مبانی طراحی و ساخت مخازن تحت فشار فلزی

جهان تقی‌زاده[1]، وحید چراغی[2]

۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم taghizadeh@qut.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، مؤسسهٔ آموزش عالی غیرانتفاعی پارسیان، قزوین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۷

چکیده

مخازن تحت فشار از جمله تجهیزاتی هستند که نه‌تنها در حوزهٔ نفت و پتروشیمی، که در بیشتر شاخه‌های صنعت همچون نیروگاه و حمل‌ونقل از کاربرد ویژه و قابل توجهی برخوردارند. لذا توجه به مقولهٔ طراحی و ساخت آنها اهمیت ویژه‌ای دارد. آنچه در این مقاله بدان پرداخته شده است، براساس استاندارد انجمن مهندسان مکانیک امریکا لازم و ضروری بوده، اما طبیعی است که نمی‌تواند تمامی نکته‌ها و مسائل حاشیه‌ای این موضوع را دربر داشته باشد. مطالب ارائه‌شده به‌ترتیب شامل آشنایی با تعاریف اولیه، انتخاب مواد و نکات مهم در فرایند ساخت یک مخزن تحت فشار از نگاه تولید و مسائل مربوط به آن است. مخزن تحت فشار طبق بخش ۸ استاندارد انجمن مهندسان مکانیک امریکا به مخازنی گفته می‌شود که فشار طراحی داخل آن بیش از ۱۵ و کمتر از ۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع باشد. استاندارد اصلی برای طراحی این مخازن توسط انجمن مذکور تدوین شده است و هر چهار سال یکبار بازنگری می‌شود. کاربرد عمدهٔ این مخازن در صنایع نفت و گاز است.

واژگان کلیدی: مخزن تحت فشار، طراحی، ساخت، استاندارد

۱. مقدمه

برای اینکه مخازن تحت فشار کارکردی ایمن داشته باشند، در فشار و دمای ویژه‌ای طراحی می‌شوند که اصطلاحاً فشار و دمای طراحی نامیده می‌شود. طراحی و ساخت این‌گونه تجهیزات تحت فشار بدون اصول و استفاده از کدها و استانداردهای طراحی می‌تواند بسیار حادثه‌آفرین باشد. از جمله مهمترین مسائل در طراحی مخازن تحت فشار انتخاب صحیح مواد اولیهٔ به‌کار رفته در آنهاست؛ زیرا این امر تأثیر بسزایی در تعیین ضخامت، ابعاد و در نهایت شرایط عملکردی مخزن دارد. متداول‌ترین مواد برای ساخت مخازن تحت فشار، فولاد کربنی و کم‌آلیاژ می‌باشد. این فولادها در گسترهٔ وسیعی از دما کاربرد دارند و آیین‌نامهٔ کاربرد بیش از ۳۴ گرید از فولادهای کربنی و ۴۴ گرید از فولادهای آلیاژی را به‌عنوان ورق‌های باکیفیت مناسب برای ساخت مخازن تحت فشار مورد تأیید قرار داده است. عموماً انتخاب هر یک از این مواد براساس معیارهای زیر صورت می‌پذیرد:

۱. در دسترس بودن ورق در ضخامت‌های مورد نیاز

۲. چقرمگی مورد نیاز در دماهای پایین
۳. استحکام لازم در دماهای بالا
۴. مقاومت در دماهای بالا در برابر اکسایش یا خوردگی
۵. معیارهای اضافی دیگر که معمولاً برای انتخاب مواد در صنعت نفت و پتروشیمی مورد توجه قرار می‌گیرند

مقاومت فلز در برابر اثر تخریبی هیدروژن (ایجاد شکنندگی هیدروژن و تاول‌های هیدروژنی) در دماها و فشارهای بالاست. انتخاب دیگر در رابطه با مواد اولیهٔ ساخت مخازن تحت فشار استفاده از فولادهای آلیاژی به‌دلیل کنترل خوردگی یا جلوگیری از آلودگی سیال در اثر حل آهن است. فولادهای ضدزنگ آستنیتی همچنین می‌توانند برای شرایط کاری با دماهای بالا به‌کار روند. مشخصه‌های فرایندی لازم برای انتخاب آلیاژهای مناسب در شرایط عملیاتی خاص مشابه آنچه برای مخازن ساخته‌شده از فولاد کربنی بیان شد می‌باشد. چون قیمت تمام‌شده برای ورق آلیاژی تفاوت قابل ملاحظه‌ای با ورق کربنی دارد، معمولاً در مواردی که به استفاده از فولادهای آلیاژی احساس نیاز شود، از ترکیب آنها به نام ورق روکش‌دار بهره می‌گیرند. این ورق با پایهٔ اصلی فولاد کربنی و روکشی از فولاد آلیاژی علاوه بر مقامت زیاد در برابر خوردگی هزینهٔ پایین‌تری نسبت به فولاد تمام آلیاژی دارد. طبق استاندارد ASME VIII (Division 1) روش‌های ساخت مخازن تحت فشار به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند، که در ادامه برخی از آنها تشریح می‌شود.

۲. روش‌های ساخت مخازن تحت فشار

۲-۱. جوشکاری

در ساخت مخازن تحت فشار به روش جوشکاری، متناسب با متریال فلز پایه، نوع کاربری، میزان حساسیت در ساخت مخزن و تجهیزات کارگاه می‌توان از روش‌های متعددی استفاده کرد که از آن جمله می‌توان به روش جوشکاری الکترود دستی، میگ، تیگ و زیر پودری اشاره نمود. در این روش مطابق شکل ۱، پس از رول‌کردن بدنهٔ مخزن و ساختن عدسی آنها را به‌هم جوش می‌دهند.

۲-۱. آهنگری

ساخت مخازن تحت فشار به روش فورجینگ، برای مخازنی قابل اجراست که در آنها جوش‌های طولی وجود ندارد؛ همچنین این روش در فولادهای کم‌کربن و فولادهای کم‌آلیاژ قابل اجراست.

۳. مواد مورد استفاده در ساخت مخازن

در حالت نظری، هر ماده‌ای با تحمل تنش کششی بالا و خواص کششی مناسب می‌تواند در ساخت مخازن به‌کار رود، اما استاندارد انجمن مهندسان مکانیک امریکا فهرستی از بهترین مواد و محدودیت دما و فشار آنها را مشخص کرده است. بسیاری از منابع تحت فشار از آهن تشکیل شده‌اند. ورق‌های آهنی به‌صورت رول درآمده و به عدسی‌ها و به‌همدیگر جوش داده می‌شوند. اما این جوش ممکن است بر بسیاری از خواص آهن رول‌شده اثر منفی بگذارد، مگر اینکه قبل از جوشکاری نکاتی لحاظ شود. علاوه بر استحکام مکانیکی مناسب، استانداردهای حال حاضر دنیا، شرکت‌ها را موظف می‌کند تا از آهنی با مقاومت بالا در مقابل ضربه استفاده کنند، همچنین برای محیط و سیالاتی که موجب خوردگی کربن استیل می‌شوند لازم است از موادی با قابلیت مقاومت در برابر خوردگی استفاده کنند.

امروزه گروهی از مخازن تحت فشار از کامپوزیت ساخته می‌شوند. این نوع از مخازن تحت فشار می‌توانند بسیار سبک باشند. اما ساخت آنها مشکل است. مخازن تحت فشار برای جلوگیری از خرابی می‌توانند با پلیمرها یا سرامیک‌ها محافظت شوند. همچنین این پوشش خود می‌تواند بخش قابل توجهی از فشار را تحمل کند و پشتیبان خوبی برای لایهٔ اصلی باشد.

٤. طبقه‌بندی مخازن

٤-۱. طبقه‌بندی براساس شکل

٤-۱-۱. مخازن استوانه‌ای

این دسته از مخازن تحت فشار همانند شکل ۲ اغلب به‌صورت استوانه‌ای با دو سر عدسی ساخته می‌شوند. این دسته از مخازن رایج‌ترین گونه‌اند. مخازن استوانه‌ای بلند ممکن است عمودی یا افقی باشند. اصولاً نیاز عملیاتی یک برج تعیین‌کنندهٔ نوع افقی یا عمودی آن است. برای مثال برج‌ها، که نیاز به ثقل جهت جداسازی فازها دارند، به‌صورت عمودی نصب می‌شوند، حال آنکه مبدل‌های حرارتی هم می‌توانند به‌صورت افقی و هم عمودی نصب شوند. در مورد مبدل‌های حرارتی این انتخاب

عموماً توسط روش انتقال گرما و سیر سیال صورت می‌گیرد. در مخازن ذخیره محل نصب عمدتاً عامل انتخاب است.

شکل ۱. روش جوشکاری در ساخت مخازن تحت فشار

٤-١-٢. مخازن کروی

به‌علت استحکام ذاتی، شکل کروی این مخازن اصولاً برای فشارهای بالا به‌کار می‌روند. همچنین مخازن ذخیرهٔ بزرگ، که تحت فشار متوسط قرار دارند، معمولاً شکل کروی یا شبه‌کروی دارند. نمونه‌ای از این مخازن در شکل ۳ نمایش داده شده است.

٤-٢. طبقه‌بندی براساس فشار

مخازن تحت فشار براساس فشار به دو دسته تقسیم می‌شوند: مخزن تحت فشار داخلی و مخزن تحت فشار خارجی. در نوع داخلی معمولاً سیالی با فشار بالاتر از فشار اتمسفر وجود دارد. اما نوع خارجی معمولاً با شرایط خلأ مرتبط است و باید برای فشار خارجی طراحی شود، در غیر این‌صورت متلاشی خواهد شد.

٤-٣. طبقه‌بندی براساس ضخامت جداره

مخازن تحت فشار براساس ضخامت جداره نیز به دو گروه مخازن جدارنازک و مخازن جدارضخیم تقسیم می‌شوند. مخازن جدارنازک از جمله متداول‌ترین گونه‌ها هستند. در این مخازن نسبت ضخامت پوسته به قطر کمتر از ۱۰ درصد است. در مخازن جدارضخیم اما نسبت ضخامت پوسته به قطر بیشتر از ۱۰ درصد است.

٥. کاربردها

مخازن تحت فشار در کاربردهای گوناگون، هم در بخش صنعتی و هم در بخش خصوصی، استفاده می‌شوند. این مخازن برای ذخیرهٔ هوای فشرده و مخازن آب داغ خانگی کاربرد دارد. نمونه‌های دیگری از کاربرد این ادوات می‌تواند مخازن تحت فشار استوانه‌ای غواصی، برج‌های تقطیر، اتوکلاو در پالایشگاه‌های نفت و پتروشیمی، راکتورهای هسته‌ای، زیردریایی و کشتی فضایی، مخازن پنوماتیکی و هیدرولیکی تحت فشار، مخازن کیسهٔ هوای خودرو و مخازن ذخیره‌سازی گاز مایع، مانند آمونیاک، کلر، پروپان، بوتان و ال. پی. جی.[1] را نام برد. در شکل ۴ نمونه‌ای از مخازن ال. پی. جی. مورد استفاده در خودرو مشاهد می‌شود.

٦. مفاهیم و عملیات اولیه در طراحی و ساخت مخازن

٦-١. فشار و دمای کاری

فشار و دمای کاری اصطلاحاً به فشار و دمایی گفته می‌شود که مخزن، تحت آن به عملکرد عادی خود می‌پردازد.

٦-٢. فشار طراحی

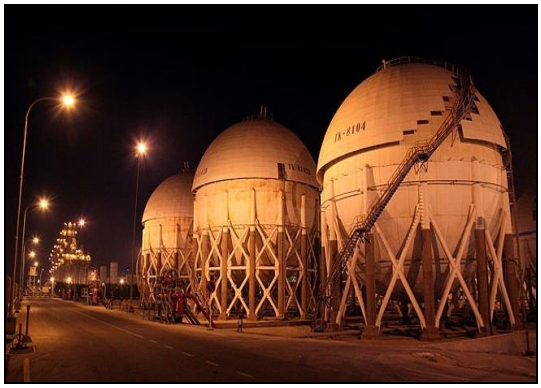
فشاری است که جهت تعیین حداقل ضخامت مجاز برای اجزای مختلف مخازن تحت فشار در نظر گرفته می‌شود و معمولاً ۱۰ تا ۳۰ درصد بیشتر از فشار عملیاتی آن است. چنانچه مخزن دارای ارتفاع قابل توجهی باشد (بیشتر از ۱۰ متر)، باید فشار استاتیکی ناشی از وزن سیال نیز به رقم مزبور اضافه شود. در مورد مخازنی که به‌طور معمول در شرایط خلأ کار می‌کنند و یا اینکه امکان خلأ برای آنها محتمل است، باید طراحی با در نظر گرفتن پدیدهٔ خلأ کامل انجام شود.

٦-٣. درجه حرارت طراحی

این پارامتر در طراحی یک مخزن تحت فشار نقش مهمی دارد؛ زیرا مستقیماً با مقدار تنش مجاز فلز به‌کار رفته در ساخت مخزن ارتباط دارد. به‌عنوان پیشنهاد می‌توان برای مخازنی که فعالیت آنها در محدودهٔ ۲۰- تا ۶۵۰ فارنهایت قرار دارد، براساس نرخ فلنج‌های به‌کار رفته، اقدام به تعیین درجه حرارت طراحی نمود؛ زیرا حداکثر تنش مجاز برای فولادهای کربنی و کم‌آلیاژ در محدودهٔ فوق عمدتاً ثابت است. برای مخازن با فولاد کربنی، که شرایط دمایی بهره‌برداری از آنها نزدیک به محیط اطراف است، تعیین حداقل درجه حرارت شکست ترد همواره وجود خواهد داشت. یادآوری می‌شود که آیین‌نامه در هیچ حالتی اجازهٔ

استفاده از درجه حرارت بالاتر از ۱۰۰۰ فارنهایت برای فولادهای کربنی و ۱۲۰۰ فارنهایت برای فولادهای کم‌آلیاژ را نمی‌دهد.

شکل ۲. نمونه‌ای از یک مخزن تحت فشار استوانه‌ای



شکل ۳. نمونه‌ای از یک مخزن تحت فشار کروی

شکل ۴. نمایی از یک مخزن ال. پی. جی. در خودرو

٦-٤. حداکثر فشار کاری مجاز[۲]

فشاری است که تحت آن، ضعیف‌ترین عضو مجموعه به نقطهٔ نهائی تنش تسلیم خود می‌رسد. معمولاً سازندگان مخازن تحت فشار مقدار حداکثر فشار کاری مجاز را با توجه به پوستهٔ مخزن تخمین می‌زنند و اجزای کوچک مثل فلنج یا دریچه‌ها را مبنای محاسبه قرار نمی‌دهند. عبارت MAWP (new & cold) یکی از رایج‌ترین اصطلاحات در این زمینه است؛ عبارت new به شرایط بدون خوردگی و cold به فاقد شرایط دمای طراحی در دمای اتاق اشاره دارد. بنابراین با توجه به تعریف اصلی حداکثر فشار کاری مجاز می‌توان نوشت:

$$MAWP > MAWP_{(new\ \&\ cold)}$$

٦-٥. فشار تست هیدرواستاتیک

فشار این تست ۱/۵ برابر فشار طراحی یا مساوی با حداکثر فشار کاری مجاز در نظر گرفته می‌شود.

٦-٦. ماکزیمم تنش مجاز

مقدار این کمیت به جنس مادهٔ به‌کار رفته در ساخت مخزن بستگی دارد و مستقیماً با خواص مکانیکی مادهٔ تشکیل‌دهندهٔ مخزن در ارتباط است.

٦-٧. استحکام اتصالات

مقدار این پارامتر به نحوهٔ اتصالات و درصد بازرسی (رادیوگرافی) آنها بستگی دارد. مطابق شکل ۵ در مورد مخزنی که قرار است به‌طور کامل رادیوگرافی شود، لازم است تا تمامی خطوط A و D و خطوط C و B (به شرط اینکه از لولهٔ ۱۰ اینچ یا ضخامت ۱/۱۲۵ اینچ فراتر رفته باشد) رادیوگرافی شوند. اما اگر قرار باشد مخزنی به‌صورت موضعی رادیوگرافی شود، آنگاه محل‌های اتصال خطوط B و C با خطوط دستهٔ A (شامل نازل‌های با قطر بیش از از ۱۰اینچ و ضخامت ۱ اینچ) و محل تماس مقاطع بدون درز مخزن یا عدسی‌ها وقتی طراحی جوش‌های A و D

برمبنای استحکام ۱ یا ۰/۹ صورت می‌پذیرد، باید به‌طور موضعی رادیوگرافی شوند. اما چنانچه مخزنی فاقد هرگونه رادیوگرافی طراحی شده باشد، باید حائز یکی از شرایط زیر باشد:

۱. تنها فشار خارجی وجود داشته باشد

۲. اتصالات بدون در نظر گرفتن تست رادیوگرافی طراحی شده باشند

در اینجا لازم است انواع بارگذاری‌های ممکن روی یک مخزن تحت فشار معرفی و از این رهگذر اهداف طراحی و چگونگی آن جهت نیل به مقاصد اصلی شناسایی شود. خلاصه‌ای از انواع بارگذاری‌هایی که می‌تواند بر مخزن تحت فشار اعمال شود عبارت است از:

۱. فشار داخلی (یا خارجی)

۲. وزن مخزن

۳. بارهای استاتیکی ناشی از لوله‌های اتصال، تجهیزات متصل به مخزن، ادوات داخلی و جز این‌ها

۴. بارهای دینامیکی مربوط به تغییر فشار یا دمای مخزن

۵. نیروهای ناشی از آثار باد و زلزله

۶. بارهای ضربه‌ای ناشی از پدیدهٔ ضربهٔ قوچ

۷. تنش ناشی از گرادیان دمایی وابسته به زمان (اثر خزش)

معمولاً در فرایند طراحی یک مخزن تحت فشار، چنانچه مخزن در شرایط خاصی قرار نداشته باشد می‌توان برای راحتی کار، آثار بارهای استاتیکی، دینامیکی، ضربه‌ای و همچنین پدیدهٔ خزش را نادیده گرفت و بدین ترتیب تنها تنش ناشی از فشار داخلی (یا خارجی) و نیز وزن مخزن به‌همراه آثار باد و زلزله در طراحی یک مخزن تحت فشار نقش اساسی ایفا می‌کنند. با توجه به گوناگونی شرایط بارگذاری و فرایندهای تولید ورق و دیگر اجزای مورد نیاز یک مخزن تحت فشار، تنش‌های ایجادشده را می توان به سه گروه عمده دسته‌بندی کرد:

۱. تنش کششی

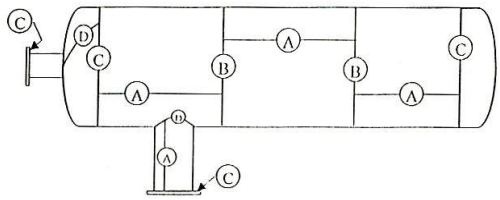
۲. تنش فشاری

۳. تنش پوسته‌ای اولیه (تنش پسماند)

با این مقدمه، هدف از طراحی یک مخزن تحت فشار را می‌توان به‌طور ساده غلبه بر انواع تنش‌های ایجادشده با توجه به شرایط عملکردی آن دانست، به‌گونه‌ای که شکل فیزیکی مخزن از قابلیت‌های عملکردی مطلوب برخوردار باشد.

۶-۸. انتخاب مواد

از جمله مهمترین مسائل مطرح در طراحی مخازن تحت فشار انتخاب صحیح مواد اولیهٔ به‌کار رفته در آنهاست؛ زیرا این امر تأثیر بسزایی در تعیین ضخامت‌ها، ابعاد و نهایتاً شرایط عملکردی مخزن دارد. اطلاعات مهم برای انتخاب مناسب مواد شامل تعیین مشخصه‌ها و مقادیر سیال در اجزای مختلف مخزن می‌گردد. به‌علاوه پی. اچ. سیال، درجهٔ هوازنی و درجه حرارت (با پیش‌بینی دامنه) باید لیست شود. متداول‌ترین مواد برای ساخت مخازن تحت فشار، فولاد کربنی و کم‌آلیاژ می‌باشد.



شکل ۵. انواع جوش‌های طولی و عرضی روی یک مخزن

یادآور می‌شود از ملاحظات عمده در انتخاب مواد، خطر احتمالی شکست ترد در برخی از فولادهای کربنی است که از اهمیت خاصی برخوردار است. انتخاب دیگر در رابطه با مواد اولیهٔ ساخت مخازن تحت فشار، استفاده از فولادهای آلیاژی به‌دلیل کنترل خوردگی یا جلوگیری از آلودگی سیال در اثر حل‌شدن آهن است. فولادهای ضدزنگ آستنیتی همچنین می‌توانند برای شرایط کاری با درجه حرارت‌های بالا تا ۲۰۰۰ فارنهایت به‌کار گرفته شوند. مشخصه‌های فرایندی لازم برای انتخاب آلیاژهای مناسب در شرایط عملیاتی خاص مشابه با آنچه برای مخازن ساخته‌شده از فولاد کربنی بیان شد می‌باشد. چون قیمت تمام‌شده برای ورق آلیاژی تفاوت قابل ملاحظه‌ای با ورق کربنی دارد، معمولاً در مواردی که به استفاده از فولادهای آلیاژی نیاز باشد، از ترکیب آنها به نام ورق روکش‌دار بهره می‌گیرند. این ورق با پایهٔ اصلی فولاد کربنی و روکشی از جنس فولاد آلیاژی (به ضخامت ۰/۱۲۵ تا ۰/۳۷۵ اینچ) علاوه بر مقامت زیاد در برابر خوردگی نسبت به فولاد تمام‌آلیاژی قیمت پایین‌تری دارد. پیشنهاد زیر در رابطه با انتخاب بین آلیاژ و روکش آلیاژی از لحاظ قیمت تمام‌شده توصیه می‌شود:

۱. فولاد آلیاژی، ضخامت کمتر مساوی ۰/۶۲۵ اینچ

۲. فولاد آلیاژی یا روکش آلیاژی، ۰/۶۲۵ تا ۰/۷۵ اینچ

۳. فولاد روکش آلیاژی، بیش از ۰/۷۵ اینچ

٦-۹. طراحی

با توجه به روابط مقاومت مصالح در رابطه با محاسبهٔ ضخامت مورد نیاز جهت پوسته و عدسی یک مخزن تحت فشار استوانه‌ای می‌توان از روابط ۱ و ۲ بهره گرفت:

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \quad (۱)$$

$$P_a = \frac{SEt}{R + 0.6t} \quad (۲)$$

به‌طوری‌که در این روابط t ضخامت اسمی، P فشار طراحی، P_a فشار واقعی که باید بیشتر از P باشد، R شعاع داخلی، S تنش تسلیم ورق مورد نظر و E بازده اتصال است.

٦-۱۰. کنترل ورق‌ها و لوله‌های ورودی

ورق تولیدشده باید از شرکت تولیدکننده گواهینامه داشته باشد. در این سند مجموعه‌ای از اطلاعات مربوط به ورق درج شده است. هر ورق یک هیت نامبر[۳] دارد که از طریق آن می‌توان آن را ردیابی کرد و اطلاعاتی چون خواص مکانیکی و ترکیبات شیمیایی و جز این‌ها را به‌دست آورد. گاهی در کارخانه ورق‌هایی وارد می‌شود که هیت نامبر ندارند و یا به‌نحوی پاک شده‌اند یا قابل رؤیت نیستند. در حالت ایده‌آل کارخانه تکه‌ای از ورق مورد نظر را بریده و به آزمایشگاه می‌دهد تا آزمایش‌ها و تست‌های مشخصی روی آن انجام شود. پس از دریافت جواب آزمایشگاه پارامترهایی که آزمایشگاه به‌دست آورده با پارامترهای موجود در گواهینامهٔ ورق‌ها مقایسه می‌شوند تا حدس طراح در مورد ورق مطلوب او بررسی شود. لوله‌ها نیز همچون ورق‌ها دارای یک سری مشخصات فنی مانند هیت نامبر در ابتدا و انتهای لوله‌ها، Schedule، قطر و جنس لوله می‌باشند. معمولاً Schedule ها متنوع بوده و به‌عبارت عامیانه به گوشت لوله یا ضخامت دیواره‌های لوله معروف می‌باشد. البته جدول‌هایی وجود دارند که با فرض معلوم‌بون سایز لوله و Schedule آن می‌توان ضخامت دیوارهٔ آن را از روی جدول‌ها به‌دست آورد. اطلاعات حاصل از جدول را با اطلاعاتی که با اندازه‌گیری دیوارهٔ لوله با کولیس انجام می‌شود، می‌توان مقایسه کرد تا مطمئن شد که لولهٔ مورد نظر درست است یا نه. از نظر ابعاد ورق هم قابل ذکر است که معمولاً ورق‌های استاندارد ایرانی به‌طول ۶ و عرض ۱/۵ متر و ورق‌های خاری به‌طول ۶ و عرض ۲ متر می‌باشد. البته ورق‌های تولیدشده نسبت به ابعاد اسمی ۱۰ الی ۱۵ میلی‌متر بزرگتر می‌باشد.

٦-۱۱. کنترل اتصالات، فلنج‌ها و زانویی‌های ورودی به کارخانه

اصولاً مأمور کنترل کیفیت با داشتن درخواست سفارش کارخانه برای کنترل اتصالات اقدام می‌کند. هر یک از اتصالات ورودی به کارخانه مشخصاتی دارند که روی آنها حک شده است. وظیفهٔ مأمور بررسی کالای ورودی کارخانه با دستور سفارش است و پس از بررسی، تحویل انباردار کارخانه می‌دهد.

٦-۱۲. دستور برش ورق

هر پروژهٔ تولید مخزن شامل یک سری اسناد و مدارک است؛ از جملهٔ این اسناد نقشهٔ ساخت مخزن می‌باشد. این نقشه می‌تواند در هر بستهٔ نرم‌افزاری طراحی از جمله اتوکد طراحی شود که دارای اطلاعاتی در مورد طول و ضخامت، قطر داخلی و تعداد نازل‌ها و فلنج‌ها و اندازهٔ قرارگیری نازل‌ها روی پوسته و جز این‌ها می‌باشد. جهت برش این ورق‌ها با داشتن قطر داخلی مخزن و ضخامت ورق بایستی محاسبات برمبنای تار خنثای مخزن انجام شود. به‌طوری‌که حاصل‌ضرب عدد پی در میانگین قطر مخزن طول ورقی که باید برش بخورد را مشخص می‌کند. عرض ورق هم عموماً می‌تواند استاندارد یا دلخواه باشد. مثلاً اگر قطر داخلی مخزنی ۱۵۰۰ و ضخامت ورق۱۴ میلی‌متر باشد، طول ورق که بایستی برش بخورد عبارت است از:

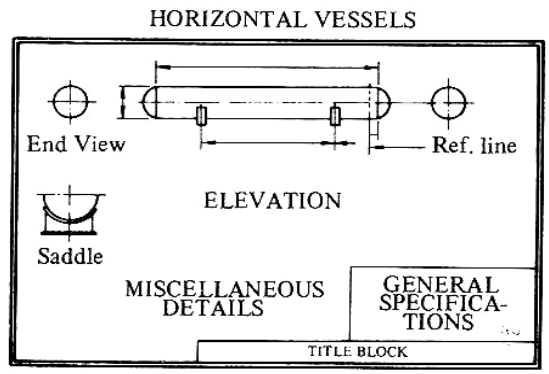
$$1514 \times 3.14 = 4753.9$$

مطابق شکل ۶، براساس طول کلی مخزن تعداد پوسته‌هایی که نیاز است تا این طول کلی مخزن پوشش داده شود را تهیه می‌کنند. همچنین با در نظر گرفتن گپ (فاصلهٔ بین هر دو پوسته) باید این افزایش و کاهش اندازه‌ها را در نظر گرفت تا طول کلی مخزن مطابق با نقشه باشد.

٦-۱۳. پارامترهای کنترل ورق‌های بریده‌شده

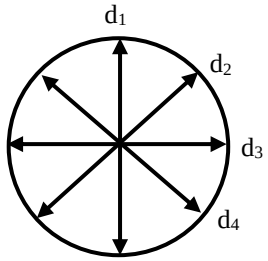
پس از برش ورق‌ها به اندازه‌های محاسبه‌شده، باید مجدداً این ورق‌ها توسط مأمور کنترل کیفیت اندازه‌گیری و بعد با گونیا از

قائم‌بودن و برش صاف آنها اطمینان حاصل کرد. پارامترهای اندازه‌گیری شامل طول و عرض و قطر آن مستطیل می‌باشد. اندازه‌گیری قطر بدین منظور است که ورق مستطیل بریده شود. قطرهای مستطیل می‌توانند تا ۳ سانتی‌متر تلرانس داشته باشند. بعد از تأیید صحت اندازه‌ها، ورق‌ها را به قسمت نورد منتقل می‌کنند. در قسمت نورد، با باردهی توسط دستگاه نورد ورق را رول می‌کند. بعد از رول‌کردن ورق باید ورق رول‌شده جوش شود. هر جوشی که روی ورق‌ها صورت می‌گیرد باید مطابق دستورالعمل رویهٔ جوشکاری[۴] باشد که ممکن است الکترود دستی یا جوش زیر پودری باشد.

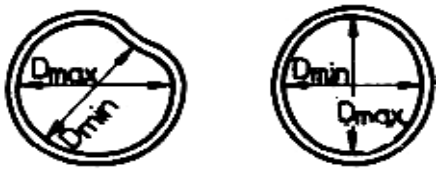


شکل ٦. نقشه و اطلاعات مورد نیاز ساخت مخزن

پس از جوش‌دادن ورق‌های رول‌شده باید قطر این ورق‌ها توسط مأمور کنترل کیفیت اندازه‌گیری شود که مطابق شکل ۷ به‌طور معمول بایستی ۴ قطر و محیط خارجی پوسته‌ها اندازه‌گیری شود. در اندازه‌گیری قطرها معیار اندازهٔ بزرگتر است؛ زیرا مطابق شکل ۸ در اندازه‌گیری قطرها معمولاً یک قطر بزرگ و یک قطر کوچک به‌دست می‌آید. پس از این مرحله، نوبت مونتاژ پوسته‌ها می‌شود. در نقشهٔ ساخت زاویهٔ بین خط جوش‌ها داده شده است؛ به‌عبارتی هر پوسته دارای یک خط جوش طولی است و وقتی دو پوسته به‌هم مونتاژ می‌شوند، باید خط جوش‌های طولی آنها مطابق با نقشه قرار گرفته باشد. برای محاسبهٔ زاویهٔ بین دو خط جوش، که در نقشه به میلی‌متر آمده، باید مطابق نقشه محیط خارجی پوسته‌ها را اندازه گرفت و در زاویهٔ مورد نظر ضرب کرد و بعد به ۳۶۰ تقسیم نمود تا زاویهٔ مورد نظر برحسب میلی‌متر به‌دست آید. پس از مونتاژ پوسته‌ها بایستی مطابق با WPS پوسته‌ها به‌هم جوش شوند. ابتدا از داخل با جوش الکترود دستی یک پاس ریشه زده شده و بعد از بیرون پوسته، قسمت جوش‌شده را سنگ می‌زنند تا ریشهٔ جوش کاملاً مشخص شود. سپس روی ریشهٔ جوش تست نفوذ[۵] انجام می‌شود. بعد از انجام تست PT و اطمینان از سالم‌بودن جوش، جوشکاری از بیرون شروع می‌شود که می‌تواند جوش الکترود دستی یا زیر پودری باشد. در نهایت بعد از اینکه پوسته‌ها کاملاً جوش خوردند، باید تست رادیوگرافی روی آنها انجام شود.



شکل ۷. اندازه‌گیری چهار قطر و محیط خارجی پوسته‌ها



$D_{max}-D_{min}=P$

شکل ۸. تفاوت در اندازهٔ قطرها

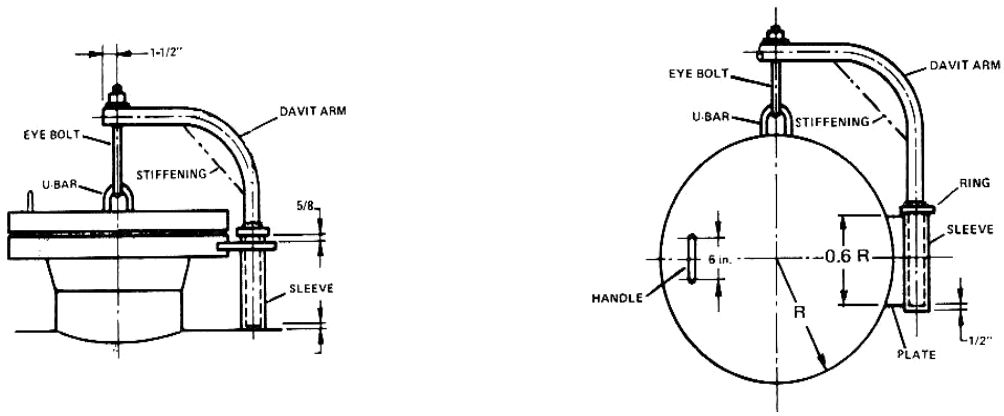
٦-١٤. مونتاژ پوسته به عدسی

طبق استاندارد، ضخامت عدسی بزرگتر یا حداقل برابر با ضخامت ورق پوسته محاسبه می‌شود و با ایجاد پخی[۶] که طول آن بزرگتر از سه برابر اختلاف ضخامت عدسی و پوسته است، هم‌امتدادی انجام می‌شود. در ضمن اختلاف ضخامت به بیرون پوسته انداخته شده و داخل پوسته کاملاً هم‌امتداد هم باشد.

٦-١٥. اکس‌بندی یا محوربندی مخزن

پس از اینکه مطابق نقشه پوسته‌ها مونتاژ شدند، معمولاً دریچه‌ها[۷] از جمله دریچهٔ آدم‌رو[۸] در زاویهٔ ۱۸۰ یا ۹۰ درجه با خط محور مخزن قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که ابتدا باید از روی نقشه، زاویهٔ خط جوش طولی نزدیک به دریچهٔ آدم‌رو را به میلی‌متر تبدیل کرد و روی پوسته با سنبه ایجاد نمود. سپس توسط هوا برشی دایره‌ای مطابق با نقشه روی پوسته ایجاد نمود. این مورد در شکل ۹ نمایش داده شده است. معمولاً سوراخ آدم‌رو در زاویهٔ ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ قرار دارد. از روی همان خط

سنبه محیط به چهار قسمت مساوی تقسیم می‌شود و سپس خط محور در طول مخزن امتداد داده شده و این کار در هر چهار طرف مخزن انجام می‌شود. این خطوط محور به‌طور عامیانه به خطوط آکس معروف‌اند. دلیل اکس‌بندی مخزن مونتاژ نازل‌ها و اتصالاتی است که روی مخزن سوار می‌شوند؛ چون مطابق با نقشه اندازهٔ نازل‌ها را تا خط اکس مخزن می‌دهند که به پروجکشن[9] معروف است. پیش از هرگونه مونتاژ نازل باید از ترازبودن خود مخزن مطمئن شد. معمولاً برای ترازکردن مخزن از شلینگ تراز استفاده می‌شود. شلینگ تراز شیلنگی است که مقدار مشخصی آب درون آن وجود دارد و هنگام پرکردن آن باید مراقب بود که هوا داخل شیلنگ نشود. چون هوای موجود در آب سبب برزو خطا در معیار ترازبودن می‌شود.



شکل ۹. اطلاعات مربوط به سوراخ ورودی در نقشهٔ ساخت مخزن؛ الف) ورودی افقی، ب) ورودی عمودی

٦-١٦. نازل

نازل ترکیبی از فلنج و لوله است که در هنگام مونتاژ باید دارای یک مشخصات باشد. لذا چون مشخصهٔ فلنج با مشخصهٔ لوله یکی است، گاهی پیش می‌آید که میزان مشخصی از لحاظ ضخامت اختلاف داشته باشند؛ در این مواقع باید به نسبت ۳ به ۱ فلنج یا لوله را پخ زد. در هنگام مونتاژ نازل‌ها باید یک سری مراحل را رعایت کرد؛ از جمله فاصلهٔ معینی بین لوله و فلنج تحت عنوان گپ در نظر گرفته شود و بعد توسط گونیا از صاف مونتاژشدن فلنج به لوله اطمینان حاصل شود؛ سپس توسط مأمور کنترل کیفیت بازدید شود و با داشتن گیج مخصوصی از هم‌امتداد بودن لوله و فلنج در یک راستا اطمینان حاصل شود و مطابق WPS نازل‌های مونتاژشده جوش شوند که معمولاً پاس ریشه در نازل‌ها با جوش آرگون و پاس‌های بعدی با الکترود E7018 صورت می‌گیرد و بعد از جوش مجدداً مأمور کنترل کیفیت توسط چراغی جوش داخل و لوله را بازدید می‌کند تا اطمینان حاصل کند که جوش کاملاً نفوذ کرده باشد. در نهایت پس از تأیید چشمی نازل تست غیرمخرب می‌شود.

٦-١٧. مونتاژ نازل به پوسته

هر نازل مطابق با نقشه معمولاً در یک زاویه و در یک فاصلهٔ مشخص از خط آکس قرار دارد. معمولاً در هنگام مونتاژ نازل به پوسته به اندازهٔ ۲ میلی‌متر یا بیشتر براساس سایز فلنج ارتفاع نازل را تا خط آکس بیشتر می‌گیرند. در هنگام مونتاژ نازل به پوسته ابتدا باید از ترازبودن مخزن اطمینان حاصل شود، بعد توسط یک شمشه و یک تراز از ترازبودن و همچنین توسط یک ریسمان یا به‌عبارتی شاقول خط اکس فلنج نازل را در امتداد خط آکس مخزن کنترل کرد. سپس ارتفاع از پیشانی فلنج را از دو طرف فلنج تا پوسته اندازه گرفت و از مساوی‌بودن آن اطمینان حاصل نمود. سپس مطابق با WPS آن را جوش داد. این نکته در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. گفتنی است پروجکشن هر نازلی با نازل دیگر می‌تواند از لحاظ موقعیت متفاوت باشد و باید به نقشه مراجعه شود. در ضمن تستی که در هنگام جوش نازل به پوسته بایستی انجام شود فراصوت[10] می‌باشد که معمولاً خود کارخانه انجام نمی‌دهد، بلکه پیمانکاری از بیرون متولی کار شده و تست را انجام می‌دهند.

۶-۱۸. پایهٔ مخزن[11]

پایهٔ مخزن معمولاً براساس حجم و وزن و تنش‌هایی که از مخزن به آن اعمال می‌شود، طراحی می‌شود (شکل ۱۱). در ضمن تمام جوش‌هایی که در پایهٔ مخزن به‌کار می‌رود جوش گوشه است و تستی که باید روی آن انجام گیرد تست PT و VT است. به‌عبارتی هر کجا که جوش گوشه در مخزن داشته باشیم، باید تست PT روی آن انجام شود.

۶-۱۹. عدسی[12]

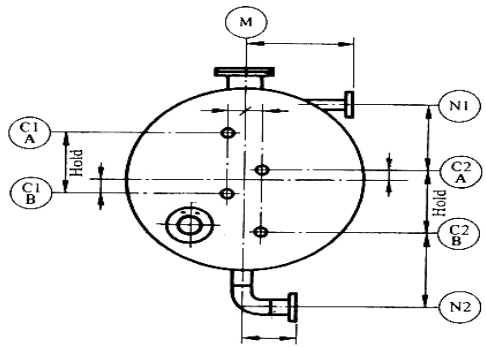
عدسی‌ها به انواع مختلفی از جمله بیضوی، کروی، تخت و مخروطی تقسیم می‌شوند. پارامترهایی که باید در اندازه‌گیری یک عدسی رعایت شوند عبارت‌اند از:

۱. عمق یا ارتفاع عدسی و اندازهٔ قسمت صاف یا راست آن

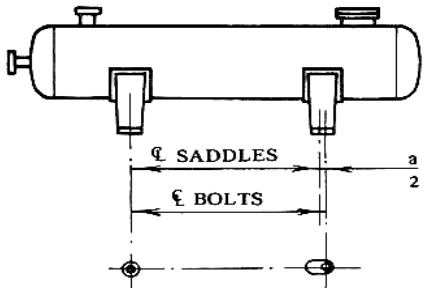
۲. هر عدسی شامل چهار ناحیه یا به‌عبارتی چهار شعاع است که باید کنترل شوند. ضخامت این چهار ناحیه باید توسط ضخامت‌سنج اندازه‌گیری شود و نباید این ضخامت‌ها از ضخامت ورق پوسته کمتر باشد. برای کنترل صحیح عدسی‌ها معمولاً از یک شابلون، که در کارخانه ساخته شده است، استفاده می‌شود.

۷. جمع‌بندی

نتایج حاصل از تحلیل مخزن تحت فشار نشان می‌دهد که نوع تحلیل، قیدگذاری، مش‌بندی و نوع المان در سرعت و دقت محاسبات بسیار مؤثر است و می‌توان به‌جای تحلیل متقارن و استفاده از المان‌های دوبعدی و چهاروجهی از نوع دیگری از تحلیل و المان‌های سه‌بعدی یا دوبعدی مثلثی استفاده کرد. برای بیشترشدن دقت و صرفه‌جویی در زمان می‌توان پس از حصول از نتایج اولیه، مش‌بندی را در نقاط ماکزیمم کانتورهای به‌دست آمده پالایش و مسئله را دوباره حل کرد تا جواب‌های دقیق‌تری به‌دست آید.



شکل ۱۰. مونتاژ نازل به پوسته



شکل ۱۱. پایه‌های مخزن

۸. مآخذ

[1] Megyesy, E. F., *Pressure Vessel Handbook*, 12th edition, 2001.

[2] Frietas, O. “Maintenance and Repair of Glass-Lined Equipment.” *Chemical Engineering*, 1 Jul 2007.

[3] NASA Tech Briefs, "Making a Metal-Lined Composite Overwrapped Pressure Vessel", 1 Mar 2005.

[4] Strang, G., *Linear Algebra and Its Applications*, 4th ed., Brooks Cole, 2005.

پی‌نوشت

1. LPG
2. maximum allowable working pressure (MAWP)
3. heat number
4. welding procedure specification (WPS)
5. penetrate test (PT)
6. taper
7. opening
8. manhole
9. projection
10. ultrasonic (UT)
11. saddle
12. head