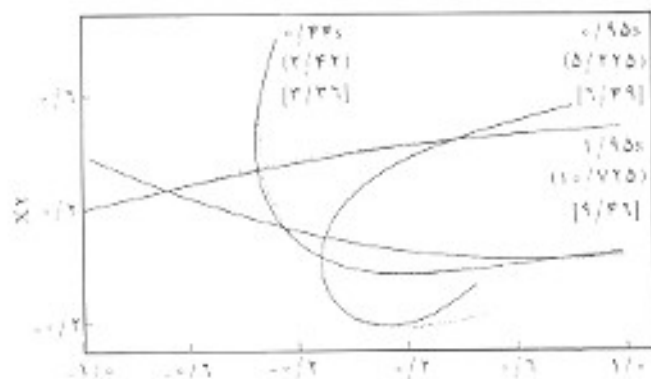
تعداد خطوط جریان قطع شده به وسیله لیف شده و بنابراین لغزش شعاعی را افزایش خواهد داد. با کاهش S (لیف بسیار خمش پذیر) لیف عملاً از نظر بعد X در قسمت محدودی می‌چرخد و به علت خمش زیاد، دو انتهای لیف به همدیگر نزدیک شده و اختلاف سرعت بین دو انتها رفته رفته کاهش می‌یابد، بنابراین لغزش شعاعی به سمت صفر میل می‌کند. ولی، نمودارها بیانگر افزایش لغزش شعاعی با کاهش S اند. از تلفیق این نتیجه و بحث قبل می‌توان نتیجه گرفت که در G ها و R_p های مختلف، افزایش لغزش شعاعی در یک جایی باید به مقدار صفر برسد که این امر در مقدار مشخص S به نام S بحرانی رخ خواهد داد. در این مقدار S ، لغزش شعاعی پیشینه خواهد بود. S بحرانی عددی ثابت نیست و بسته به G و R_p می‌تواند تغییر کند. این مطلب را برای دو لیف مختلف در شکل ۱۵ می‌توان دید.



شکل ۲۱ - نمودارهای اختلاف سرعت نهایی برای الیاف دارای مدول بانگ مختلف بر حسب اندیس توانی سیال.



شکل ۲۲ - نمودارهای لغزش شعاعی نهایی برای الیاف دارای مدول بانگ مختلف بر حسب اندیس توانی سیال.



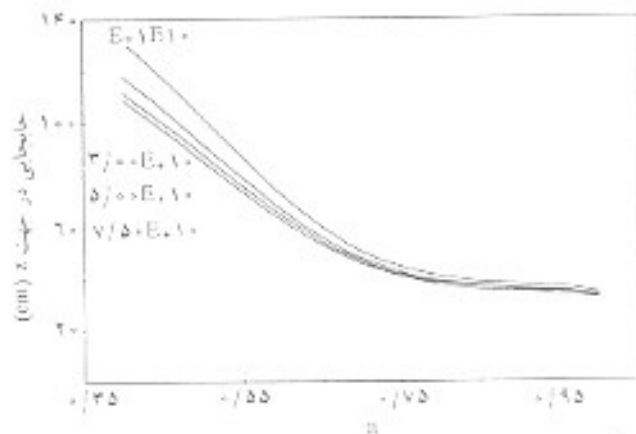
شکل ۲۵- مقایسه نتایج حاصل از مدل فرانکو و مدل بیهود یافته فعلی برای حوزه جریان خطی (Ma=0/019) (خطوط نقطه چین مابین نتایج مدل فرانکو است).

طبق شکل ۲۱ می‌توان رفتار مربوط به حالت S بحرانی و مقدار ماکسیمم لغزش شعاعی نهایی را دید. موضوع دیگر رفتار نامتعارف لیف با مدول یانگ $E=7/5 \times 10^9$ است که با رفتار همین لیف در شکلهای ۱۵ و ۱۶ همخوانی دارد و به نوعی مویده بحث تغییرات احتمالی مکانیسم رفتار لیف بشمار می‌آید.

با کاهش α ، لغزش محوری نیز سریعاً افزایش می‌یابد. این امر هم از نمودار ۲۳ مشخص است. تاثیر دیگر α را می‌توان روی نیم‌رخ سرعت سیال دید. کاهش α سبب دور شدن نیم‌رخ سرعت از حالت سهمی شده و در یک فاصله مشخص از محور، مقدار سرعت با کاهش α افزایش خواهد یافت. این امر سبب افزایش سرعت موثر بر لیف شده و طول طی شده تا رسیدن به شرایط نهایی را بیشتر می‌کند. از سوی دیگر، کاهش α سبب کمتر شدن گرادینان سرعت سیال در بخش بزرگی از نقاط حوالی محور لوله می‌شود. بنابراین لیف در چنین شرایطی در دو انتهای خود اختلاف سرعت کمتری احساس می‌کند و سرعت نیم‌چرخش کاهش خواهد یافت (زمان نیم‌چرخش افزایش می‌یابد).

تاثیر تغییرات α روی لغزش شعاعی نهایی در نمودار ۲۰ دیده می‌شود. بطور کلی، افزایش α سبب کاهش لغزش شعاعی می‌شود. ولی، برای حالت رفتار لیف بسیار خمش‌پذیر این موضوع معتبر نیست. با مقایسه این نتیجه با نتایج حاصل از ترسیم اختلاف سرعت نهایی بر حسب α (نمودار ۲۲) دیده می‌شود که در این حالت بر رفتار لیف بسیار خمش‌پذیر با بقیه ایاف کاملاً متفاوت است. دلیل این تفاوت مشخص نیست. صرف نظر از این استعاره سایر ایاف نظیر یکدیگر است.

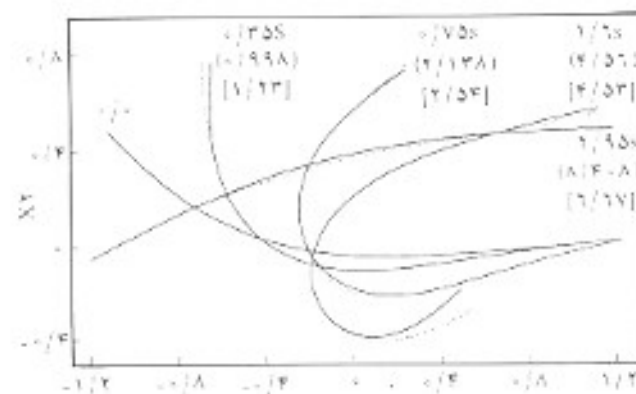
شکلهای ۲۱ و ۲۲ اختلاف سرعت نهایی ایاف یا چند مدول یانگ مختلف را بر حسب α و Re نشان می‌دهند. طبق نمودار ۲۱، اختلاف سرعت نهایی در $0/5 < Re$ بیشترین مقدار را دارد. یعنی در این منطقه لیف حداکثر عقب‌ماندگی (لغزش) را نسبت به سیال نشان



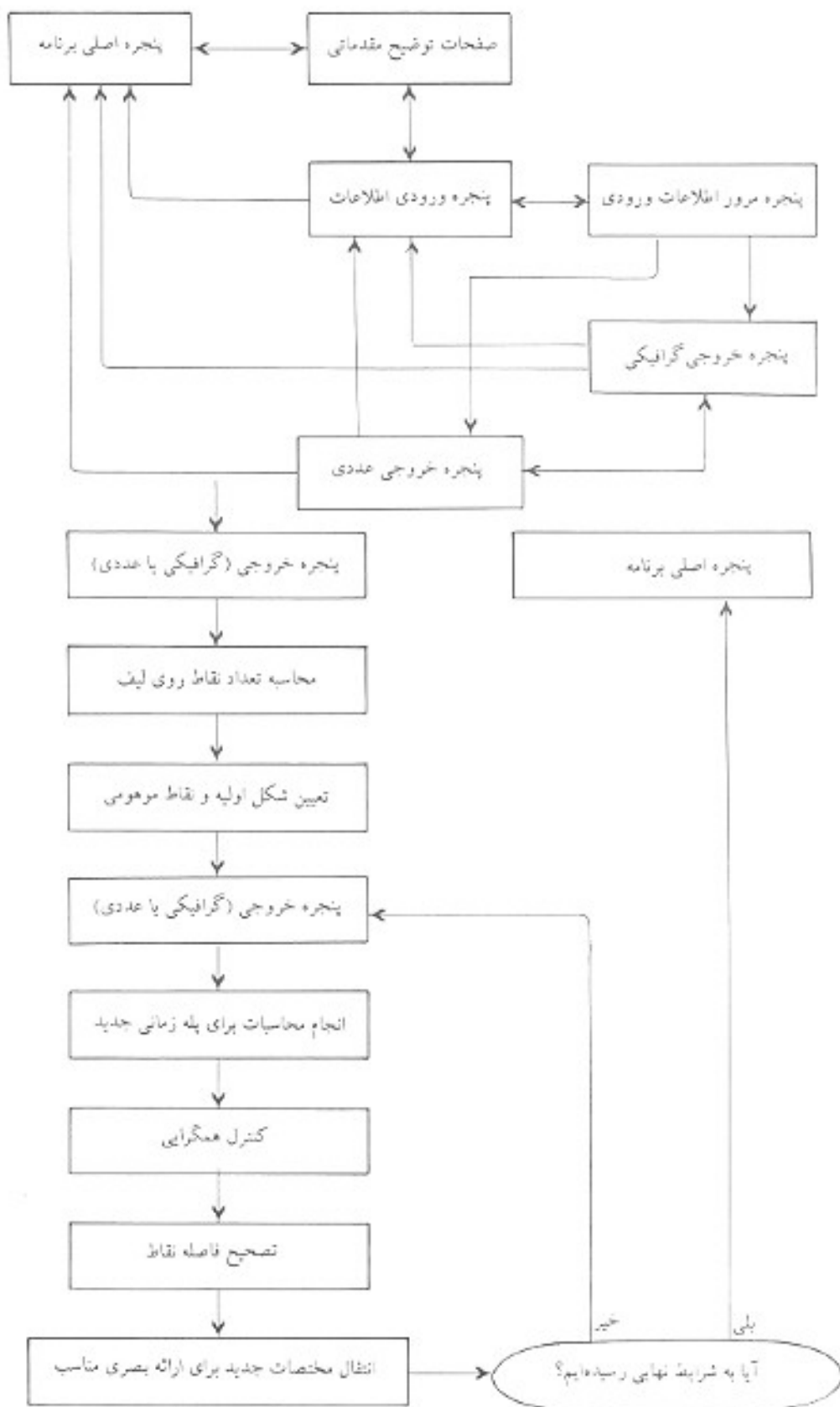
شکل ۲۳- نمودارهای جابجایی در جهت Z برای ایاف دارای مدول یانگ مختلف بر حسب اندیس توانی سیال.

منحنی‌ها زیاد است) و با افزایش بیشتر Re ، تدریج به حالت خطی با شیب اندک میل می‌کند. محل وقوع نقطه شکست منحنی برای هر سه مدول یانگ با یکدیگر همخوانی دارد. همین امر را برای α در نمودار ۱۷ می‌توان دید. طبق این نمودار نیز تغییرات تا $\alpha=0/7$ کاهش بوده سپس با افزایش α ، منحنی‌ها یکدیگر را می‌پوشانند و رفتاری خطی با شیب اندک پیدا می‌کنند. مقایسه این نتایج با منحنی‌های نمودار ۲۳ که مقدار مسافت طی شده را بر حسب α نشان می‌دهد بیانگر شباهت کامل رفتار این دسته منحنی‌ها است.

شکلهای ۲۱ و ۲۲ نیز ترسیم دیگری از لغزش شعاعی نهایی است. متغیرهای این دو شکل به جای G ، Re و α است. همان گونه که دیده شد، افزایش α و Re هر دو به معنی کاهش G است. بنابراین، در واقع این دو شکل همان رفتار و نتایج دو شکل ۱۷ و ۱۸ را بیان می‌کند.



شکل ۲۴- مقایسه نتایج حاصل از مدل فرانکو و مدل بیهود یافته فعلی برای حوزه جریان خطی (Ma=0/017) (خطوط نقطه چین مابین نتایج مدل فرانکو است).



شکل ۲۶ - روند نمای کلی و بخش محاسباتی نرم افزار.

flow at low reynolds numbers"; J. Fluid Mech.; 14, 1962.

4. Mason S. G. and Goldsmith H. Rheology: Theory and Application; 4, (Chap. 2, Eirich F. R. (Ed.) Academic, New York, 1967.

5. Putman J. F. T. and Kasri N., "The motion of rigid rod-like particles suspended in non-homogenous flow fields. J. Multiphase Flow; 1992.

6. Kenjosek M. and Herz J. W. S.; Computational theory of bending curves. "Part I: The initial value problem for the three-dimensional elastic bending curves"; Fiber. Sci. Thech.; 3, 1972.

7. Franco A. S.; "Dynamics of flexible fibers in a flowing suspension"; Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering.

8. Cox R. S.; "The motion of london slender bodies in a viscous fluid". Part I: General Theory; J. Fluid Mech.; 44, 791-810, 1970.

9. Kasri N.; "Dynamic of fibers in suspensions"; Ph. D. Thesis department of Chemical Engineering; University of Wales, University Coletge of Swansea, 1993.

10. Vasman A., Narkis M., Siegmán A. and Kenig S., "Short fiber reinforced thermoplastics". 1- Rheological properties of glass fiber reinforced noryl. Polym. Comp.; 10, 2, April 1989.

11. Vasman A., Narkis M., Siegmán A. and Kenig S., "Short fiber reinforced thermoplastics". 2- Interrelation between fiber orientation and rheological properties of glass fiber reinforced noryl. Polym. Comp.; 10, 2, April 1989.

۱۲- محمدرضا ابراهیمیان، الگوسازی ریاضی و رایانه‌ای پویابیکت آویزش لیفتهای خم‌شو، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، ۱۳۷۵.

۱۳- آرش فیروزی، بهبود مدل پیش‌بینی جهت‌گیری الیاف در حوزه‌های جریان‌های مدانه‌های پلیمری، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، ۱۳۷۶.

۱۴- نوراله کتیری یدهندی، محمدرضا ابراهیمیان، مدل‌سازی ریاضی و رایانه‌ای دینامیک تعلیق لیفتهای انعطاف‌پذیر، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۷۸.

۱۵- آرش فیروزی، نوراله کتیری یدهندی، بهبود مدل ریاضی رایانه‌ای پیش‌بینی جهت‌گیری الیاف در حوزه‌های جریان‌های مدانه‌های پلیمری، ششمین کنگره مهندسی شیمی ایران، اردیبهشت ۱۳۸۰.

می‌دهد. با افزایش t/R (از نزدیک محور لوله به سمت دیوار) ابتدا لغزش لیف نسبت به سیال، یعنی اختلاف سرعت بین لیف و سیال، افزایش می‌یابد، سپس به یک مقدار ماکسیمم رسیده و با افزایش t/R (بیش از 0.5) دوباره کاهش می‌یابد. در حوالی دیواره لوله، حتی ممکن است اختلاف سرعت مثبت نیز شود، یعنی لیف از سیال پیش بیفتد. نقایبه رفتار الیاف در اثر تغییرات n (نمودار ۲۲) - رفتار الیاف مشابه در اثر تغییرات t/R (نمودار ۲۱) شاهدت این دو شکل را بیان می‌کند. طبق شکل ۲۲ نیز می‌توان دید که با افزایش n ، اختلاف سرعت الیاف و سیال بتدریج زیاد می‌شود، سپس در $n = 0.7$ به یک مقدار ماکسیمم می‌رسد و با افزایش بیشتر n ، شاهد کاهش اختلاف خواهیم

۴۵

نتیجه گیری

الگوسازی ریاضی و رایانه‌ای پیش‌بینی جهت‌گیری الیاف با خم‌شوندگی محدود از دیدگاه مدل پیمان و کتیری ارائه شده و حل عددی مدل مزبور در حوزه‌های جریان‌های مختلف بررسی شده است. بر اساس مدل ریاضی و با گسترش آن به حوزه‌های جریان‌های مختلف و مدل‌های ژئولوژیکی بیانگر رفتار مذابهای پلیمری، نرم‌افزاری با قابلیت‌های فراوان به نام composite simulator برای انجام محاسبات مربوط ارائه و قابلیت‌ها و کاربردهای مختلف آن بیان شده است. به کمک این نرم‌افزار پدیده‌های سرعت نسبی چرخش و لغزش لیف در جریان سیال تابع قانون توان در حوزه جریان‌های لوله با مقطع ثابت بررسی شده و نیز تغییر شکل لیف در حوزه جریان‌های مزبور مطالعه و مشخص شده است که با کاهش خم‌شوندگی، سرعت چرخش افزایش می‌یابد. با مطالعه پدیده لغزش لیف به سمت شعاع لوله نتایج حاصل از تجربه‌های قبلی مبنی بر کمتر بودن غلظت الیاف در ناحیه مرکزی و دیواره لوله ناپید می‌شود. همچنین، با بررسی حالت لیفتهای بسیار خم‌شو یک میزان خمش بحرانی بدست می‌آید که در آن مقدار لغزش لیف به سمت شعاع لوله بیشه می‌شود.

مراجع

1. Jeffrey G. B. "The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid"; Proc. Roy. Soc., A102, 1992.

2. Taylor G. I., "The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid"; Proc. Roy. Soc., A103, 1993.

3. Bretherton F. P., "The motion of rigid particles in a shear