

۸۷/۱/۱۰۱۸۷۵
۸۷/۱/۲۴

الله الرحمن الرحيم

۱۰۸۳۶۳



دانشگاه تبریز

دانشکده فنی مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

عنوان

تحلیل عددی مخازن تحت فشار کامپوزیتی

استاد راهنما

دکتر محمدرضا خوشروان

استاد مشاور

دکتر محمد زهساز

پژوهشگر

علی اکبر مجیدی جیرندهی

پاییز ۱۳۸۷

کتابخانه دانشگاه تبریز
فصلنامه علمی

۱۳۸۷ / ۱۰ / ۳۷

۱۳۸۷ / ۱۰ / ۳۷

۱۰۸۳۶۳

سپاس

بر خود لازم میدانم از زحمات بی شائبه اساتید گرانمایه آقایان دکتر خوشروان و دکتر زهساز، همچنین مهربانی های بی دریغ پدر، مادر، خواهر و برادر عزیزم سپاسگذاری نمایم که همواره با راهنماییها و دلگرمی های خود مرا در انجام این کار مشوق بودند.

به رویانی دست یافتنی،



نام خانوادگی دانشجو: مجیدی جیرندهی	نام: علی اکبر
عنوان پایان نامه: تحلیل عددی مخازن تحت فشار کامپوزیتی	
استاد راهنما: دکتر محمدرضا خوشروان آذر	
استاد مشاور: دکتر محمد زهساز	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی دانشگاه: تبریز دانشکده: فنی و مهندسی مکانیک تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۸۷/۸/۲۰ تعداد صفحه: ۱۲۲	
کلید واژه‌ها: مخازن تحت فشار کامپوزیتی، روش بار واحد، رشته پیچی، روش المان محدود، CFRP	
<p>چکیده:</p> <p>اغلب روش هایی که در تحقیقات گذشته وجود دارد بر اساس آزمایش های تجربی و ساخت مخازن تحت فشار کامپوزیتی می باشد که علاوه بر صرف هزینه و زمان بسیار و در اختیار داشتن امکانات ویژه، اطلاعات مربوطه را نیز به صورت محدودی در اختیار طراح قرار می دهد. بنابراین نیاز به روشی غیرتجربی جهت طراحی اینگونه مخازن که بر پایه ویژگی های هندسی آن باشد، آشکارا احساس می شود.</p> <p>در این تحقیق، طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی بر اساس "روش بار واحد" طبق استاندارد BS۴۹۹۴ و تحلیل کامل سازه و بررسی پارامترهای تکمیلی توسط روش المان محدود در نرم افزار ANSYS صورت گرفته است. "روش بار واحد" بسیاری از نقاط ضعف روش های قدیمی تر را پوشانده و طراحی دقیق تری را با استفاده از فاکتورهای بسیاری که مواد کامپوزیتی در اختیار طراح قرار می دهند، به انجام می رساند. سپس با در دست داشتن مشخصات مخزن طراحی شده، توان تحلیل کامل آن و بهینه کردن پارامترهای مورد نظر و متناسب با شرایط را در نرم افزار ANSYS را خواهیم داشت. جنس مواد بنا به دلایلی E-glass/Epoxy انتخاب شده است. نتایج بدست آمده جهت اطمینان با نتایج تجربی موجود مقایسه شدند. نتیجه بدست آمده رضایت بخش بود. در نتیجه می توان از روش پیشنهادی، با اطمینان قابل قبولی و به دور از صرف هزینه و زمان زیاد و به صورت جامعی برای طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی بهره جست.</p>	

۳

فصل اول: بررسی منابع و پیشینه پژوهش

۴

(۱-۱) مخازن تحت فشار

۵

(۲-۱) رشته پیچی

۵

(۱-۲-۱) مقدمه

۵

(۲-۲-۱) معرفی روش رشته پیچی

۵

(۱-۲-۲-۱) معرفی

۹

(۲-۲-۲-۱) مزایای رشته پیچی

۱۰

(۳-۲-۲-۱) معایب رشته پیچی

۱۰

(۴-۲-۲-۱) کاربرد روش رشته پیچی

۱۰

(۵-۲-۲-۱) دو روش کلی رشته پیچی

۱۲

(۶-۲-۲-۱) قالبها

۱۳

(۳-۱) پیشینه پژوهش

۴۴

فصل دوم: مواد و روش ها

۴۵

(۱-۲) مقدمه

۴۵

(۲-۲) مواد

۴۵

(۱-۲-۲) رزین ها

۴۶

(۲-۲-۲) الیاف

۴۹

(۳-۲) روش بار واحد

۵۱

(۱-۳-۲) ضریب طراحی یا ضریب اطمینان

۵۲

(۲-۳-۲) بار واحد مجاز محدود به بار

۵۳

(۳-۳-۲) حداکثر کرنش مجاز

۵۵

(۴-۳-۲) بار واحد مجاز محدود به کرنش

۵۵

(۵-۳-۲) بار واحد طراحی

۵۷

(۶-۳-۲) طراحی

۵۸

(۷-۳-۲) ضخامت

۵۸

(۸-۳-۲) محاسبه بارهای وارده

۵۹

(۹-۳-۲) کنگی های انتهایی تحت فشار داخلی

۶۲

(۴-۲) روش عددی

۶۲

(۱-۴-۲) SHLL ۹۹ المان

۶۳	SHELL ۹۱ (۲-۴-۲) المان
۶۳	SOLID ۴۶ (۳-۴-۲) المان
۶۴	(۴-۴-۲) روش های تعریف ساختارهای لایه ای
۶۵	(۵-۲) مدلسازی هندسی و شبکه بندی
۶۷	(۶-۲) شرایط مرزی و بارگذاری
۶۸	(۷-۲) روش تجربی
۶۹	(۸-۲) رفتار مواد
۶۹	(۱-۸-۲) منحنی تنش - کرنش اجزای یک ماده مرکب
۷۰	(۲-۸-۲) محاسبه ویژگی های کامپوزیت
۷۳	فصل سوم: نتایج و بحث
۷۴	(۱-۳) روش تجربی
۷۹	(۲-۳) آنالیز و تئوری برای بدست آوردن زاویه بهینه الیاف
۸۲	(۳-۳) طراحی با روش بار واحد
۸۴	(۴-۳) نتایج روش عددی
۸۷	(۱-۴-۳) تنش ها
۹۵	(۲-۴-۳) جا به جایی ها
۹۸	(۵-۳) رسم نمودار کرنش - فشار
۱۰۰	(۶-۳) تأثیر زاویه الیاف
۱۰۳	(۷-۳) نتایج
۱۰۵	پیشنهادات
۱۰۶	منابع

فهرست اشکال و جداول

صفحه

- شکل (۱-۱). اجزای اصلی مخزن کامپوزیتی..... ۴
- شکل (۲-۱). شماتیک فرآیند رشته پیچی..... ۶
- شکل (۳-۱). مخزن در حال رشته پیچی..... ۶
- شکل (۴-۱). شکست الیاف بریده شده با ایجاد سوراخ..... ۷
- شکل (۵-۱). مخزن رشته پیچی شده..... ۸
- شکل (۶-۱). الیاف بافته شده..... ۹
- شکل (۷-۱). ابعاد آستر HDPE..... ۱۳
- شکل (۸-۱). مقایسه بین کرنشهای طولی بدست آمده از آزمایش های فشار و FEM..... ۱۴
- شکل (۹-۱). مقایسه بین کرنشهای محیطی بدست آمده از آزمایش های فشار و FEM..... ۱۴
- شکل (۱۰-۱). مقایسه بین کرنشهای بدست آمده از دو روش تجربی و FEM..... ۱۵
- شکل (۱۱-۱). فلوجارت طراحی برای مخازن تحت فشار با فشار بالا..... ۱۶
- شکل (۱۲-۱). جابه جایی مرکزی پوسته استوانه ای گیردار با تحت فشار یکنواخت داخلی..... ۱۸
- شکل (۱۳-۱). الگوی بهینه ژئودزی..... ۲۱
- شکل (۱۴-۱). مسیر ژئودزی و مسیر غیرژئودزی برای دستیابی به زاویه پیچش 90° ۲۳
- شکل (۱۵-۱). بررسی جابه جایی جانبی گره..... ۲۵
- شکل (۱۶-۱). مقایسه بین تحلیل احتمالی و نتایج تجربی کرنش محیطی..... ۲۷
- شکل (۱۷-۱). کرنش بر اساس فشار P برای سه مخزن داده شده در جدول (۸-۱)..... ۳۱
- شکل (۱۸-۱). مش بندی المان محدود..... ۳۵
- شکل (۱۹-۱). المان های سه بعدی استفاده شده برای مدل المان محدود..... ۳۷

- شکل (۲۰-۱). مقایسه تنش های الیاف بین دو المان **solid** و **layered solid** ۳۷
- شکل (۲۱-۱). فشار انفجار پوسته **Zylon/Epoxy** بر حسب تابعی از نسبت ضخامت به شعاع ۴۰
- شکل (۲۲-۱). منحنی تنش کششی بر حسب کرنش برای نمونه رشته پیچی شده ۴۲
- شکل (۱-۲). لمینیت تحت بار ۴۹
- شکل (۲-۲). ضریب مربوط به دما، K_3 ۵۲
- شکل (۳-۲). فاکتور مربوط به بارهای سیکلی، K_4 ۵۳
- شکل (۴-۲). منحنی های بار-تغییر مکان برای مواد مختلف ۵۴
- شکل (۵-۲). مقادیر محیطی و طولی مدول های واحد، X_3, X_4 ۵۶
- شکل (۶-۲). رابطه میان ضخامت و مقدار شیشه ۵۹
- شکل (۷-۲). انواع کَلگی ۶۱
- شکل (۸-۲). المان **SHELL۹۹** ۶۲
- شکل (۹-۲). المان **SOLID۴۶** ۶۳
- شکل (۱۰-۲). نمایی از مدل ابتدایی ۶۵
- شکل (۱۱-۲). مدل مش بندی شده ۶۶
- شکل (۱۲-۲). شرایط مرزی اعمال شده به مدل ۶۷
- شکل (۱۳-۲). سیستم تست انفجار ۶۸
- شکل (۱۴-۲). منحنی تنش-کرنش اجزای یک ماده مرکب ۷۰
- شکل (۱-۳). مخزن آزمایشی ۷۴
- شکل (۲-۳). نمای جانبی از مدل ساخته شده جهت مقایسه با نتایج تجربی ۷۵
- شکل (۳-۳). نمودار کرنش-فشار نقطه ۱ ۷۷

- شکل (۳-۴). نمودار کرنش_فشار نقطه ۲..... ۷۷
- شکل (۳-۵). نمودارهای کرنش_فشار بدست آمده از نقطه ۱..... ۷۸
- شکل (۳-۶). نمودارهای کرنش_فشار بدست آمده از نقطه ۲..... ۷۸
- شکل (۳-۷). مخزن رشته پیچی شده..... ۷۹
- شکل (۳-۸). نمایی از مدل مش بندی شده..... ۸۵
- شکل (۳-۹). نمای جانبی مدل..... ۸۶
- شکل (۳-۱۰). وضعیت تنش در جهت محور اصلی المان (a) نمای ایزومتریک (b) نمای جانبی..... ۸۷
- شکل (۳-۱۱). تغییرات تنش لایه اول در جهت محور اصلی المان بر حسب فاصله از وسط مخزن.. ۸۸
- شکل (۳-۱۲). وضعیت تنش در جهت مماسی (a) نمای ایزومتریک (b) نمای جانبی..... ۸۹
- شکل (۳-۱۳). تغییرات تنش لایه اول در جهت مماسی بر حسب فاصله از وسط مخزن..... ۹۰
- شکل (۳-۱۴). وضعیت تنش در جهت شعاعی (a) نمای ایزومتریک (b) نمای جانبی..... ۹۱
- شکل (۳-۱۵). میزان تنش در طول ضخامت مخزن (a) در نقطه ۱، (b) در نقطه ۲ و (c) در نقطه ۳..... ۹۳
- شکل (۳-۱۶). تنش فون مایز (a) نمای ایزومتریک (b) نمای جانبی..... ۹۴
- شکل (۳-۱۷). وضعیت جا به جایی در راستای محور اصلی المان (a) نمای ایزومتریک (b) نمای جانبی..... ۹۵
- شکل (۳-۱۸). وضعیت جا به جایی در راستای مماسی (a) نمای ایزومتریک (b) نمای جانبی..... ۹۶
- شکل (۳-۱۹). وضعیت جا به جایی در جهت شعاعی (a) نمای ایزومتریک (b) نمای جانبی..... ۹۷
- شکل (۳-۲۰). نمودار کرنش_فشار نقطه ۱..... ۹۸
- شکل (۳-۲۱). نمودار کرنش_فشار نقطه ۲..... ۹۸
- شکل (۳-۲۲). نمودار کرنش_فشار نقطه ۳..... ۹۹

جدول (۲-۳). مشخصات مخزن مدل شده..... ۸۴

جدول (۳-۳). نمونه ای از نتایج حاصل جهت نشان دادن حساسیت المان به مش بندی ۸۵

جدول (۴-۳). تغییر مکان نقطه ۱ (در جهت شعاعی) و نقطه ۳ (در جهت طولی)..... ۱۰۰

- شکل (۳-۲۳). جا به جایی نقطه ۳ (در جهت طولی) بر حسب تغییر زاویه..... ۱۰۱
- شکل (۳-۲۴). جا به جایی نقطه ۱ (در جهت شعاعی) بر حسب تغییر زاویه..... ۱۰۲
- جدول (۱-۱). موارد استفاده از روش رشته پیچی و علل استفاده از این روش..... ۱۱
- جدول (۱-۲). نتایج تجربی و تئوری فشار شکست اولین لایه لمینیت مخزن تحت فشار..... ۱۹
- جدول (۱-۳). مشخصات مخزن CNG..... ۲۰
- جدول (۱-۴). نحوه چیدمان لایه ها..... ۲۰
- جدول (۱-۵). نتایج آزمایشهای تخریب..... ۲۱
- جدول (۱-۶). افزایش قابلیت حمل بار حداکثر..... ۲۵
- جدول (۱-۷). خواص کلمپوزیتهای تک جهتی با زمینه اپوکسی..... ۳۰
- جدول (۱-۸). مشخصات مخزن..... ۳۱
- جدول (۱-۹). فشار تخریب مخزن تحت فشار..... ۳۸
- جدول (۲-۱). خواص الیاف و مقایسه آنها با مواد فلزی..... ۴۸
- جدول (۲-۲). خواص برخی از مواد ترموست استفاده شده در زمینه مواد کامپوزیتی..... ۴۸
- جدول (۲-۳). خواص لایه های لمینیت تقویت شده..... ۵۰
- جدول (۲-۴). ضرایب مربوط به روش ساخت، K_1 ۵۱
- جدول (۲-۵). ضرایب بکار رفته در بار واحد طراحی برای زوایای مختلف..... ۵۷
- جدول (۲-۶). ضریب شکل برای انواع کلگی..... ۶۰
- جدول (۲-۷). ویژگی های مکانیکی E-glass و اپوکسی..... ۷۱
- جدول (۲-۸). ویژگی های مکانیکی E-glass/EPOXY..... ۷۲
- جدول (۳-۱). مقادیر درصد کرنش (در جهت اصلی المان) بر حسب فشار در نقاط ۱ و ۲..... ۷۶

فهرست علائم و نمادها

U - مقاومت نهایی واحد

K - ضریب طراحی

u_L - بار واحد مجاز محدود به بار

ϵ_R - کرنش شکست رزین خالص

u_s - بار واحد مجاز محدود به کرنش

u_z - بار واحد طراحی

X_z - مدول واحد

ϵ_d - کرنش مجاز

X_x, X_ϕ - مقادیر محیطی و طولی مدول های واحد

m_z - وزن الیاف در واحد سطح در یک لایه از نوع Z

t - ضخامت مخزن

n_z - تعداد لایه ها از نوع Z

Q - بار واحد ماکزیمم وارده

D - قطر مخزن

P - فشار داخلی

Q_ϕ - بار واحد محیطی

Q_x - بار واحد طولی

K_s - ضریب شکل

E_L - مدول الاستیته طولی کامپوزیت

E_T - مدول الاستیته عرضی کامپوزیت

V_f - درصد حجمی الیاف

V_m - درصد حجمی ماتریس

E_{fL} - مدول الاستیته طولی الیاف

E_{fT} - مدول الاستیته عرضی الیاف

E_m - مدول الاستیته ماتریس

G - مدول الاستیسیته برشی کامپوزیت

G_f - مدول الاستیسیته برشی الیاف

G_m - مدول الاستیسیته برشی ماتریس

ν_L - ضریب پواسون طولی کامپوزیت

ν_T - ضریب پواسون عرضی کامپوزیت

ν_{fL} - ضریب پواسون طولی الیاف

ν_m - ضریب پواسون ماتریس

مقدمه:

خواص مناسب، که بطور عمده در نسبت های بالای مقاومت^۱ به وزن، سفتی^۲ به وزن و نیز خواص ویژه و ممتاز محیطی همچون مقاومت در برابر خوردگی، سایش، خستگی و دماهای بسیار بالا خلاصه می شوند، مواد مرکب^۳ را به عنوان جایگزینی مناسب در بسیاری از مصارف روزمره مطرح کرده اند. اگر در آغاز، بهبود کیفیت کار موشکهای نظامی و کاربردهای هوا فضایی حوزه بهره گیری از این مواد بود، امروزه همه عرصه های صنعت و زندگی را در بر گرفته است. یکی از کاربردهای این مواد، مخازن تحت فشار است و از جمله موارد استفاده آنها می توان به کاربرد آنها در موشکها، هواپیماها، مخازن حمل مواد شیمیایی و سوخت اشاره کرد.

رشته پیچی روشی برای ساختن کامپوزیت با تقویت جهت دار است. در این روش حجم معین الیاف ممتد، با راستای مشخص در زمینه معلوم قرار می گیرد و با روشهای حرارتی خاصی پخته می شود. الیاف به روشهای مختلفی به رزین آغشته و روی یک قالب محوری با ساختمان هندسی مورد نظر پیچیده می شوند. این پیچش ادامه می یابد تا سطح قالب توسط الیاف پوشانده شود و ضخامت کامپوزیت روی قالب به مقدار مطلوب برسد تا اینکه نیروها خنثی شوند. جهت استحکام به زاویه پیچش الیاف بستگی دارد. مهارت و هنر اصلی در این روش دستیابی به سازه هایی است که با حداکثر مواد تقویت کننده و حداقل مواد ماتریس، بهترین نسبت استحکام به وزن را داشته باشند.

از آنجا که روش های تجربی، علاوه بر صرف هزینه و زمان بسیار و در اختیار داشتن امکانات ویژه، اطلاعات مربوطه را نیز به صورت محدودی در اختیار طراح قرار می دهند، نیاز به روشی غیر تجربی جهت طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی آشکارا احساس می شود.

در طراحی مخازن تحت فشار کامپوزیتی از روشی جدید به نام روش بار واحد بهره گرفته شده است. روش قدیمی طراحی بر اساس تنش مجاز بود که به سادگی با داشتن مقاومت نهایی کششی و تقسیم آن بر ضریب اطمینان، تنش مجاز طراحی بدست می آمد. این روش با موفقیت در مخازن

¹ Strength

² Stiffness

³ Composite materials

فلزی به کار گرفته شد و تلاش می شد که برای مخازن¹ GRP نیز بکار رود، پاسخ لازم گرفته شد، ولی در نظر گرفتن پارامترها و بهره گیری از تنوع ممکن در این سازه ها از طریق عملی ممکن نمی شد. به علاوه کلیه کدهایی که بر اساس تنش مجاز طراحی بنا شده اند، بر مبنای دو فرض اساسی استوارند که ماده تقریباً ایزوتروپ است و خواص در طول ضخامت ماده یکنواخت است. هیچ یک از این دو شرط در مواد GRP کاملاً صدق نمی کند. به این علت از روش جدیدی به نام روش بار واحد برای طراحی این مخازن استفاده شده است.

با در دست داشتن مشخصات مخزن طراحی شده توسط روش بار واحد، توان مدلسازی و تحلیل کامل آن را در نرم افزار ANSYS را خواهیم داشت. نتایج بدست آمده نیز جهت اطمینان با نتایج تجربی موجود مقایسه شدند.

¹ Glass Reinforced Plastic

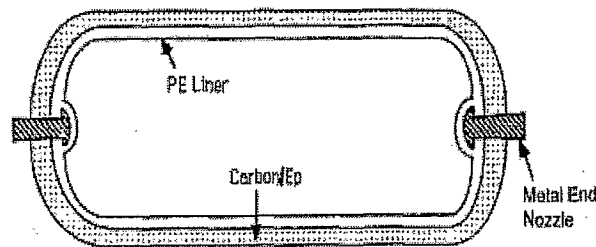


بررسی منابع و پیشینه پژوهش

۱-۱) مخازن تحت فشار:

یکی از کاربردهای مواد مرکب، مخازن تحت فشار می باشد. از جمله استفاده این مخازن می توان از کاربرد آنها در موشکها، هواپیماها، مخازن حمل مواد شیمیایی و سوخت نام برد. مخازن متداولی که در صنعت مورد استفاده قرار می گیرند، اغلب استوانه ای و کروی می باشند. مخازن استوانه ای نیز در دو نوع افقی و عمودی ساخته می شوند. یک مخزن بسته به محل کاربرد آن ممکن است بصورت تک نیرویی و یا ترکیبی از فشار محوری، شعاعی، فشار گسترده روی سطح داخلی یا خارجی و غیره قرار گیرد [۳]. در این پایان نامه به بررسی مخازن تحت فشار داخلی که یکی از رایج ترین شرایط بارگذاری در صنعت می باشد، می پردازیم.

معمولا مخزن مرکب از یک پوسته کامپوزیتی و یک قالب^۱ که نقش لایه آب بندی را نیز ایفا می کند تشکیل شده است. رزین^۲ و الیاف^۳ اجزای تشکیل دهنده پوسته کامپوزیتی هستند. به عنوان مثال می توان از رزینهای اپوکسی^۴ و پلی استر، الیاف شیشه، کربن و کولار^۵ نام برد. بسته به اهداف استفاده از مخزن، لایه آب بندی می تواند از جنسهای مختلفی چون پلاستیک باشد (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱). اجزای اصلی مخزن کامپوزیتی [۴]

در طراحی مخازن کامپوزیتی اغلب پوسته کامپوزیتی را در نظر گرفته و از تاثیر لایه آب بندی صرف نظر می شود.

¹ Mandrel
² Resin
³ Fibers
⁴ Epoxy
⁵ Kevlar

۲-۱) رشته پیچی^۱

۱-۲-۱) مقدمه

پیچیدن مفتولها و الیاف فلزی به دور بشکه ها و لوله های چوبی برای افزایش استحکام آنها و تحمل فشارهای داخلی یا اتصال نیم استوانه های توخالی با این روش شاید اولین نشانه های استفاده از روش رشته پیچی باشد. با این حال استفاده از الیاف تقویت کننده به عنوان عنصر اصلی تشکیل دهنده یک سازه، به گونه ای که در اینجا بحث می شود به دومین دهه قرن بیستم و توسعه آن بعد از جنگ جهانی اول باز می گردد. از این روش علاوه بر ساخت اشکال استوانه ای و سطوح بسته (مخازن وغیره) در تولید سطوح غیر بسته و همچنین فنرها استفاده می شود.

۲-۲-۱) معرفی روش رشته پیچی

۱-۲-۲-۱) معرفی

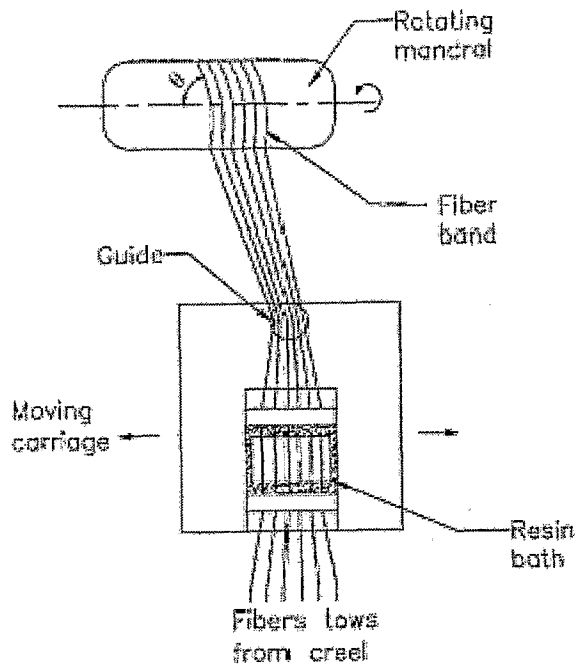
رشته پیچی روشی برای ساختن کامپوزیت با تقویت جهت دار است. در این روش حجم معین الیاف ممتد، با راستای مشخص در زمینه معلوم قرار می گیرد و با روشهای حرارتی خاصی پخته می شود. الیاف به روشهای مختلفی به رزین آغشته و روی یک قالب محوری با ساختمان هندسی مورد نظر پیچیده می شوند. این پیچش ادامه می یابد تا سطح قالب توسط الیاف پوشانده شود و ضخامت کامپوزیت روی قالب به مقدار مطلوب برسد تا اینکه نیروها خنثی شوند. جهت استحکام به زاویه پیچش الیاف بستگی دارد. مهارت و هنر اصلی در این روش دستیابی به سازه هایی است که با حداکثر مواد تقویت کننده^۲ و حداقل مواد ماتریس، بهترین نسبت استحکام به وزن را داشته باشند.

شکل (۲-۱) این فرآیند را که در طی آن الیاف (تقویت کننده) ممتد به دور یک قالب پیچیده

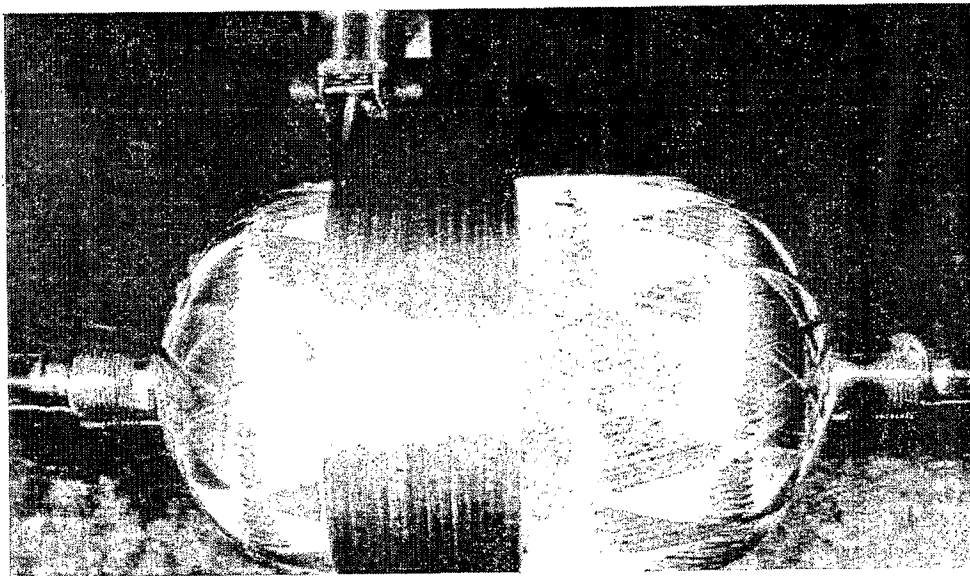
می شوند، به طور شماتیک و شکل (۳-۱) مخزنی را در حال رشته پیچی نشان می دهند [۱].

^۱ Filament winding

^۲ Reinforcement



شکل (۲-۱). شماتیک فرآیند رشته پیچی [۳۱]



شکل (۳-۱). مخزن در حال رشته پیچی

علت ساخت این سازه ها استحکام ویژه^۱ آنها در اطراف دهانه ها و سوراخها می باشد و کلید این مسئله در چگونگی قرار دادن سوراخها و دهانه ها در سازه های رشته پیچی شده بدون کاهش استحکام و سفتی است. هنگامی که الیاف با ایجاد یک سوراخ بریده شوند (شکل ۴-۱)، بار کششی

^۱ Special strengthening