

الگوریتم محاسباتی طراحی برای ساخت سازه‌های مقاوم تقویت شده با سیم‌پیچی

عامر ازوجی* محمد صدیقی**

چکیده: روش سیم‌پیچی برای تقویت مخازن و کنترل نیروی محوری در مخازن به وسیله سازه قاب از موضوعات مهم قابل بررسی می‌باشد. در این مقاله ابتدا با ذکر اهمیت روش سیم‌پیچی، تاریخچه‌ای از آن ارائه شده است. موضوع مورد بررسی یک قاب برای کنترل محوری می‌باشد که با روش آنالیز تنش فریم با دو ستون مورد بررسی قرار گرفته است و سپس به منطق الگوریتم طراحی محاسباتی برای ساخت سازه تقویت شده با سیم‌پیچی و روابط حاکم بر تنش در سازه قاب شکل پرداخته شده و در انتها یک نمونه واقعی سازه قاب که برای کنترل نیروی محوری مخزن می‌باشد مورد مطالعه، طراحی و ساخت قرار گرفته و به آنالیز تنش در این نمونه پرداخته و ابعاد واقعی آن تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی: سیم‌پیچی، تنش، طراحی برای ساخت

روش سیم‌پیچی اولین بار در قرن نوزدهم توسط شخصی به نام لانگریج برای تقویت لوله‌های تفنگ به کار گرفته شد و بررسی و آنالیز سازه‌های سیم‌پیچی شده عمدتاً بر مبنای فرض مخزن مرکب برای خود مخزن و هم‌چنین با فرض هر لایه سیم به عنوان یک مخزن جدا نازک مورد تحلیل قرار گیرد. روش تالاکو، یانگ و هارک گاراز آن جمله‌اند.

فریم سازه‌های سیم‌پیچی شده را با فرض مخزن مرکب و روابط لایه تحلیل کرد [۲]. به طور کلی روش‌های مختلفی برای سیم‌پیچی ارائه شد که هر کدام دارای تحلیل‌های جداگانه می‌باشند. یانگ سیم‌پیچی را براساس کشش پیچیدن سیم در تمامی لایه‌ها انجام داد [۳]. ماکسیمف^۱ بیان کرد که پیچیدن سیم به گونه‌ای انجام شود که میزان تنش برشی یکسانی در تمام لایه‌ها بوجود آید. هم‌چنین در تمامی محاسبات از اصطکاک بین لایه‌ها در جهت ایمنی صرف نظر کرد [۴].

۲. بررسی روابط تئوری در فریم سیم‌پیچی شده:

در ادامه به بررسی روابط سیم‌پیچی در سازه فریم با روش آنالیز تنش در سازه سیم‌پیچی شده فریم با دو ستون می‌پردازیم.

۲-۱. آنالیز تنش در سازه سیم‌پیچی شده فریم پرس با دو ستون:

به منظور کنترل نیروی محوری از پرپوش‌های متحرک در یک مخزن تحت فشار با انتهای باز از یک فریم با دو ستون که در شکل ۱ نشان

۱. مقدمه

روش سیم‌پیچی برای تقویت و کنترل نیروهای وارد بر یک سازه زمانی که تحت فشار کاری قرار می‌گیرد، از روش‌های کاربردی می‌باشد. اصول تکنیک تقویت کردن این سازه‌ها، تنش گذاری اولیه برای تولید تنش فشاری باقیمانده در دیواره سازه برای مقابله با تنش‌های کششی ناشی از فشار داخلی تحت شرایط کاری می‌باشد و فایده آن در مخزن کاهش تنش موجود در شرایطی است که مخزن تحت فشار کاری قرار می‌گیرد [۱].

سازه‌های تقویت شده با سیم‌پیچی مزایای بسیار زیادی دارند و می‌توان به میزان قابلیت و ایمنی سازه اشاره کرد که به اندازه آن بستگی ندارد و تنش در تمامی نقاط قابل محاسبه است، هم‌چنین نسبت بالای مقاومت به وزن که به علت کوچکی اندازه سیم یا نوار مسطح بالاترین مقاومت مجاز در آنها وجود دارد و نیز نقاط تمرکز تنش و در نتیجه نقاط ایجاد ترک‌های ناشی از خستگی حذف می‌شوند [۱].

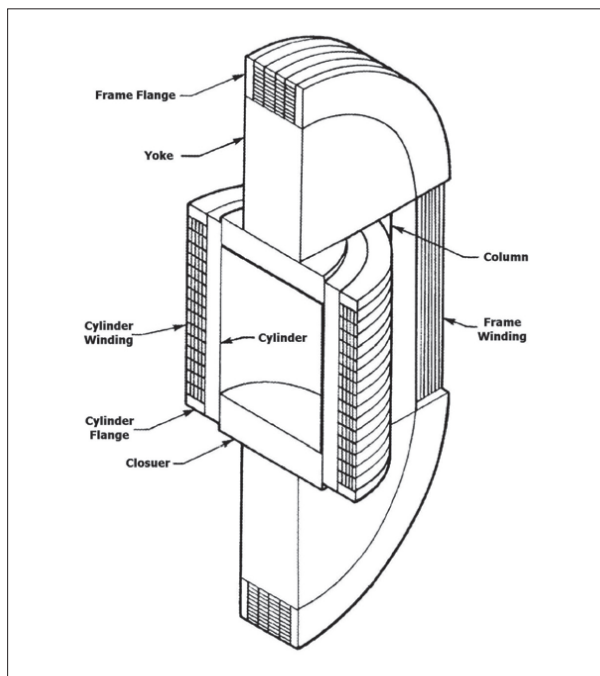
* عامر ازوجی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، کارشناس شرکت مگاموتور.

آدرس پست الکترونیک: amer_e626@yahoo.com

** محمد صدیقی، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران. آدرس پست الکترونیک: sedighi@iust.ac.ir

سازه قاب شکل مخزنی که با فشار کاری P، شعاع خارجی R₂ و طول مخزن LC می‌پردازیم.

سازه قاب همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود به عنوان سازه کنترل کننده نیروی محوری ناشی از فشار داخلی مخزن متشکل از دو ستون، دو یوک بالا و پایین و سیم‌پیچ می‌باشد [۶].



شکل ۲. یک مخزن تقویت شده به همراه سازه قاب سیم‌پیچی شده [۶]

۳-۱. محاسبات طراحی قاب:

میزان پیش تنش مورد نیاز در قاب با توجه به استاندارد ASME [۶] باید به اندازه‌ای باشد که یوکها در ۰.۱۰۵٪ فشار تست هیدرواستاتیکی در تماس مکانیکی با یکدیگر باشند. با توجه به فشار کاری P در مخزن، میزان پیش تنش مورد نیاز در قاب حداقل ۱.۲۵ برابر فشار کاری ضربدر کمترین نسبت استحکام تسلیم ماده مورد استفاده در مخزن در دمای تست به استحکام تسلیم ماده در دمای مورد نظر طراحی می‌باشد.

فرض نخست در به دست آوردن روابط در قاب، ثابت ماندن شعاع یوک در زمان بارگذاری و سیم‌پیچی می‌باشد (فرض جسم صلب) و با توجه به متغییر بودن طول لایه‌های سیم، با استفاده از فرض فریر میزان تغییر شکل در لایه‌های سیم پیچ یکسان فرض می‌شود. این محاسبات با توجه به تئوری تنش برشی که توسط ماکسیموف ارائه شد، انجام می‌شود و حداکثر تنش برشی که در لایه‌های سیم در هنگام اعمال فشار به وجود می‌آید می‌باشد.

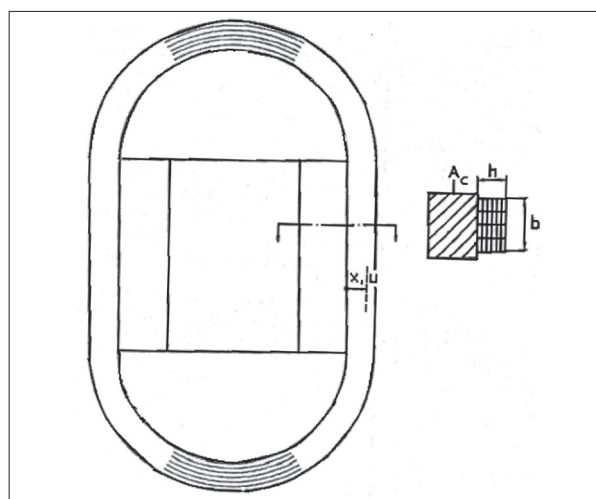
در این طراحی هدف به دست آوردن تنش پیچیدن لایه‌ها برای نمونه مورد بررسی می‌باشد و مسیری که در این طراحی طی می‌شود تا به تنش پیچیدن برسیم طبق الگوریتم شکل ۳ می‌باشد.

داده شده است استفاده می‌شود که شامل دو یوک yoke نیم دایره‌ای جدا شده به وسیله دو ستون می‌باشد. یوکها و ستون‌ها دارای یک ساختار نگه دارنده با یک پوشش سیمی پیش تنش دار می‌باشد [۵]. سازه ستون تحت تاثیر تنش محوری ستون‌ها و بخش‌های مستقیم سیم‌پیچی شده است و بنابراین:

$$k_c(x, u) = -E_c b / (E_c A_c + E_w b u) \quad (1)$$

$$k_w(x, u) = -E_w b / (E_w A_c + E_c b u) \quad (2)$$

EC، EW به ترتیب مدول الاستیسیته سیم و ستون، AC، سطح مقطع ستون و b عرض سیم‌پیچی شده در شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۱. سازه سیم‌پیچیده فریم [۵]

با مشتق گرفتن از فرمول ۱ نسبت به x و با جا گذاری S(h) = σ(w) داریم:

$$S(x) = \sigma_w' \left(\frac{E_c A_c + E_w b h}{E_c A_c + E_w b x} \right) \quad (3)$$

پیش تنش ستون‌ها با جاگذاری معادله ۲ و ۳ در معادله پیچیده شده است: $f(x) = \int_0^h k(x, u) s(u) d(u)$ به دست می‌آید که یک نتیجه از تعادل فریم

$$\sigma_c' = -\sigma_w' \frac{bh}{A_c}$$

۳. ارائه الگوریتم محاسباتی و روابط حاکم بر تنش در سازه قاب شکل

در این قسمت به ارائه الگوریتم محاسباتی و روابط حاکم بر تنش در

super position از بالاترین لایه شروع می‌کنیم و تنش شعاعی در بالاترین لایه (لایه ۴۰) صفر است (S_{RP}) و سپس طول همین لایه سیم را وقتی فشار بر آن اعمال می‌شود به دست می‌آید:

$$l_w = 2\pi(r_3 - 0.5 - i) + 2(l_c - 2\delta) \quad (7)$$

R^3 مجموع شعاع خارجی یوک و تعداد لایه‌های سیم یا همان h و l تعداد لایه ها و δ تغییر طول در ستون بوده که ناشی از پیش تنش ستون‌ها توسط سیم پیچی می‌باشد:

$$\delta = \frac{345 \times l_c}{2 \times E_c} \quad (8)$$

سپس با استفاده از معادله ۸ و ۹ تنش محیطی همان لایه، ناشی از تغییر طول در ستون توسط همان لایه سیم را به دست می‌آید:

$$S_{ip} = \frac{4 \times \delta \times E_w}{l_w} - \nu \times S_{rp} \quad (9)$$

سپس با استفاده از این تنش محیطی نیروی حاصل از آن به دست می‌آید:

$$f_s = S_{ip} \times 2 \times b \times t \quad (10)$$

این نیرو که بر لایه پایینی اثر کرده و با استفاده از این نیرو می‌توانیم تنش شعاعی لایه پایینی به دست می‌آید:

$$S_{rp} = \left[\frac{f_s}{2 \times (r_3 - i \times t) \times b} \right] \quad (11)$$

و سپس با استفاده از معادله ۸ طول لایه پایینی و تنش محیطی لایه پایینی و سپس تنش محیطی لایه پایین‌تر به دست می‌آید و با این روند تنش محیطی و شعاعی همه لایه‌ها تا پایین‌ترین لایه به دست می‌آید.

۳-۱-۳. تنش محیطی و شعاعی در شرایط بی باری مخزن:

اگر تنش‌های حالت تحت فقط فشار داخلی را از تنش‌های شرایط کاری کم کنیم تنش‌های حالت بی‌باری به دست می‌آید و در این حالت مخزن تحت فشار نیست و فقط پیش تنش ناشی از سیم پیچی در ستون‌ها وجود دارد.

$$S_{tu}(i) = S_{tt}(i) - S_{ip}(i) \quad (12)$$

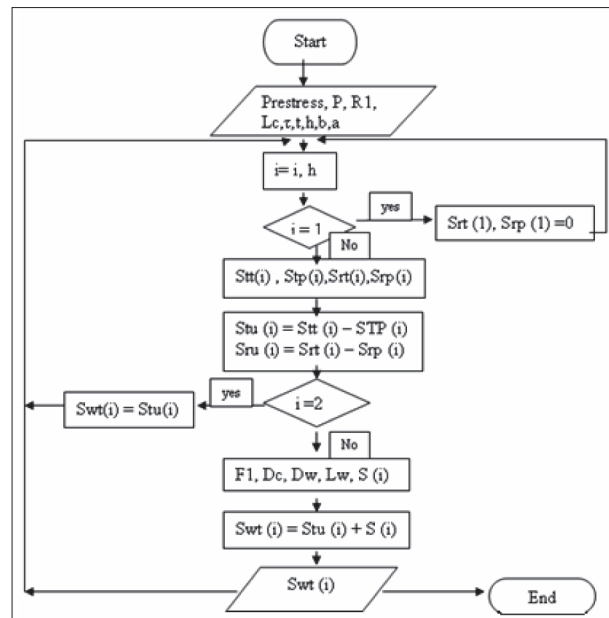
$$S_{ru}(i) = S_{rt}(i) - S_{rp}(i) \quad (13)$$

۳-۱-۴. تنش‌های پیچیدن لایه‌های مختلف سیم پیچ:

در این حالت چون که تنش پیچیدن بالاترین لایه با تنش محیطی بالاترین لایه (لایه ۴۰) در حالت بی‌باری برابر است با فرض حذف لایه‌های سیم از بالا نیروی حاصل از تنش محیطی این لایه را به دست می‌آید:

$$f_1 = 2 \times S_{tu} \times b \times t \quad (14)$$

با فرض حذف لایه بالا، اثر نیروی این لایه از بین رفته و مقداری از



شکل ۳. الگوریتم محاسباتی طراحی

۳-۱-۱: شرایط کاری:

شرایط کاری شرایطی است که وقتی فریم تحت فشار قرار گرفت فشار ناشی از مخزن بر یوک بالا و پایین اثر کرده و فشار ناشی از پیش تنش آزاد شود و در تمامی لایه‌های سیم، تنش برشی یکنواخت τ به وجود آید. فرض می‌کنیم فریم سیم پیچی شده و پیش تنش در ستون‌ها بوجود آمده است، از بالاترین لایه (لایه ۴۰) شروع کرده و چون در این لایه تحت شرایط کاری، تنش شعاعی (S_{RT}) صفر است با استفاده از معیار ترسکا تنش محیطی آن لایه (S_{PT}) به دست می‌آوریم:

$$S_{tt} = 2 \times \tau - S_{rt} \quad (4)$$

سپس نیروی حاصل از تنش محیطی این لایه را به دست می‌آوریم:

$$f_2 = S_{tt} \times 2 \times b \times t \quad (5)$$

که t عرض سطح مقطع سیم و b عرض سیم پیچی شده است. این نیروی ناشی از تنش محیطی بر لایه پایینی اثر می‌کند و از این نیرو تنش شعاعی لایه پایینی را به دست می‌آوریم:

$$S_{rt} = \frac{f_2}{[2 \times (r_3 - i \times t) \times b]} \quad (6)$$

بدین ترتیب با توجه به معادله ۴ تنش محیطی همین لایه و از معادله ۶ تنش شعاعی لایه پایین‌تر به دست آمده و با این روند تمامی تنش‌های محیطی و شعاعی از بالاترین تا پایین‌ترین لایه به دست می‌آید.

۳-۱-۲. شرایط فریم هنگام اعمال فقط فشار داخلی:

تحت این شرایط که فقط فشار داخلی بر لایه‌های سیم اثر کرده و نیروی موجود در لایه‌های مختلف سیم با فشار مخزن مقابله می‌کند. مانند حالت ۳-۱-۱ با فرض سیم پیچی بودن فریم و با استفاده از اصل

تغییر طول ستون در اثر پیش تنش آزاد می‌شود:

$$D_c = \frac{f_1 \times l_{c2}}{4 \times a \times b_y \times E_c} \quad (15)$$

$$l_{c2} = l_c - 2 \times \delta \quad (16)$$

تغییر طول آزاد شده در همان لایه سیم چهار برابر است زیرا ستون از چهار طرف تغییر طول می‌دهد:

$$D_w = 4 D_c \quad (17)$$

$$l_w = 2\pi(r_3 - i + 0.5) + 2(l_c - 2 D_c) \quad (18)$$

از معادله ۱۵ و ۱۶ تنش ناشی از تغییر طول سیم در هر لایه به دست می‌آید که با استفاده از تغییر طول در ستون به کمک تنش محیطی حالت بی‌باری باعث به وجود آمدن پیش تنش در ستون می‌شود و با ادامه این روند و برداشتن هر لایه تنش ناشی از آن به دست می‌آید که اگر به تنش محیطی همان لایه اضافه شود تنش پیچیدن در هر لایه به دست می‌آید.

$$S = \frac{E_w \times D_w}{l_w} \quad (19)$$

$$S_{wt}(i) = S_{tw}(i) + S(i) \quad (20)$$

۴. مطالعه یک نمونه سازه فریم دستگاه پرس

ایزواستاتیک

در این قسمت به آنالیز تنش در سازه فریم دستگاه پرس ایزواستاتیک گرم و بررسی ابعاد نمونه واقعی برای مخزنی که با فشار کاری ۲۵۰ Mpa و شعاع خارجی ۲۴۷ mm و طول مخزن ۸۵۶ mm کار می‌کند، می‌پردازیم. سیمی که برای عملیات پیچیدن به کار می‌رود مطابق با استاندارد ASTM-A905 می‌باشد [۸] که دارای سطح مقطع مستطیلی ۱×۴ mm بوده و تنش تسلیم ۱۲۰۰ Mpa است. سازه قاب از جنس فولاد ۶۵۸۰/۱ و یا ۶۵۸۲/۱ است [۷]. از قسمت ۱-۳ مقدار پیش تنش مورد نیاز در ستون‌ها ۳۴۵ Mpa خواهد بود.

۴-۱. ارائه تنش‌های شعاعی و محیطی:

در شرایط کاری و طبق تئوری ماکسیموف، تحت اعمال فشار داخلی در تمامی لایه‌های سیم تنش برشی $\tau=400$ Mpa به وجود می‌آید. با استفاده از معادله ۴ و ۶ تنش محیطی و شعاعی در جدول شماره ۱ نشان داده شده است:

جدول ۱. تنش‌های شعاعی و محیطی در شرایط کاری

تنش شعاعی لایه (۱)	تنش شعاعی لایه (۲)	تنش شعاعی لایه (۳)	تنش شعاعی لایه (۴)
۱۱۷ mpa	۹۸۳ mpa	۰ mpa	۸۰۰ mpa

در شرایط فقط اعمال فشار داخلی بر لایه‌ها با استفاده از معادله ۹ و ۱۱

تنش‌های محیطی و شعاعی در جدول شماره ۲ نشان داده شده است:

جدول ۲. تنش‌های شعاعی و محیطی و تغییر طولها در شرایط اعمال فشار داخلی

تغییر طول ستون	تنش شعاعی لایه (۱)	تنش شعاعی لایه (۲)	تنش شعاعی لایه (۳)	تنش شعاعی لایه (۴)
۰.۷۳۷۸ mm	۲۳ mpa	۰ mpa	۱۴۸ mpa	۱۴۴ mpa

در حالت بی‌باری مخزن تنش‌های محیطی و شعاعی از تفاضل تنش‌های معادله ۱۲ و ۱۳ به دست می‌آید که در جدول شماره ۳ نشان داده شده است:

جدول ۳. تنش‌های شعاعی و محیطی در شرایط بی‌باری

تنش شعاعی لایه (۱)	تنش شعاعی لایه (۲)	تنش شعاعی لایه (۳)	تنش شعاعی لایه (۴)
۹۴ mpa	۰ mpa	۵۳۵ mpa	۶۵۶ mpa

با توجه به قسمت ۴-۱-۳ از معادله ۲۰ تنش پیچیدن هر لایه به دست می‌آید که پس از انجام محاسبات طراحی، تنش پیچیدن از مقادیر زیاد در لایه پایین‌تر (۶۹۲ Mpa) به مقدار کمتر در لایه بالاتر (۶۵۶ Mpa) می‌رسد زیرا تنش درونی لایه‌های پایین‌تر در اثر فشار لایه‌های بالاتر آزاد می‌شود.

۴-۲. ارائه ابعاد سازه فریم و تعداد لایه‌های سیم:

با توجه به شرایط فریم و طراحی سیم پیچ، ابعاد هندسی را باید طوری به دست آورد که وزن سیم پیچ و نیاز به لایه‌های سیم به حداقل برسد. با به حداقل رساندن طول مورد نیاز سیم و با استفاده از امکان‌سنجی ساخت ابعاد نمونه مورد بررسی، $b_y=130$ mm, $a=70$ mm, $b=120$ mm, $h=40$ mm به دست می‌آید.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به اصول تنش‌گذاری اولیه در این روش، این مقاله کوشیده است با ارائه روابط تئوری سازه فریم، تنش پیچیدن لایه‌های مختلف سیم پیچی را به دست آورد و با مطالعه یک نمونه، موضوع را هر چه بیشتر مورد بررسی قرار دهد و نتایج حاصل از این مقاله به این صورت می‌باشد:

۱. بهترین روش سیم‌پیچی، روش تنش برشی ثابت می‌باشد که همه لایه‌های سیم پس از اعمال فشار داخلی تحت تنش برشی یکنواختی قرار می‌گیرند.

۲. تنش پیچیدن در تمامی لایه‌ها متفاوت و با توجه به شرایط قاب و طراحی سیم پیچ ابعاد هندسی طوری به دست آمده که وزن سیم پیچ و نیاز به لایه به حداقل برسد.

۳. با توجه به متغییر بودن طول لایه‌های مختلف سیم، میزان تغییر طول در لایه‌های مختلف متفاوت خواهد بود که اگر این تغییر طول‌ها هر کدام جداگانه محاسبه شود جواب دقیق‌تری از تنش‌های پیچیدن به دست می‌آید.

منابع

- [۱] بهادر عربی نژاد، طراحی، آنالیز و امکان سنجی ساخت قاب دستگاه پرس ایزواستاتیک گرم، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۳.
- [2] P.Fryer. High Pressure Vessel Technology,1987.
- [3] E.H.Young&L.E.Brownell.Process Equipment and design. John Wiley and Sons.1959.
- [4] L.Yu.Maksimov."Design of Cylinder to Withstand High Internal Pressure",Russian Engineering Journal (Translation),1964.
- [5] G.Harkegard ,"A procedure for the Analysis of wire-wound Structure and its Application to the Optimum Design of Vessel for High Pressure"4th Internatinal Conference on Pressure Vessel Technology. Sweden.London,1980.
- [6] ASME.Sec.8.Div3, 2001.
- [7] Key steel . edi,1998.
- [8] ASTM A905,1998.