

## تحلیل تنش‌های ناشی از حرکت الیاف در بستر رزین در پروسه ساخت مخازن تحت فشار کامپوزیتی و پیش‌بینی میزان حرکت الیاف

مصطفی سعیدی<sup>1\*</sup>، مهدی فیلسوف<sup>2</sup>، محمد رامه<sup>3</sup>

\*<sup>1</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران کد پستی 1388659516.

ایران mostafa.saeedi@yahoo.com

<sup>2</sup> دانشجوی کارشناسی مهندسی نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری، تهران، ایران.

<sup>3</sup> دانشجوی کارشناسی ریاضیات کاربردی، دانشگاه پیام نور واحد شهریار، تهران، ایران.

### چکیده

یکی از مهمترین کاربردهای مواد کامپوزیت، استفاده در ساخت مخازن تحت فشار می باشد، که کاربرد های ویژه‌ای در صنعت دارند. روش فیلامنت پیچی علاوه بر ساخت مخازن تحت فشار، در ساخت بدنه بالگرد، واگن‌های قطار و با اندکی تغییر در روش، در ساخت پروفیل های کامپوزیتی و... نیز کاربرد دارند. روش رایج در این تکنیک، پیچش الیاف آغشته به رزین و تحت تنش کششی، حول یک مندرل می باشد. الیاف پس از پیچیده شدن، در اثر عواملی شروع به حرکت در بستر رزین می نمایند که منجر به تنش های جدید بر الیاف می گردد. در این مقاله پس از اشاره به عوامل حرکت الیاف در درون بستر رزین، تلاش شده است رابطه ای برای پیش بینی میزان حرکت الیاف و نیز تنش اعمال شده ناشی از حرکت الیاف در درون بستر به دست آید.

واژه‌های کلیدی: الیاف، فیلامنت پیچی، کامپوزیت، مخازن تحت فشار

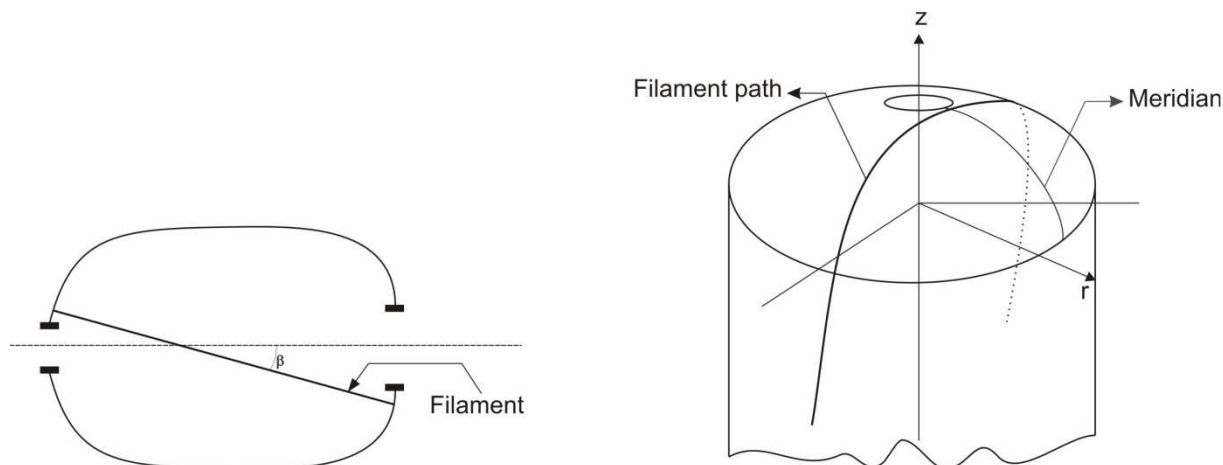
### 1- مقدمه

کامپوزیت ها دسته ای از مواد هستند که از کنار هم قرار گیری دو و یا چند جزء - در بعد ماکروسکوپی - ساخته می شوند. خواص مطلوب این ساختار، استقبال فراوان از آن را در پی داشته است. مقاومت بالا - نسبت به وزن - در برابر عوامل شیمیایی و خوردگی و نیز مقاومت خستگی بالا از مزایای بارز این مواد می باشد [1]. عمده ساختار کامپوزیت ها مشتمل بر دو جزء الیاف به عنوان تقویت کننده و رزین به عنوان بستر می باشد. حالت ایده آل در طراحی مخازن تحت فشار، تحمل بار وارد شده بر مخزن توسط الیاف در حالت کشش و اعمال تثبیت موقعیت الیاف در ساختار و نیز جلوگیری از خسارات مکانیکی و محیطی بر مخزن، توسط رزین است [2]. یکی از قدیمی ترین روش های ساخت کامپوزیت ها - که عمده مخازن کامپوزیتی تحت فشار به این روش ساخته می شوند - روش پیچش الیاف (Filament winding) می باشد. این روش یکی از زیر شاخه های تکنیک قالب باز می باشد که در طی آن، الیاف به صورت فیلامنت (filament) و یا باند (strand)، از درون حوضچه رزین می گذرند و سپس به دور مندرل چرخان - به عنوان قالب - پیچیده می شوند. این عمل تا رسیدن به یک ضخامت مطلوب ادامه می یابد و پس از آن، جسم تولید شده - مخلوطی از الیاف و رزین - از مندرل جدا شده و در طی یک عملیات حرارتی مناسب پخته می شود تا با تکمیل شدن عملیات پلیمریزاسیون و شبکه‌ای شدن کامل ساختار، محصولی یکپارچه و سخت حاصل شود [3]. رشد و توسعه این روش عمدتاً مرهون توسعه اکتشافات فضایی و مطالعات زیر دریایی است و رشد و

توسعه ماشین‌آلات و تکنیک‌های پیچش الیاف مدیون صنعت نساجی است [4].

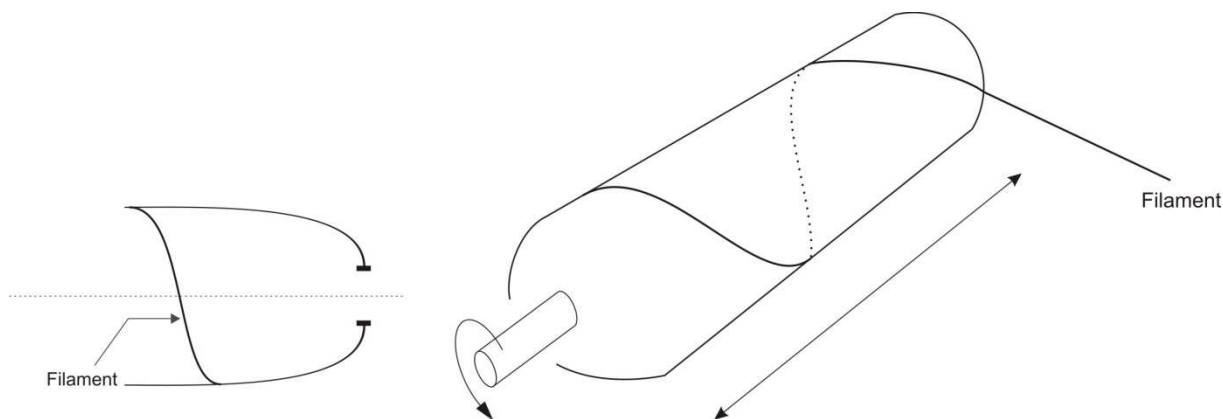
### انواع روش‌های فیلامنت پیچی:

اصولا از دو روش کلی برای پیچش الیاف حول مندرل استفاده می‌شود، پیچش طولی (قطبی) و پیچش عرضی (مارپیچی). در پیچش طولی، مندرل ثابت می‌ماند و بازوی تغذیه الیاف حول محور طولی می‌چرخد (شکل ۱) [3].



شکل ۱. روش فیلامنت پیچی طولی مخازن تحت فشار کامپوزیتی [3]

در پیچش عرضی، مندرل همواره در یک جهت و حول محور اصلی می‌چرخد و الیاف، طول مندرل را به صورت رفت و برگشت طی می‌کند (شکل ۲).

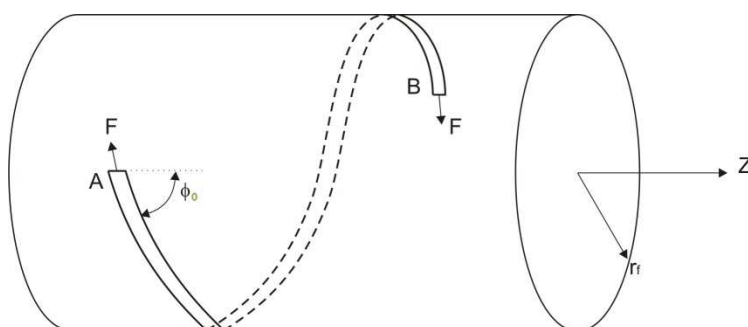


شکل ۲. روش فیلامنت پیچی عرضی مخازن تحت فشار کامپوزیتی [3]

در طی مرحله پیچش الیاف، فیلامنت‌ها همواره تحت تنش کششی می‌باشند و در اثر این کشش، الیاف در بستر رزین حرکت می‌کنند و در اثر این حرکت، تنش‌های وارده به الیاف نیز تغییر می‌کند [5].

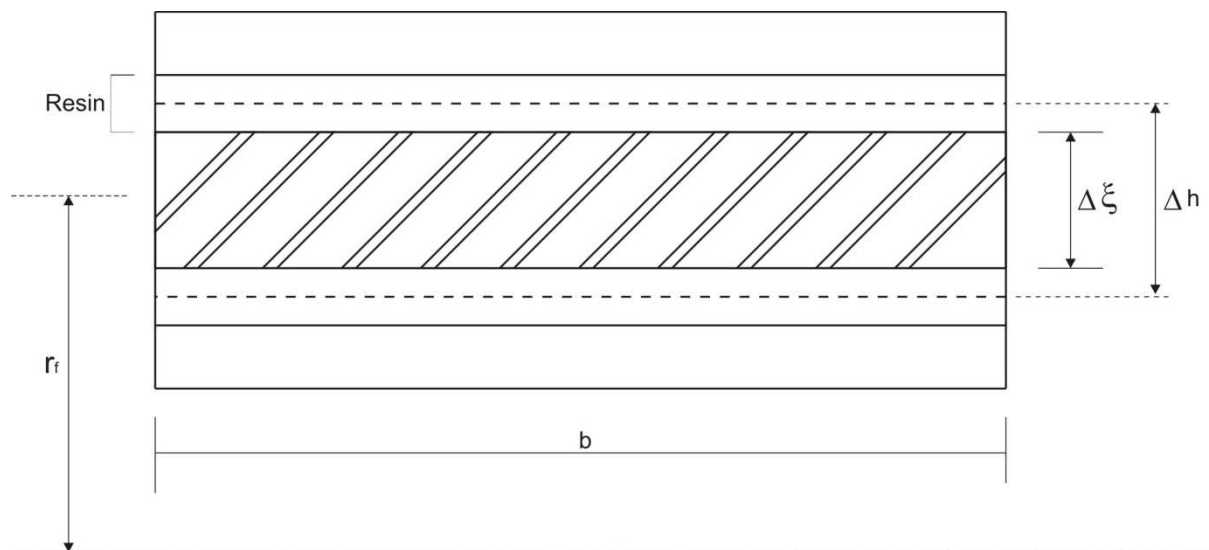
### فشرده‌گی در اثر فیلامنت پیچی:

لی و اسپرینگر، مدلی برای فشرده شدن فیلامنت‌ها در یک کامپوزیت ترموست ارائه داده‌اند. در طی فرآیند فیلامنت پیچی، فیلامنت‌های آغشته به رزین به عرض  $b$  و ضخامت  $\Delta h$  با تنش کششی اولیه  $F_0$  بر حول مندرل قرار داده می‌شوند. زاویه پیچش الیاف و محور مندرل،  $\phi_0$  می‌باشد که در زمان سخت شدن رزین، الیاف حرکت کرده و سبب تغییر در کشش و موقعیت الیاف می‌شود. توجه شود که در هر زمان  $t$ ، کشش الیاف  $F$  می‌باشد. (شکل ۳ و ۴) [6].



شکل ۳. اتصال الیاف در طی عملیات فیلامنت پیچی [6]

$\Delta h$  ضخامت یک لایه، مشتمل بر یک صفحه الیاف به ضخامت  $\Delta \xi$  و یک لایه رزین (مجموعی از دو نیم لایه رزین که طرفین لایه الیاف را احاطه کرده است) می‌باشد. (شکل ۴).



شکل ۴. وضعیت ورقه‌های الیاف در عملیات فیلامنت پیچی [6]

سطح مقطع الیاف معادل (۱) می باشد [7]:

$$A_f = V_f \cdot A \quad (1)$$

که در آن  $V_f$  کسر حجمی الیاف و  $A$  مساحت سطح مقطع تمام الیاف می باشد.  $(A = b \cdot \Delta h)$  و  $r_f$  تغییر مکان الیاف در جهت صفحه‌شان می باشد (شکل ۴).

### دلایل حرکت الیاف در بستر رزین:

الیاف به دو دلیل عمده در بستر رزین حرکت می کنند:

1. در طی سیکل فیلامنت پیچی، به علت ویسکوزیته پایین رزین، تنش کششی، الیاف خم شده را به حرکت در می آورد و هنگامی که ویسکوزیته رزین افزایش می یابد، الیاف در بستر خود مستقر شده و دیگر تحت تنش کششی حرکت نمی کنند. تغییر مکان الیاف نسبت به رزین را با  $u_f$  نشان می دهند.

2. تغییرات شیمیایی رزین وعدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی (CTE) محور و کامپوزیت نیز باعث تغییر مکان صفحه الیاف می شود. این تغییر مکان شعاعی که حاصل انبساط و انقباض کامپوزیت و محور است را با  $u_{mc}$  نشان می دهند و داریم:

$$U_{mc} = u_m + u_c \quad (2)$$

لذا تغییر مکان الیاف نسبت به مختصات استوانه را به صورت (۳) نشان می دهیم:

$$r_f = R_f^\circ + u_f + u_{mc} \quad (3)$$

که در آن  $R_f^\circ$  موقعیت شعاعی صفحه الیاف در زمان  $t_0$  می باشد. مقدار  $u_{mc}$  (ناشی از CTE و تغییر ترکیب شیمیایی) بوسیله تحلیل تنش تعیین می گردد [6]. مقدار  $u_f$  با فرض آنکه تمام لایه ها به طور همزمان در زمان  $t_0$  روی هم انباشته شده اند و همچنین موقعیت شعاعی صفحه الیاف در هر نقطه از لایه مورد نظر یکسان است، محاسبه می شود. در اینجا تحلیل و بررسی برای قطعه استوانه ای A-B صفحه الیاف انجام شده است، لیکن اثرات نهایی تمام شرایط محور و کامپوزیت استوانه ای منظور نشده است (شکل ۳).

تنش در جهت الیاف به صورت (۴) محاسبه می شود [7]:

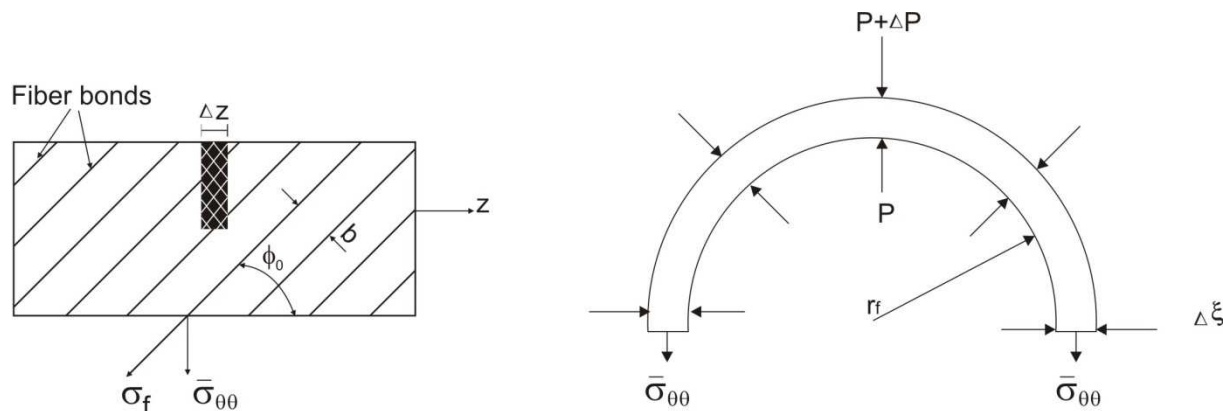
$$\sigma_f = \frac{F}{A_f} \quad (4)$$

که در آن  $A_f$  مساحت سطح مقطع الیاف و  $F$  نیروی کششی اعمال شده در طی عملیات فیلامنت پیچی است. مولفه پیرامونی تنش کششی الیاف به صورت (۵) بدست می آید:

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta} = \sigma_f \sin^2 \phi_0 \quad (5)$$

که در آن  $\phi_0$  زاویه پیچش الیاف نسبت به محور است. از آنجا که الیاف تحت کشش کار گذاشته می شوند، یک اختلاف فشار در سطح مقطع ورقه الیاف در رزین به وجود می آید (شکل ۵). فشار در سطح داخلی ورقه الیاف را با  $P$  و در سطح خارجی با  $P + \Delta P$  نشان داده می شود. با فرض اینکه اتصال الیاف پیوسته بوده و بطور کامل سطح را در امتداد طول کوچک  $\Delta Z$  استوانه پوشش می دهد، می توان معادله تعادل نیروها را برای لایه با طول  $\Delta Z$  بدون در نظر گرفتن اثرات اینرسی به صورت (۶) نوشت [6].

$$2\bar{\sigma}_{\theta\theta}\Delta Z + 2(P + \Delta P)\left[r_f + \frac{\Delta Z}{2}\right]\Delta Z - 2P\left[r_f - \frac{\Delta Z}{2}\right]\Delta Z = 0 \quad (6)$$



شکل ۵. فشار سطوح داخلی و خارجی ورقه الیاف در عملیات فیلامنت پیچی [6]

با توجه به کوچک بودن مقدار  $\Delta \xi$  در برابر شعاع  $r_f$ ، از آن صرف نظر و معادله به صورت (۷) بازنویسی میشود:

$$\frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{dP}{dr} = - \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r_f} \quad (7)$$

سرعت الیاف نسبت به رزین، با فرض آنکه ورقه الیاف مشابه یک صفحه متخلخل است از قانون دارسی (Darcy's law) محاسبه می‌گردد [8].

$$\dot{u}_f = \frac{S dP}{\mu dr} \quad (8)$$

که در آن S قابلیت نفوذ ظاهری ورقه الیاف متخلخل و  $\mu$  ویسکوزیته رزین است. با استفاده از معادلات (۵) و (۷) می‌توان معادله (۸) را به صورت (۹) بازنویسی کرد:

$$\dot{u}_f = - \frac{S \sigma_f}{\mu r_f} \sin^2 \phi_0 \quad (9)$$

که در این معادله، تنش کششی الیاف  $\sigma_f$  و ویسکوزیته  $\mu$  می‌تواند با زمان t و مکان r تغییر کند. لذا باید برای این معادله، با روش‌های عددی، جواب‌هایی به دست آورد. لیکن، برای ساده‌سازی محاسبات، برای تغییر موقعیت الیاف در طی مدت زمان کوچک  $\Delta t$ ، معادله (۹) به صورت (۱۰) نوشته می‌شود:

$$\dot{u}_f = \frac{\Delta u_f}{\Delta t} = \frac{u_f^{t+\Delta t} - u_f^t}{\Delta t} = - \frac{S \sigma_f}{\mu r_f} \sin^2 \phi_0 \quad (10)$$

که می‌توان معادله (۱۰) را به صورت (۱۱) نوشت:

$$\Delta u_f = - \frac{S \Delta t \sigma_f}{\mu r_f} \sin^2 \phi_0 \quad (11)$$

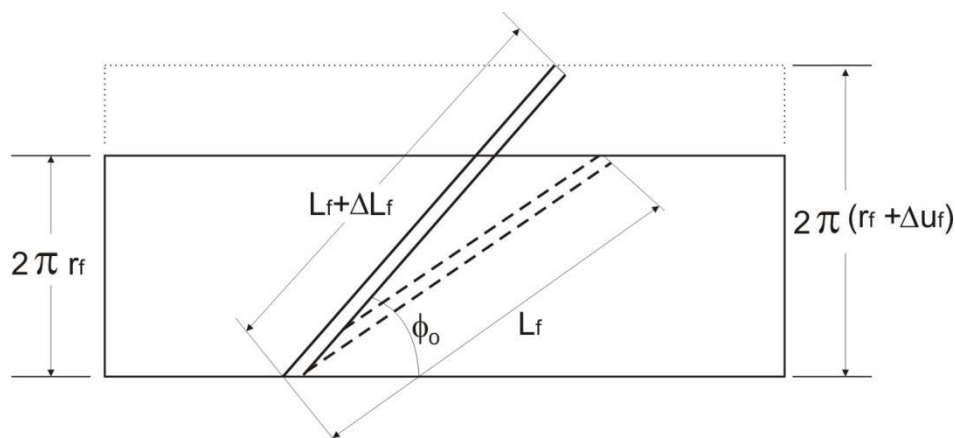
از طرفی و با توجه به شکل (۶) می‌توان نوشت:

$$\Delta L_f = L_f \sqrt{1 + \frac{8\pi^2 r_f^2 \mu_f}{L_f^2}} - L_f \cong \frac{\mu_f L_f}{r_f} \sin^2 \phi_0 \quad (12)$$

که معادله (۱۲) را می‌توان به صورت (۱۳) ساده نمود:

$$\frac{\mu_f}{r_f} \sin^2 \phi_0 = \frac{\Delta L_f}{L_f} = \Delta \epsilon_f \quad (13)$$

که در آن  $\Delta L_f$  تغییر طول (Elongation)،  $L_f$  طول اولیه ورقه الیاف و  $\Delta \epsilon_f$  تغییر کرنش الیاف در زمان  $\Delta t$  به اندازه تغییر طول الیاف از  $L_f$  تا  $L_f + \Delta L_f$  می‌باشد. (شکل ۶).



شکل ۶. طول های اولیه و ثانویه در عملیات فیلامنت پیچی [6].

همانند تغییرات کرنش، تغییرات تنش کششی الیاف به صورت معادله (۱۴) نوشته می شود:

$$\Delta \sigma_f = \sigma_f^{t+\Delta t} - \sigma_f^t = E_f \Delta \epsilon_f \quad (14)$$

که در آن  $E_f$  مدول طولی الیاف می باشد.

با ترکیب معادلات (۱۱)، (۱۳) و (۱۴) عبارت تنش کششی الیاف در زمان  $t + \Delta t$  را می توان بر طبق رابطه (۱۵) محاسبه نمود:

$$\sigma_f^{t+\Delta t} = \sigma_f^t \left[ 1 - \frac{E_f S \Delta t \sin^4 \phi_0}{\mu r_f^2} \right] \quad (15)$$

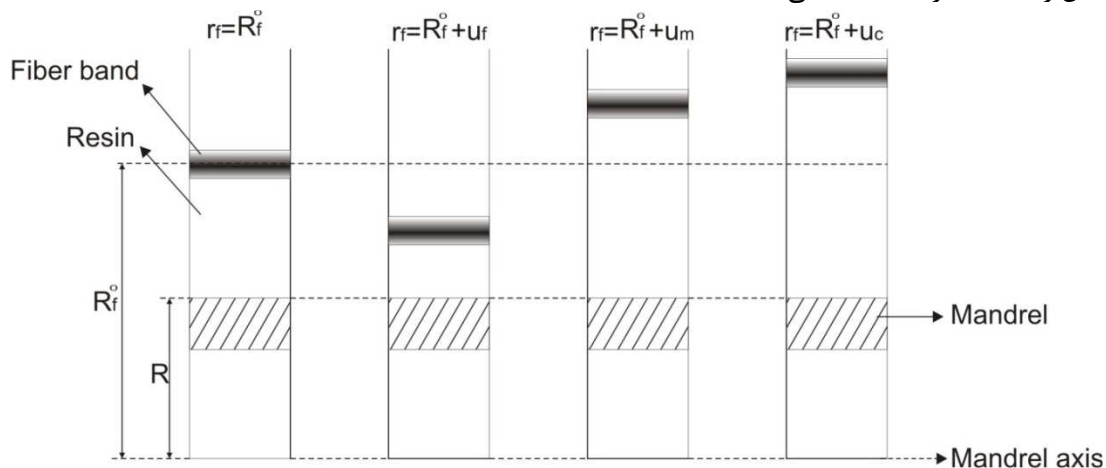
با حل معادلات (۱۱) و (۱۵)، موقعیت الیاف و تنش کششی الیاف را می توان در زمان  $t + \Delta t$  محاسبه نمود. توجه شود که در شرایط اولیه ( $u_f = 0, t = t_0$ ) و تنش الیاف:  $\sigma_f^0$  می توان نوشت:

$$u_f = 0$$

$$t = t_0$$

$$\sigma_f = \sigma_f^0 = \frac{F_0}{A_f}$$

که همان رابطه (۴) در لحظه  $t = t_0$  می باشد.



شکل ۷. تغییر موقعیت الیاف نسبت به محور مندرل [6].

### بحث و نتیجه گیری:

با استفاده از روابط به دست آمده در این مقاله، محاسبه تنش  $\sigma_{f+At}$  در الیاف که فقط به علت حرکت الیاف از درون رزین اعمال می شود، مقدور می باشد. همچنین می توان موقعیت الیاف پس از حرکت را در زمان  $t + \Delta t$  پیش بینی نمود. البته تنش ناشی از انبساط و انقباض محور کامپوزیت در اینجا لحاظ نشده است و می توان با تحلیل تنش آنرا نیز تعیین نمود.

### 9- مراجع

1. Shen, Frank, " A filament-wound structure technology overview", *materials chemistry and physics*, vol.42, pp96-100, (1995)
2. اسکندری، حمید؛ مجموعه مقالات اولین همایش سوخت جایگزین (CNG) و خودروهای گازسوز (طراحی بهینه کپسول گاز فشرده کامپوزیت (CNG CPV)، تهران، مرکز همایش های بین المللی صدا و سیما، 1383.
3. Mantell, S.C. , Springer, J. "Manufacturing Process Models for thermo-plastic composites" *Composite Mater*, pp16-26 ,(1992)
4. صدیقی، مجید؛ سازه های مرکب (مکانیک مواد و طراحی)، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، 1385
5. Haper, charls, A. "Handbook of plastics, Elastomers and composites", *MC Graw-Hill*, New York, pp26 - 118 ,(1996)
6. Lee, S.Y. , Springer, G.S. "Filament winding cylinders, Process models" *Composite mater*, vol 24, pp12-70. ,(1990)
7. Morton, W.E. ◦ Hearl, W.S. "Physical properties of textile fibres" , *Textile institute*, Third edition, UK. ,(1992)
8. Mazumdar, S.K. "Composites manufacturing ,materials ,product & process Engineering" , *Composites Institute*, USA. (2003)