بررسی اثر پارامترهای مختلف بر رفتار الیاف انعطاف پذیر در حوزه جریانی 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 کشاورز[*]، آرش فیروزی
تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی
دریافت: ۸۰/۶/۱۹، پذیرش: ۸۰/۸/۱۶

چکیده

در کامپوزیتهای پلیمری گرمانرم که از افزایش الیاف کوتاه آلی/معدنی به پلیمرها بوجود می آیند، استحکام نهایی در جهت آرایش الیاف افزایش می یابد. بنابراین، بررسی تغییر شکل و آرایش الیاف بر حسب زمان ضرورت خواهد یافت. به کمک یک مدل ریاضی برای محاسبه نیروهای مختلف وارد بر الیاف امکان پیشگویی آرایش و با درنظر گرفتن میزان انعطاف‌پذیری الیاف، این بررسی در حوزه‌های جریانی مختلف برای سیالات غیر نیوتنی انجام شده و بر مبنای آن، نرم‌افزاری قدرتمند به نام composite simulator بوجود آمده است. به کمک این نرم‌افزار، پدیده‌هایی چون تغییر شکل، سرعت بیم چرخش و نوسانهای تناوبی و محوری ذرات در حوزه جریانی سیال تابع قانون توان در لوله با مقطع دایروی یکنواخت بررسی شده که نتایج در این مقاله ارائه می شود.

واژه‌های کلیدی: پلاستیکهای تقویت شده با الیاف، الیاف کوتاه، جهتگیری الیاف، کامپوزیتهای پلیمری گرمانرم، مذابهای پلیمری
Key Words: fiber reinforced plastics, short fiber, fiber orientation, thermoplastic polymeric composites, polymeric melts

مقدمه

بررسی حرکت الیاف کوتاه در تعلیقها به اوایل قرن بیستم برمی‌گردد. انگیزه اولیه در بررسی این موضوع به وسیله دیدگاه جداسازی فازی و جداسازی رئولوژیکی سیالهای دو فازی بوجود آمد و سپس، در فرایندهای تولید مواد کامپوزیتی جایگاهی تازه یافت. پژوهشهای انجام شده در این مبحث را می‌توان به دو دسته آزمایشهای تجربی و مدلسازیهای ریاضی تقسیم کرد. اولین قدم در زمینه مدلسازی ریاضی توسط جفری برداشته شد. وی با بررسی حرکت ذره‌های بیضی شکل در یک سیال نیوتنی و با فرض عدم برخورد ذرات با یکدیگر و نیز پیچش، خمش و خرد شدن الیاف و نیز خطی بودن حوزه جریانی که به معنی ثابت ماندن سرعت برش در طول ذره است، نتیجه گرفت که حرکت ذرات بیضی شکل چرخشی و تناوبی خواهد بود [۱]. بیلور با انجام آزمایشهای عملی، نتایج نظری کار جفری را تایید کرد

[*] مسئول مکاتبات، نشانی نگار: KESHTGOUS@IUST.AC.IR

[۲]. بری‌درتون معادلات جفری را به کمک مفهوم تانسور به شکل همگانی‌تر عرضه کرد [۳]. ماسون و همکارانش مطالعات مزبور را در حوزه‌های جریانی گوناگون آزمودند [۴]. پیتمان و کثیری 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 نخستین بار امکان محاسبه میزان و حالت خمش لیف و نیز لغزش آن نسبت به سیال فراهم شد. گوتاپاسک و هرل برای نخستین بار ضریب خم‌شوندگی لیف را وارد معادله کردند [۶]. فرانکو الیاف را دارای خم شوندگی محدود، کش‌نیامدنی و مقاوم در برابر پیچش درنظر 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 کثیری با تصحیح دو ایراد عمده مدل فرانکو، مدل جدید را ارائه کرده‌اند [۹].

مطالب گفته شده درباره تعلیقهای رقیق که الیاف با همدیگر و دیواره برخوردی ندارند، صحیح است. پدیده برخورد الیاف 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 الیاف دیگر یا آثار دیواره باشد، ارائه نشده است.

پژوهشگران در بخش دیگری از مطالعات به بررسی خصوصیات فیزیکی کامپوزیت مذاب دارای الیاف پرداخته‌اند. در این دسته مطالعات مطالبی چون گرانروی مذاب، پدیده تورم دهانه، خرد شدن الیاف، جهتگیری الیاف و غیره مورد بررسی تجربی و مدلسازی ریاضی قرار گرفته است [۱۰،۱۱]. 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 کثیری و روش حل عددی آن بررسی می‌شود. سپس، بر مبنای مدل ریاضی بهبود یافته پیتمان و کثیری، نرم‌افزاری که جهت انجام محاسبات عددی مدل نهایی و ارائه لحظه به لحظه اطلاعات حاصل به صورت گرافیکی ـ عددی تهیه شده و CompositeSimulator نام گرفته است معرفی می‌شود. به کمک این نرم‌افزار، پدیده‌های تغییر شکل، زمان نیم چرخش، لغزش شعاعی و لغزش محوری لیف درحوزه جریانی سیال تابع قانون توان در لوله‌های با مقطع دایروی یکنواخت بررسی و نتایج حاصل به صورت نمودارهایی ارائه و مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

محاسبات مدل تا زمانی ادامه می‌یابدکه 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 موردنظر، نتایج مدل می‌تواند مبنایی برای طراحی 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 الیاف را در شرایط فرایند مرتبط پیش‌گویی کند. بنابراین، با کنترل شرایط فرایند (دما، دبی، گرانروی و...) می‌توان تا حدودی نحوه آرایش الیاف را در خروجی سیستم شکل‌دهی کنترل کرد.

اساس نظری

مبنای کار انجام شده، مدل پیتمان و کثیری بوده و برای حل مدل، فرضیات زیر درنظر گرفته شده است:

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

۲ - حرکت لیف شبه ایستاست.

۳ - لیف جسمی کاملا کشسان 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 خنثی، سطح مقطع لیف ثابت و داده لیف همگن است.

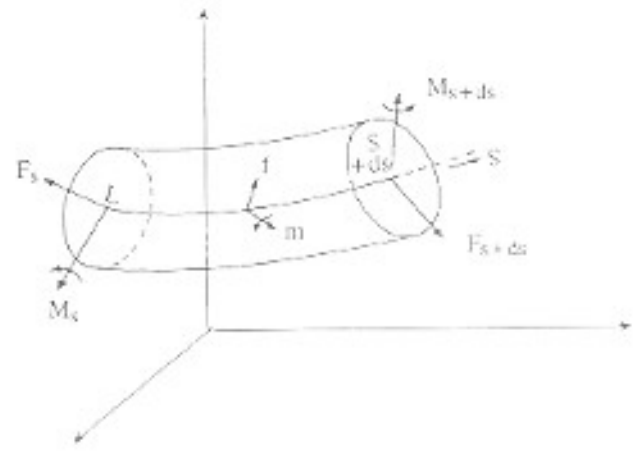
۶ - هیچ نیروی بیرونی نظیر نیروهای وارد از طرف میدانهای الکتریکی و مغناطیسی یا سایر الیاف به لیف وارد نمی‌شود.

یکی از فرضیات اصلی مدل پیتمان کثیری، فرض نیوتنی بودن سیال است. از آنجا که این فرض در فرایندهای تولید کامپوزیتهای پلیمری فرض نادرستی است، بنابراین مهمترین 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، ds در $S=s$ از لیف (شکل ۱) 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 کارتزین $X(S,t)$ 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 درنظر گرفته می‌شود. با انجام موازنه‌ها معادلات زیر برای نیرو و ممان بدست می‌آیند:

$$F'+f=0 \qquad (۱)$$

$$M'+m+(U')=0 \qquad (۲)$$



شکل ۱ - موازنه نیرو و ممان روی المان دیفرانسیلی از لیف.

که در آن (') نشانه مشتق کمیت موردنظر برحسب s است. برای تعیین نیروی f که همان نیروی دراگ وارد بر جسم است از نظریه اجسام قلم‌گون (Slender Bodies) استفاده می‌شود. از دیدگاه نظری اجسام قلم‌گون 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 قلم‌گون به جای درازای یک جسم استوانه‌ای، منحنی محور آن جسم را درنظر می‌گیرد. این منحنی همان پخش نیروهای نقطه‌ای روی یک خط است.

این پدیده توسط کاکس [۸] بررسی شده و رابطه‌ای بین سرعت سیال دست نخورده و نیروی f بدست آمده است که اگر نسبت ویژه ذره $k=(L/r)$ 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:

$$f(s)=\frac{2\pi\mu}{\ln k}[2(1-\alpha)](U-V)+O(\ln k)^2 \qquad (3)$$

در این معادله f ممان دوم سطح مقطع لیف و $O(\ln k)$ تابعیت خطاست. این معادله در واقع شکل ساده شده معادله نگرش جسمهای قلم‌گون است که در آن f(s) نیرو به ازای طول لیف در موقعیت s (روی محور لیف)، U سرعت سیال دست نخورده، V سرعت لیف، L نصف درازای لیف، r شعاع لیف و α گرانروی سیال است. چون، در عمل نسبت ویژه لیف بزرگتر از ۱۰۰ است، بکاربردن معادله ۳ در مدل مانعی ندارد. محدودیت اصلی در انتخاب لیف مناسب عدم عدول خمش ماکسیمم لیف در اثر نیروی وارد شده از طرف حوزه جریانی از مقدار $5cm^{-1}$ است. این شرط بر مبنای معادله $q_{max}=T/(\pi r^2 E)$ بیان می‌شود. در این رابطه T بیانگر تنش، E مدول یانگ و r شعاع لیف است. بنابراین، الیافی که دارای خمش ماکسیممی بیش از این مقدار باشند، در محدوده قابل قبول مدل قرار می‌گیرند. از جمله این الیاف، الیاف معدنی کربن و شیشه و یا الیاف آلی‌اند. برای تعیین M، F از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$M=Bqb \text{ و } F=T(\pi r^2) \qquad (4)$$

که در آن T بیانگر تنش است. B ممان 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 آنجاکه هیچ رابطه‌ای برای تعیین n (ممان 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 قرارگیری محور آن در راستای جریان نخواهد داشت.

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

$$V=X'=U+\frac{\ln k}{2\pi\mu}[(T'+Bq'q)t+\frac{1}{2}(Tq-Bq''+Bqr^2)n- \qquad (5)$$

$$\frac{B}{2}(2\tau q'+qr')b]$$

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، T'، τ تنش در درازای لیف (مشتق تنش نسبت به s)، B نشان دهنده اندازه خم‌شوندگی لیف، t بردار یکه مماس بر لیف، n بردار عمود بر خط مماس لیف، b سومین بردار یکه روی هر نقطه از لیف (عمود بر t، n)، q، q'، q'' به ترتیب خمش لیف، مشتق اول خمش نسبت به s و مشتق دوم نسبت به s و τ و τ' 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 فرض کش نیامدنی بودن لیف، معادله زیر برای محاسبه تنش در درازای لیف بدست می‌آید:

$$T''-\frac{1}{2}q^2T+\frac{3}{2}Bqq''+Bq'^2-\frac{1}{2}Bq^2\tau^2+\frac{2\pi\mu}{\ln k}U't=0 \qquad (6)$$

$$q(\pm1)=q'(\pm L)=0$$

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

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 توابع درجه سه، تصویر و به شکل زیر بیان شده است:

$$X_2=f_{21}(X_1)$$

(۷)

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

سپس، از روش تکرار استفاده شده است. برای تامین شرایط مرزی، چند نقطه در دو انتهای لیف، مجددا مکانیابی می‌شوند که روش صافکاری انتهای لیف نامگذاری شده است. با توجه به معادله ۵، U یعنی سرعت سیال دست نخورده، به شکل رابطه‌ای تحلیلی باید از پیش مشخص باشد. پیتمان و کنیری با کمک این مدل، به بررسی رفتار لیف در سیال نیوتنی جاری در حوزه جریانی خطی و سهمی پرداخته‌اند طبق این پژوهش مشخص شده است که مدل مناسبتر برای بیان رفتار سیالهای پلیمری متعارف، مدل قانون توانی یا تلفیقی از آن با مدل بینگهام است.

به منظور گسترش کار پیتمان و کنیری، سعی شده است که مدل در بستر حوزه‌های جریانی پیچیده‌تر و عملی‌تر پیاده شود، چون هدف اصلی در این پژوهش، بررسی پدیده‌هایی است که در حین فرایند فایبرگیری در قسمت خروجی رورزن 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 نویراستوکس ساده شده و با جایگذاری رابطه بین نرخ تنش و شدت برش براساس مدل رئولوژیکی مطلوب، معادله دیفرانسیل حاصل برای تعیین V یا سرعت نقطه‌ای سیال نسبت به جهت (جهات) فضایی موردنظر حل می‌شود. از آنجا که تفاوت اصلی در اغلب مدلهای رئولوژیکی بیانگر رفتار مذابهای پلیمری، ضریب گرانروی و سرعت برش است، بنابراین علاوه بر مدل سیال نیوتنی، در روابط ۸ مدل گرانروی دیگری بررسی و جهت تعیین حوزه‌های جریانی مورد استفاده گرفته است [۱۳]. بدین ترتیب بانک اطلاعاتی نرم‌افزار شامل حوزه‌های جریانی پیچیده‌ای نظیر جریان سیال غیرنیوتنی بین دو صفحه موازی، جریان بین دو استوانه هم مرکز و جریان در کانالهای با مقطع دایره‌ای غیر یکنواخت (همگرا یا واگرا) نیز می‌شود. مثلا، معادله جریان سیال تابع قانون توان در یک لوله (که ادامه مطلب بر مبنای این حالت است) بدین ترتیب می‌باشد:

$$V_z=V_0[1-(\frac{r}{R})^{(n+1)/n}]$$

(۸)

که

$$V_0=(\frac{n}{n+1})k_0^{-1/n}(\frac{\Delta P}{2L})^{1/n}R^{(n+1)/n}$$
$$V_r=V_\theta=0$$

پارامترهای q_0 و q_0' و q_0'' 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 موردنظر روی قسمت عطف منحنی یا در بخشی از آن قرار گرفته باشد، که در آن جهت تقعر منحنی عوض می‌شود.

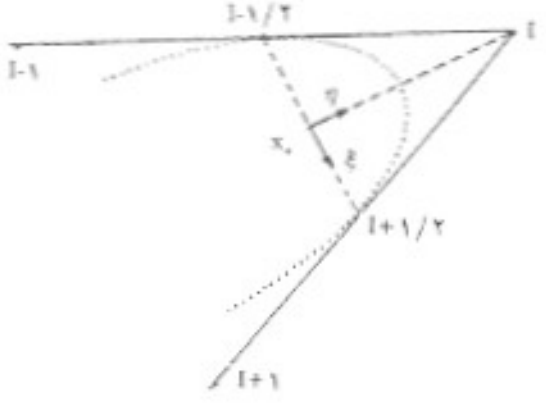
از دید روش سهمی، شکل لیف در همسایگی نقطه I با یک سهمی به شکل $f=a+bt^2$ تعریف می‌شود. بر این اساس مشتقهای عددی مطلوب معین شده و سپس به روشهای عددی حل شده‌اند. برای بدست آوردن مقدار مرزی، روش پیش‌بینی و تصحیح اویلر ساده و اصلاح شده بکار رفته است.

گروههای بدون بعد

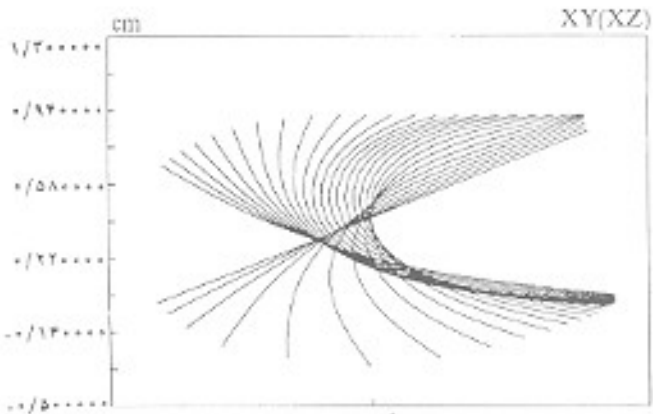
برای کلی‌تر بودن نتیجه‌ها و کاربرد آسانتر در صنعت، به کمک آنالیز ابعادی چند گروه بدون بعد بدست آمده است که در زیر آورده شده‌اند:

$$S=\frac{E}{\mu\gamma'(L/r)^2},\quad Rp=\frac{L}{r},\quad G=\frac{r\gamma''}{\gamma'},\quad t=t_1\gamma' \qquad (۹)$$

در اینجا E مدول یانگ، μ گرانروی سیال، L نصف درازای لیف، r شعاع لیف، t_1 زمان جاری، γ' برابر $\partial u/\partial z$ و γ'' برابر $\partial^2U/\partial z^2$ است. U 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 I روی لیف.



شکل ۳- تغییر شکل لحظه به لحظه لیفی با طول cm ۲/۴ و نسبت ویژه ۳۰۰ و مدول یانگ AE۱۰ در حوزه جریان سیال در لوله با اندیس توانی ۰/۷ و گرانروی poise ۲۵۰.

انعطاف‌پذیری 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. t زمان بدون بعد است.

روشها

بر پایه روش حل عددی الگوی پیمان-کشیری، یک الگوسازی رایانه‌ای به نام composite simulator انجام شده است. composite simulator، برنامه‌ای 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 نرم‌افزار 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. بدین‌ترتیب 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 نرم‌افزار می‌باشند.

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

با کمک نرم‌افزار composite simulator تغییر شکل لیف در حوزه جریانی لوله با مقطع دایروی یکنواخت 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 یادشده، 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 یانگ، به شکل نخستین خویش برمی‌گردد. اندیس توانی سیال، n=۰/۷ 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 آزمونهای 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. همان گونه 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 عمدتا 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 نرم‌افزار 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 ۰/۴Z+۸ تعریف شده درون حوزه جریانی سیال تابع قانون توان در لوله قرار گرفته است. لیف

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

بررسی سرعت نیم‌چرخش لیف در جریان سیال درون لوله

یکی از پارامترهای طراحی در فرایندهای ساخت کامپوزیتهای پلیمری، سرعت نیم‌چرخش لیف در سیال است. هرچه سرعت نیم چرخش لیف بیشتر باشد، درازای لوله که سیال در آن جاری است، کوتاهتر می‌شود. در این پژوهش، منظور از نیم چرخش لیف این است که یک لیف به شکل خط راست که با افق زاویه ۱۰ درجه می‌سازد، پس از خم وراست شدن و چرخش به اندازه ۱۶۰ درجه دوباره با افق در جهت مخالف زاویه ۱۰ درجه بسازد. با یادداشت کردن زمان کل چرخش و معکوس کردن آن، سرعت نیم چرخش لیف بدست می‌آید [۹،۱۲].

با استفاده از روند بالا سرعت نیم چرخش برحسب Sها، R_pها و Gهای 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 می‌شود. مدل ریاضی موجود با درنظر گرفتن این تفاوت می‌تواند برای نخستین بار لغزش لیف نسبت به سیال را محاسبه کند. لغزش می‌تواند در دو سوی محور و شعاع لوله رخ دهد [۹،۱۲،۱۳].

لغزش در سمت محور نشان می‌دهد که لیف چه اندازه از سیال عقب می‌ماند یا جلو می‌افتد. در اینجا لغزش در جهت محور لوله برحسب سانتیمتر نشان داده شده و اثر S، R_p و G روی لغزش محوری بررسی شده است. در نمودارهای ۵ و ۶ و ۱۱ تا ۱۴ لغزش محوری در R_pهای ثابت برحسب S و Gهای گوناگون رسم شده است.

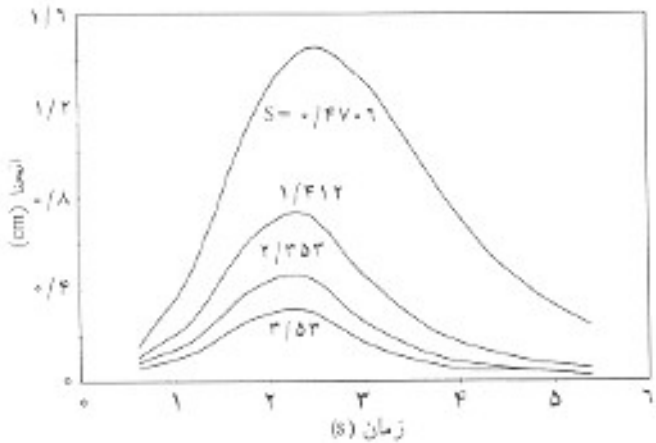
لغزش لیف در جهت شعاع لوله اهمیت بسیار زیادی دارد، چون همگنی و یکنواختی پخش لیفها در قطعه ساخته شده بستگی به آن دارد. هر تلاشی در کاهش لغزش شعاعی اثر زیادی بر کیفیت قطعه پایانی ساخته شده دارد. در اینجا، لغزش لیف در جهت شعاع لوله برحسب سانتیمتر نشان داده شده و اثر پارامترهای S، R_p و G روی آن بررسی شده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

نتایج و بحث

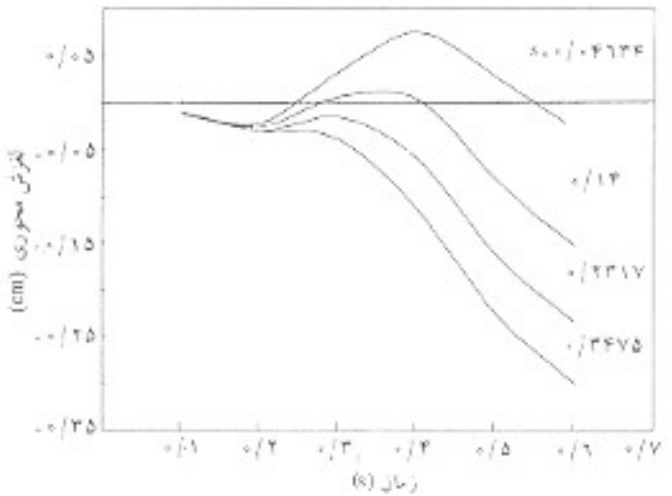
لیف زمانی به چرخش و خمش درمی‌آید که انتهای عقبی لیف نسبت به انتهای جلویی به خطوط جریان پرسرعت نزدیکتر باشد. یعنی، در تمام اجزای به عمل آمده اگر ضریب زاویه یا مقدار ثابت A از شکل اولیه لیف (نه هر دو بطور همزمان) منفی گردند، لیف به جای انجام یک نیم چرخش، بتدریج در امتداد محور حرکت قرار خواهد گرفت. تاثیر تغییر پارامتر عرض از مبدا (ثابت A شکل اولیه لیف) را می‌توان در نمودار ۹ مشاهده کرد. تغییرات A در گروه بدون بعد G منعکس می‌گردد، زیرا G تابعی از موقعیت قرارگیری لیف است که به وسیله مقدار ثابت شکل اولیه لیف یعنی A مشخص می‌گردد. تاثیر تغییر پارامتر S بر زمان نیم چرخش را نیز در نمودار مربوط می‌توان دید. افزایش S (افزایش مدول یانگ) مترادف با کاهش خم‌شوندگی است و همین امر سبب می‌شود 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 می‌گردد. از سوی دیگر، انتظار می‌رود تاثیر تغییرات R_p بر سرعت نیم‌چرخش، برعکس تاثیر S باشد. با مقایسه نتایج دیده شده است که با کاهش R_p، در Sهای ثابت، سرعت چرخش افزایش می‌یابد. بنابراین، کاهش R_p نیز سبب کم شدن خمش‌پذیری لیف می‌شود.

تاثیر تغییر ضریب زاویه شکل اولیه لیف را می‌توان در تغییر سرعت رسیدن به شرایط نهایی دید. با افزایش ضریب زاویه، لیف از همان لحظه اولیه، خطوط جریان بیشتری را قطع می‌کند و در نتیجه از ابتدا اختلاف سرعت بیشتری را در دو انتهای خود احساس کرده و سریعتر به چرخش درمی‌آید. یعنی، بطور کلی سرعت نیم‌چرخش 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 می‌شود با افزایش S، خمش ماکسیمم کمتر می‌شود و نیز از روی شکل کلی رفتار منحنی‌ها می‌توان



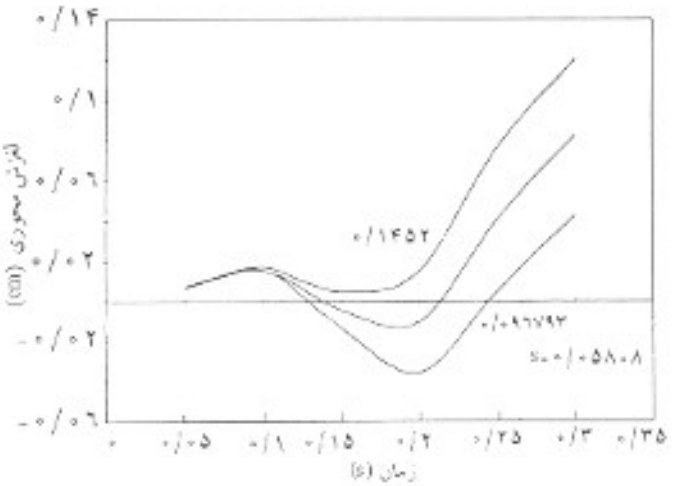
شکل ۴ ـ نمودارهای ماکسیمم خمش لیف‌های مختلف بر حسب زمان کل فرایند.



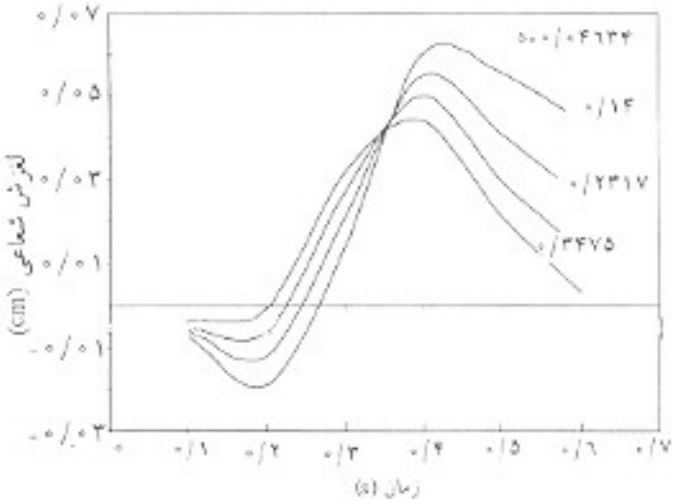
شکل ۵ ـ نمودارهای لغزش محوری الیاف مختلف بر حسب زمان کل فرایند در فاصله ۲/۵cm از محور لوله.

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 یانگ است. بر مبنای نمودار، همچنین می‌توان دید که با افزایش S، ماکسیمم خمش سریعتر رخ می‌دهد.

در نمودارهای ۵ و ۶ لغزش محوری نقطه مرکزی محور لیفهای با S متفاوت برحسب 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 کاملا با یکدیگر تفاوت دارند. از محور به سمت دیواره لغزش محوری



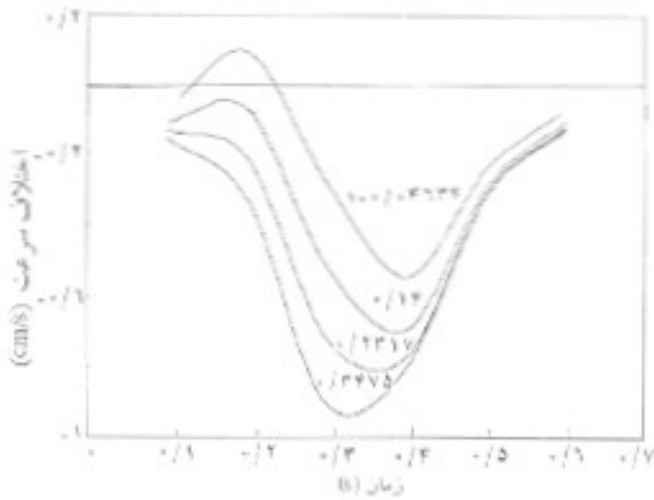
شکل ۶ ـ نمودارهای لغزش محوری الیاف مختلف برحسب زمان کل فرایند در فاصله ۴cm از محور لوله.



شکل ۷ ـ نمودارهای لغزش شعاعی الیاف مختلف برحسب زمان کل فرایند در فاصله ۲/۵cm از محور لوله.

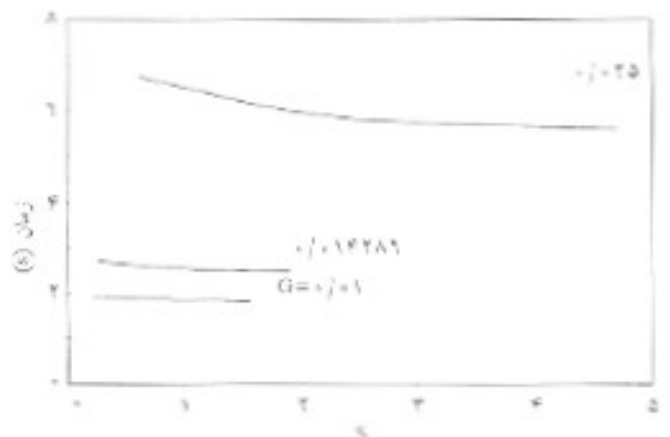
مثبت‌تر می‌شود، یعنی لیف از سیال پیش می‌افتد. در حوالی محور لوله لغزش منفی است. این نتایج را بدین صورت می‌توان توضیح داد که درمنطقه نزدیک محور لوله، اختلاف مقدار سرعت بین لایه‌های هم سرعت مجاور یا به عبارت بهتر، گرادیان سرعت، کم است. در نتیجه، لیفی که در این ناحیه تحت تنش قرار می‌گیرد، اختلاف سرعت کمتری در نیمه‌های بالایی و پایینی خود احساس می‌کند. اگر توزیع سرعت کاملا پلاگ (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 بطورکلی 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 نواحی 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 یانگ 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 منحنیها می‌توان دید که افزایش S یا کاهش خم‌شوندگی، لغزش محوری را مثبت‌تر می‌کند.

در نمودار ۷ پدیده لغزش شعاعی نقطه مرکزی محور لیف براساس زمان فرایند بررسی شده است. همان گونه که دیده می‌شود لیف تقریبا برای مدت کوتاهی دچار لغزش به سمت محور لوله می‌گردد که



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

البته با افزایش S این پدیده کاهش می‌یابد. سپس، 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 دورمی‌گردد. در نهایت با افزایش تاثیر مدول یانگ و صاف شدن تدریجی لیف، مرکز لیف دوباره به سمت محور لوله متمایل می‌شود. همچنین، پدیده لغزش شعاعی، همان طور که از نمودار دیده می‌شود، با افزایش S زیاد می‌شود.

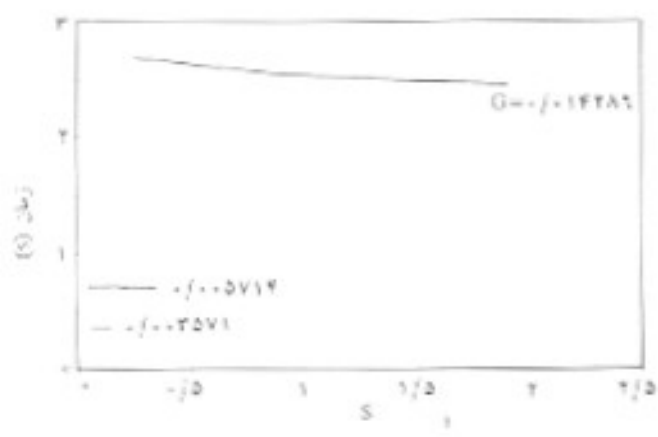


شکل ۹- نمودارهای زمان نیم‌چرخش در ذکاهای مختلف برحسب S (تغییرات G براساس تقدیس توانی سیال).

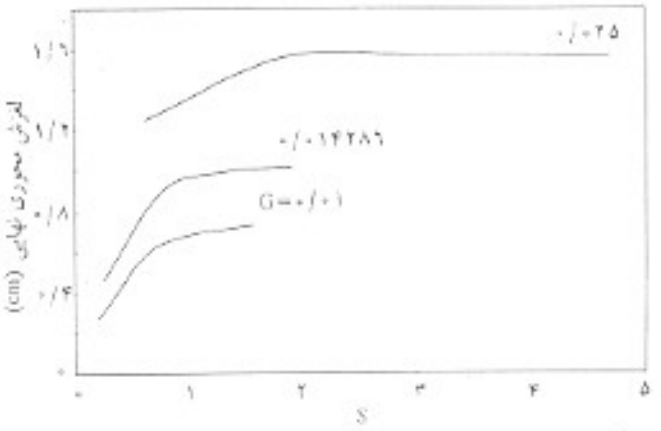
علاوه براین، هرچه S کاهش یابد احتمال منفی شدن لغزش شعاعی نهایی بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر، افزایش گرانروی سبب کاهش پدیده لغزش شعاعی می‌گردد، زیرا با افزایش گرانروی ضریب بازدارنده (drag) افزایش یافته و نیروی بیشتری از طرف سیال بر لیف وارد می‌شود و آن را بیشتر به سمت راستای حرکت فشار می‌دهد.

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 (مینیمم)، 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 موردنظر) اهمیت بسزایی در شناخت ویژگیهای قطعه حاصل از عملیات فرایندی مشابه با ورودیهای مدلسازی نرم‌افزاری دارد. چون عملا آنچه غیرقابل تغییر است، ابعاد و هندسه تجهیزات شکل‌دهی است و در مقابل امکان تغییر پارامترهای مؤثر بر فرایند اغلب میسر است. روی محور لوله، سرعت بیشینه 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 با تغییرات A (نمودار ۱۰) می‌توان دید که G با کاهش A یا نزدیک شدن لیف به محور لوله افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش G، سرعت نیم چرخش کاهش می‌یابد و به عبارت بهتر، زمان کل فرایند یا مسافت لازم برای رسیدن به نتیجه مطلوب افزایش می‌یابد. با نزدیکتر شدن به دیواره لوله، گرادیان سرعت سیال بیشتر می‌شود، یعنی دو انتهای لیف اختلاف سرعت بیشتری را احساس می‌کنند. از



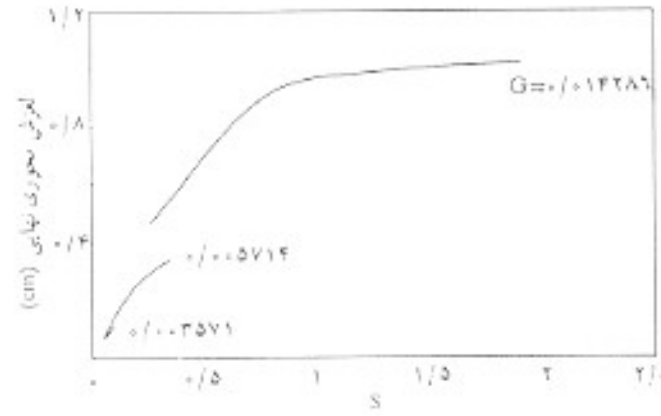
شکل ۱۰- نمودارهای زمان نیم‌چرخش در ذکاهای مختلف برحسب S (تغییرات G برحسب شعاع لوله).



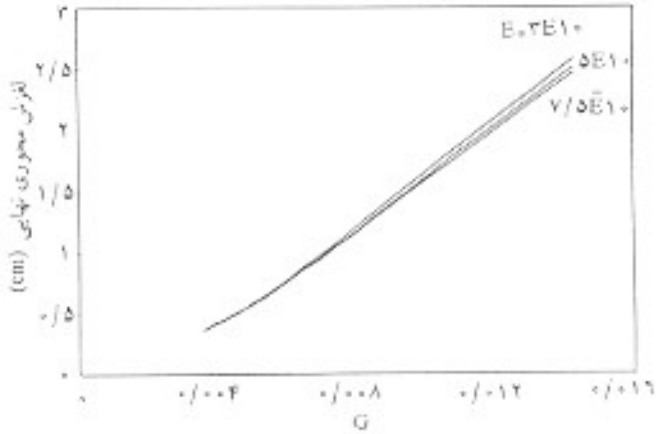
شکل ۱۱- نمودارهای لغزش محوری نهایی در iهای مختلف برحسب S (تغییرات G براساس اندیس توانی سیال).

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.



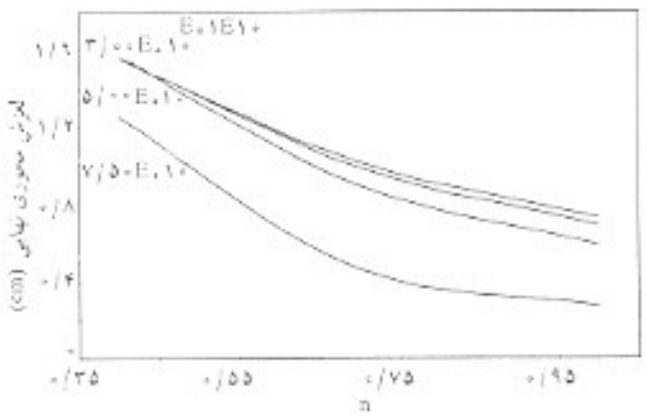
شکل ۱۲- نمودارهای لغزش محوری نهایی در iهای مختلف برحسب S (تغییرات G برحسب شعاع لوله).



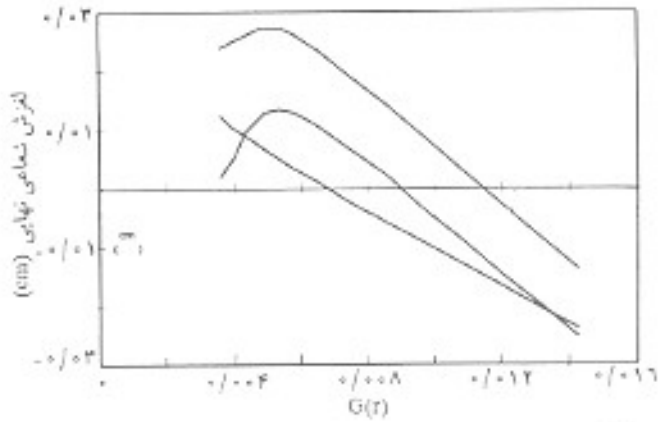
شکل ۱۳- نمودارهای لغزش محوری نهایی در مدول یانگهای مختلف برحسب G (تغییرات G براساس اندیس توانی سیال).

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 تقریبا 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.

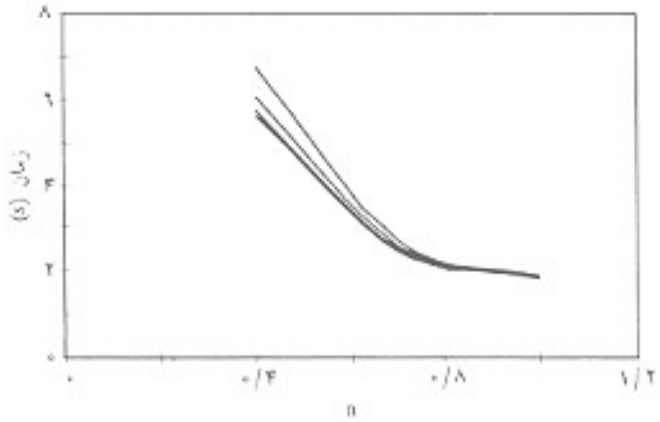
نمودارهای ۱۵ و ۱۶ بیانگر تغییرات لغزش شعاعی نهایی برحسب G در چند مدول یانگ مختلف است. نمودار ۱۵ برای حالتی است که G از تغییرات ۲، تاثیر پذیرفته است و در نمودار ۱۶ تغییرات G متاثر از تغییرات n یا اندیس توانی سیال بوده است. مدول یانگ



شکل ۱۴- نمودارهای لغزش محوری نهایی برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب اندیس توانی سیال.

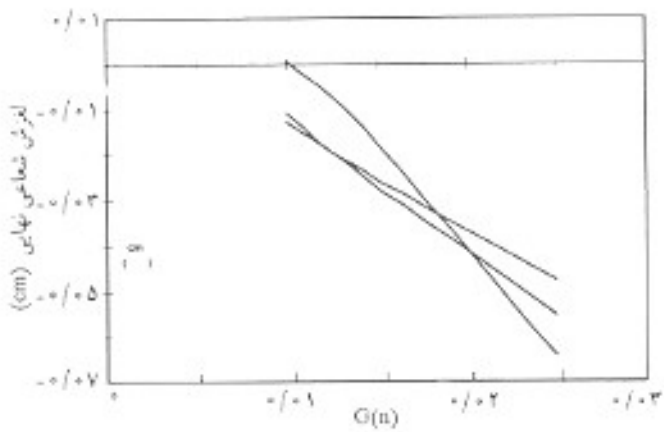


شکل ۱۵ - نمودارهای لغزش شعاعی نهایی برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب G (تغییرات i) برحسب شعاع لوله).

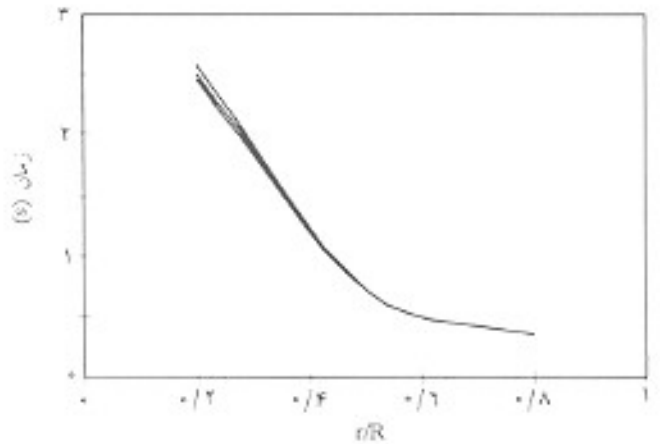


شکل ۱۷ - نمودارهای زمان کل فرایند برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب اندیس توانی سیال.

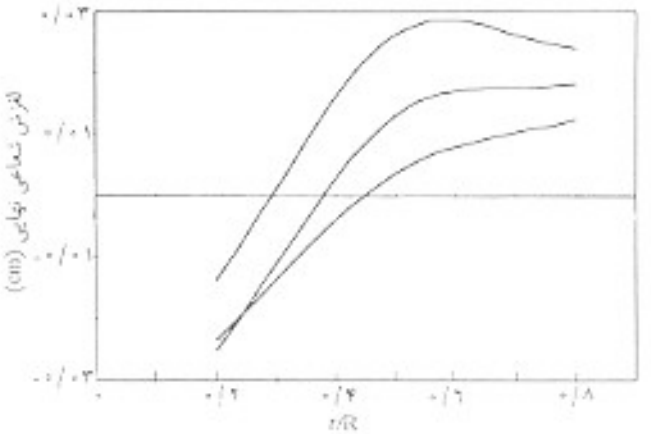
۷/۵E۱۰ رفتاری متفاوت از سایر مدولهای یانگ نشان داده است. توجه این امر بدو صورت امکان‌پذیر است: یکی اینکه در این مدول، به علت عدم خمش لازم برای رسیدن به حالت S بحرانی، رفتار لیف تقریبا خطی بوده است یا اینکه لیف به شرایط حدی شکنندگی یا انفاقاتی نظایر آن رسیده است. در هر دو صورت مکانیسم عملکرد تغییر یافته است و در نتیجه بین این رفتار و مدولهای یانگ دیگر باید مکانیسمهای جدیدی برای مدل درنظر گرفت یا اینکه محدوده پیش‌بینی مدل را به این طریق معین کرد. از نمودار ۱۵ می‌توان دریافت که در iهای اندک (نزدیک دیواره) لغزش شعاعی نهایی با افزایش G زیاد می‌شود. سپس، در یک مقدار معین G به مقدار ماکسیمم می‌رسد و در ادامه کاهش می‌یابد و حتی به مقادیر منفی نیز می‌رسد. در Gهای بزرگ (نزدیک محور لوله) لغزش منفی است. با توجه به نحوه تعریف محورهای مختصات در مدلسازی مزبور (جهت مثبت محور شعاعی به سمت مرکز لوله است) می‌توان 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 حلقه‌ای نواحی بین مرکز و دیواره لوله را پر می‌کنند [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 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 می‌توان نتیجه گرفت که زیاد شدن S سبب افزایش



شکل ۱۶ - نمودارهای لغزش شعاعی نهایی برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب G (تغییرات i) برحسب اندیس توانی سیال).

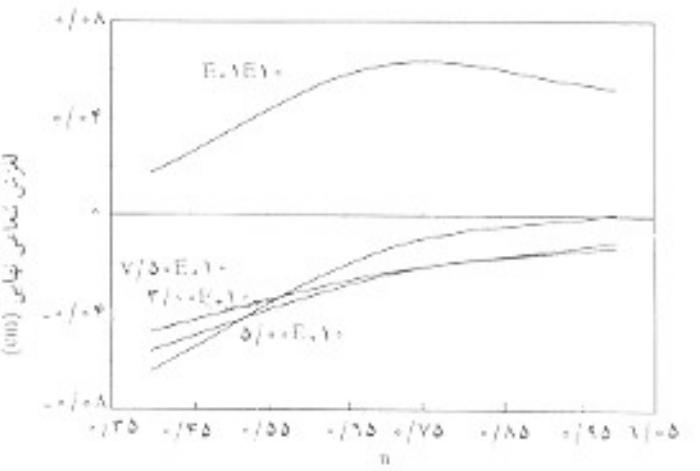


شکل ۱۸ - نمودارهای زمان کل فرایند برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب شعاع بدون بعد.

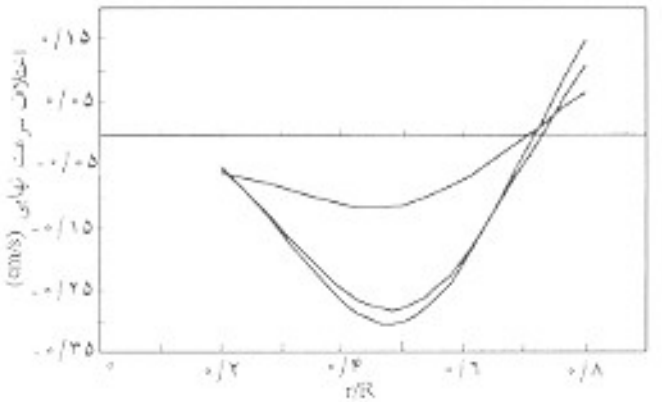


شکل ۱۹ ـ نمودارهای لغزش شعاعی نهایی برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب شعاع بدون بعد.

تعداد خطوط جریان قطع شده به وسیله لیف شده و بنابراین لغزش شعاعی را افزایش خواهد داد. با کاهش S (لیف بسیار خمش‌پذیر) لیف عملا از نظر بعد X_p 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 Gi ها و R_pهای 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 بیشینه 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.



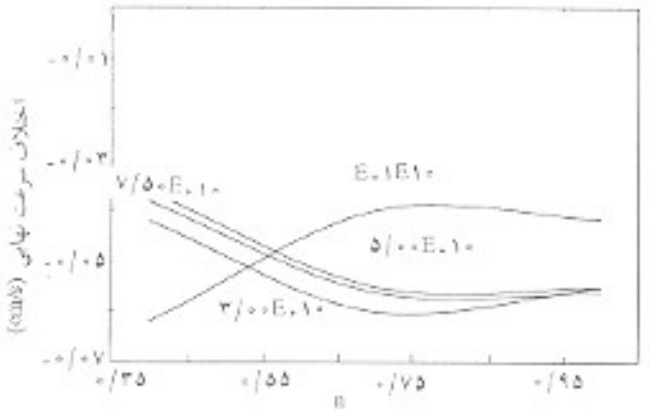
شکل ۲۰ ـ نمودارهای لغزش شعاعی نهایی برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب اندیس توانی سیال.



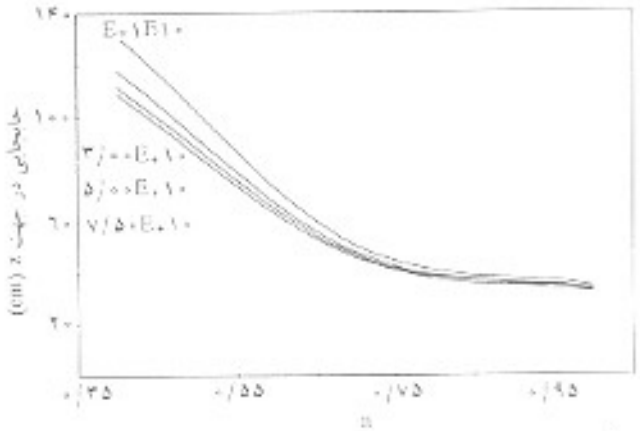
شکل ۲۱ ـ نمودارهای اختلاف سرعت نهایی برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب شعاع بدون بعد.

در نمودار ۱۶ تغییرات Gi برحسب n ارائه شده است. همان گونه که دیده می‌شود، افزایش n (کاهش i) سبب کاهش لغزش شعاعی شده است. می‌توان دید که اینجا هم، مدول یانگ ۷/۵E۱۰ رفتاری متفاوت ازدو مدول یانگ دیگر نشان می‌دهد. این امر مبین وجود تغییرات رفتار بین این مقدار مدول یانگ با مقادیر دیگر است.

نمودارهای ۱۷ و ۱۸ بیانگر تغییرات مدت زمان نیم چرخش برحسب 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 اولا شباهت رفتار هر دو نمودار است، ثانیا در هر دو نمودار می‌توان دید که اختلاف چندانی بین نتایج سه مدول یانگ متفاوت وجود ندارد. طبق نمودار ۱۸ با افزایش r/R ، یعنی با نزدیکتر شدن به دیواره لوله، زمان نیم چرخش سریعا کاهش می‌یابد. این تغییرات تا میزان $r/R = 0/5$ بسیار شدید بوده (شیب



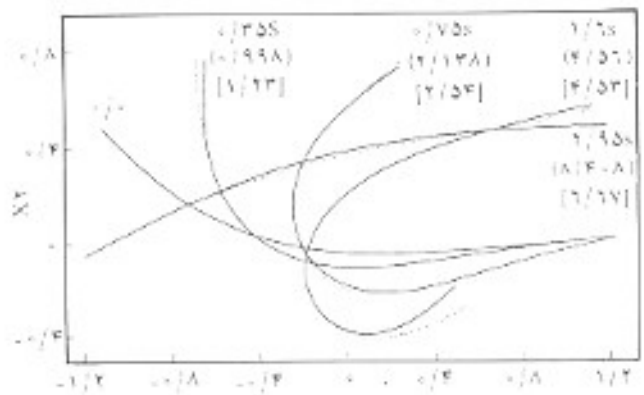
شکل ۲۲ ـ نمودارهای اختلاف سرعت نهایی برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب اندیس توانی سیال.



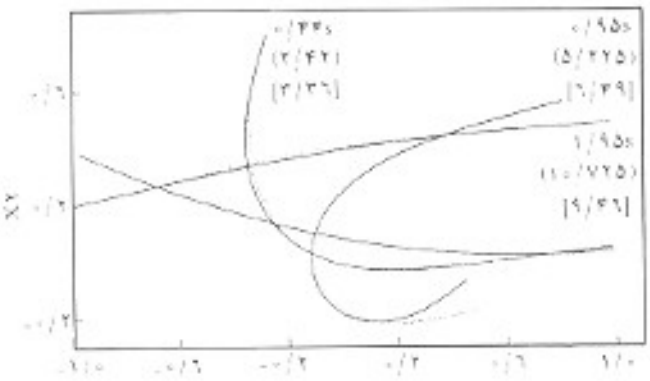
شکل ۲۳ - نمودارهای جابجایی در جهت Z برای الیاف دارای مدول یانگ مختلف برحسب اندیس توانی سیال.

منحنی‌ها زیاد است) و با افزایش بیشتر r/R، تدریج به حالت خطی با شیب اندک میل می‌کند. محل وقوع نقطه شکست منحنی برای هر سه‌مدول یانگ با یکدیگر همخوانی دارد. همین امر را برای n در نمودار ۱۷ می‌توان دید. طبق این نمودار نیز تغییرات تا n=۰/۷ فاحش بوده وسپس با افزایش n، 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 برحسب n نشان می‌دهد بیانگر شباهت کامل رفتار این دسته منحنی‌ها است.

شکلهای ۲۱ و ۲۲ نیز ترسیم دیگری از لغزش شعاعی نهائی است. متغیرهای این دو شکل به جای G، r/R و n است. همان گونه که دیده شد، افزایش r و n هر دو به معنی کاهش G است. بنابراین، در واقع این دو شکل همان رفتار و نتایج دو شکل ۱۷ و ۱۸ را بیان می‌کنند.



شکل ۲۴ - مقایسه نتایج حاصل از مدل فرانکو و مدل بهبود یافته فعلی برای حوزه جریانی خطی (s=۰/۰۱۷) (خطوط نقطه‌چین مبین نتایج مدل فرانکو است).



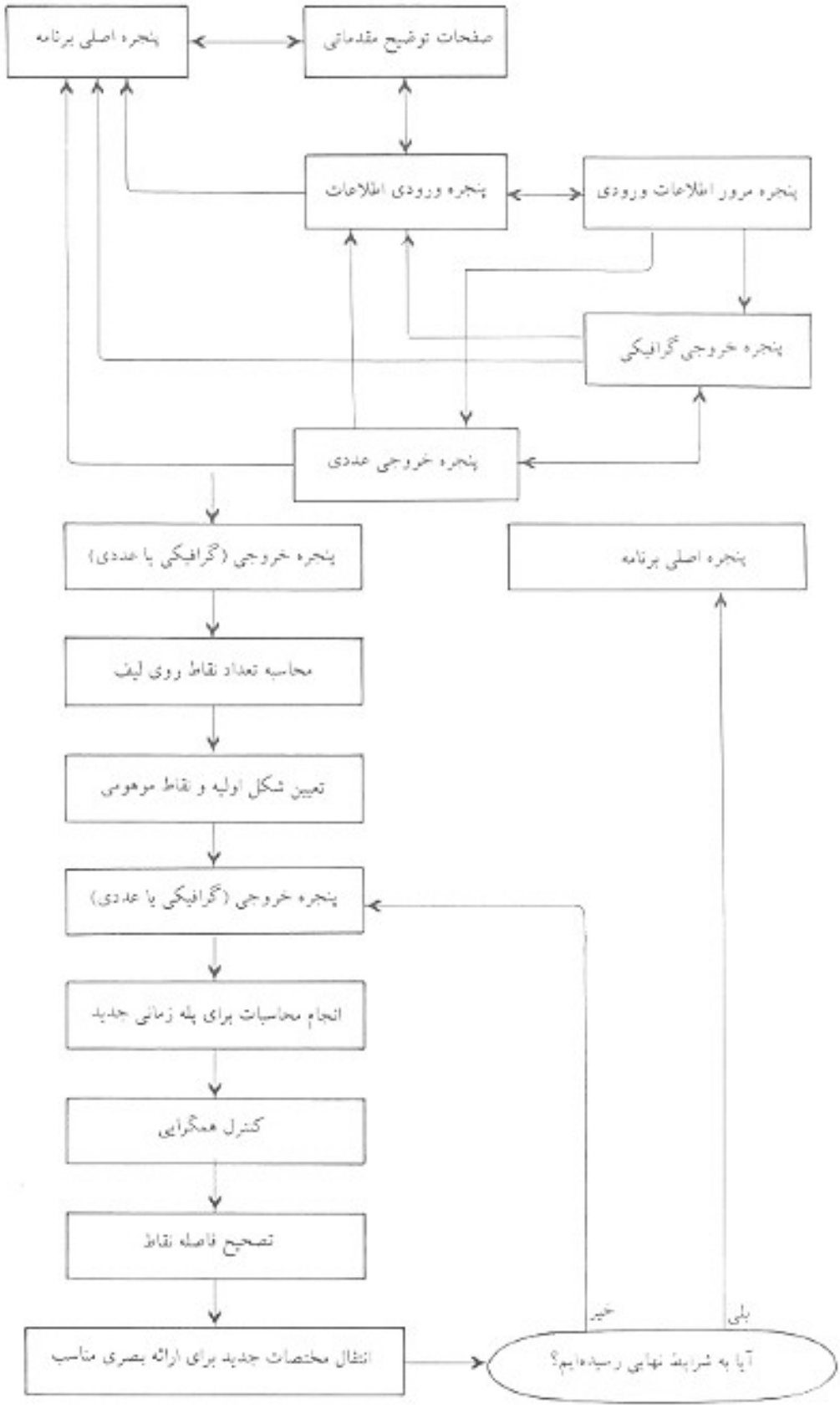
شکل ۲۵ - مقایسه نتایج حاصل از مدل فرانکو و مدل بهبود یافته فعلی برای حوزه جریانی خطی (s=۰/۰۱۹) (خطوط نقطه‌چین مبین نتایج مدل فرانکو است).

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 ۷/۵E۱۰ است که با رفتار همین لیف در شکلهای ۱۵ و ۱۶ همخوانی دارد و به نوعی موید بحث تغییرات احتمالی مکانیسم رفتار لیف بشمار می‌آید.

با کاهش n، لغزش محوری نیز سریعا افزایش می‌یابد. این امر هم از نمودار ۲۳ مشخص است. تاثیر دیگر n را می‌توان روی نیمرخ سرعت سیال دید. کاهش n سبب دور شدن نیمرخ سرعت از حالت سهمی شده و در یک فاصله مشخص از محور، مقدار سرعت با کاهش n 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 n سبب کمتر شدن گرادیان 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 n روی لغزش شعاعی نهایی در نمودار ۲۰ دیده می‌شود. بطور کلی، افزایش n 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 برحسب n (نمودار ۲۲) دیده می‌شود که در این حالت نیز رفتار لیف بسیار خمش‌پذیر با بقیه الیاف کاملا متفاوت است. دلیل این تفاوت مشخص نیست. صرفنظر از این استثنا رفتار سایر الیاف نظیر یکدیگر است.

شکلهای ۲۱ و ۲۲ اختلاف سرعت نهایی الیاف با چند مدول یانگ مختلف را بر حسب r/R و n نشان می‌دهند. طبق نمودار ۲۱، اختلاف سرعت نهایی در ۰/۵ = (r/R) بیشترین مقدار را دارد، یعنی در این منطقه لیف حداکثر عقب‌ماندگی (لغزش) را نسبت به سیال نشان



شکل ۲۶ - روند نمای کلی و بخش محاسباتی نرم‌افزار.

می‌دهد. با افزایش r/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 r/R (بیش از ۰/۵) دوباره کاهش می‌یابد. در حوالی دیواره لوله، حتی ممکن است اختلاف سرعت مثبت نیز شود، یعنی لیف از سیال پیش بیفتد. مقایسه رفتار الیاف در اثر تغییرات n (نمودار ۲۲) با رفتار الیاف مشابه در اثر تغییرات r/R (نمودار ۲۱) شباهت این دو شکل را بیان می‌کند. مثل شکل ۲۲ نیز می‌توان دیدکه با افزایش n، اختلاف سرعت الیاف و سیال تدریج زیاد می‌شود، سپس در n = ۰/۷ به یک مقدار ماکسیمم می‌رسد و با افزایش بیشتر n، شاهد کاهش اختلاف خواهیم بود.

نتیجه‌گیری

الگوسازی ریاضی و رایانه‌ای پیش‌بینی جهتگیری الیاف با خم‌شوندگی محدود از دیدگاه مدل پیتمان و کشتری ارائه شده و حل عددی مدل مزبور در حوزه‌های جریانی مختلف بررسی شده است. بر اساس مدل ریاضی و با گسترش آن به حوزه‌های جریانی مختلف و مدلهای رئولوژیکی 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 نیم چرخش و لغزش لیف درجریان سیال تابع قانون توان در حوزه جریانی لوله با مقطع ثابت بررسی شده و نیز تغییر شکل لیف در حوزه جریانی 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 تایید می‌شود. همچنین، با بررسی حالت لیفهای بسیار خمشو یک میزان خمش بحرانی بدست می‌آید که در آن مقدار لغزش لیف به سمت شعاع لوله بیشینه می‌شود.

مراجع

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

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

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

6. Kompopasek M. and Heard J. W. S.; Computational theory of bending curves. "Part I: "The initial value problem for the three dimensional elastic bending curves"; Fiber. Sci. Thech., 5, 1972.

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

8. Cox R. S.; "The motion of longdon slender bodies in a viscous flow"; Part 1: General Theory; J. Fluid Mech.; 44, 791-810, 1970.

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

10. Vasman A., Narkis M., Siegmann 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., Siegmann 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 پویایک آویزش لیفهای خم‌شو، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، ۱۳۷۵.

۱۳- آرش فیروزی، بهبود مدل پیش‌بینی جهت‌گیری الیاف در حوزه‌های جریانی مذابهای پلیمری، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، ۱۳۷۹.

۱۴- نورالله کشتری پیدهندی، محمدرضا ابراهیمیان، مدلسازی ریاضی و رایانه‌ای دینامیک تعلیق لیفهای انعطاف‌پذیر، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال دوازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۷۸.

۱۵- آرش فیروزی، نورالله کشتری پیدهندی، بهبود مدل ریاضی رایانه‌ای پیش‌بینی جهت‌گیری الیاف در حوزه‌های جریانی مذابهای پلیمری، ششمین کنگره مهندسی شیمی ایران، اردیبهشت ۱۳۸۰.