

# بازرسی فنی از مخازن هوای فشرده در معادن

## دکتر کاظم اورعی<sup>۱</sup> - آرش گودرزی<sup>۲</sup> - بهاره عاصی<sup>۳</sup>

### چکیده

هوای فشرده علیرغم بازدهی پایین و هزینه بالا، یکی از مرسومترین انرژی‌های مصرفی در معادن است. هوای فشرده برای مصارف گوناگون و به ویژه حفاری و به کار انداختن چکش‌ها و چالزن‌ها در معادن تولید می‌شود. گرچه تولید انرژی هوای فشرده نسبت به انرژی الکتریکی گران‌تر است ولی به لحاظ مسائل فنی و به خصوص ایمنی بیشتر در استفاده از آن، هنوز به عنوان یکی از مهمترین منابع تولید انرژی در معادن شناخته می‌شود. ولی همین انرژی به ظاهر ایمن، می‌تواند عامل بروز خطرات بزرگی در معدن و تاسیسات معدنی باشد. مخازن ذخیره‌سازی هوای فشرده در معادن مانند هر ظرف تحت فشار دیگری نیازمند بازرسی‌های فنی ادواری برای اطمینان از صحت عملکرد آن و متعلقات حفاظتی مربوطه می‌باشد. در مقاله نحوه بازرسی، کنترل و محاسبات مخازن تحت فشار بر اساس بخش ۱ استاندارد ASME 8 (پیشروترین استاندارد ظروف تحت فشار در جهان) با استفاده از اطلاعات حاصل از آزمون‌های غیرمخرب توضیح داده می‌شود. از نتایج حاصل از این مقاله می‌توان در بازرسی‌های فنی از این گونه مخازن برای پیش‌گیری از حوادث استفاده نمود.

کلید واژه‌ها : ظروف تحت فشار، ایمنی، مخازن هوای فشرده، استاندارد ASME

### ۱- مقدمه

انتقال قدرت از مکان تولید به محل مصرف آن هم به شکل کم هزینه و با دقت بالا نیاز روزمره بسیاری از صنایع می‌باشد. به همین منظور، استفاده از سیال تحت فشار در انتقال و کنترل قدرت در تمام شاخه‌های صنعت از جمله استخراج معادن روبه افزایش است.

استفاده از قدرت سیال به دوشاخه کلی هیدرولیک و پنوماتیک تقسیم می‌شود. از پنوماتیک در مواردی که نیروهای نسبتاً پایین و سرعت‌های حرکتی بالا مورد نیاز باشد، استفاده می‌شود. در حالی که از سیستم‌های هیدرولیک معمولاً در مواردی که قدرت بالا و سرعت‌های کنترل شده دقیق مورد نظر باشد، استفاده می‌شود.

هوای فشرده علیرغم بازده کم و هزینه نسبتاً بالا در تولید و انتقال به دلایل گوناگون از جمله ایمنی نسبتاً بالا در هنگام تولید، انتقال و مصرف، یکی از متداولترین انرژی‌های مصرفی در معدن است. گرچه استفاده از نیروی الکتریسیته در معادن در بسیاری موارد جایگزین نیروی هوای فشرده گردیده است اما استفاده از هوای فشرده به عنوان نیروی محرکه در چکش‌ها و تجهیزات چالزنی هنوز بدون رقیب و منحصر به فرد باقی مانده است [۱]. بعلاوه، هوای فشرده به عنوان سیال حفاری در فلاشینگ چال‌ها و همچنین در پر کردن پنوماتیکی کارگاه‌های استخراج شده در روش‌های معدنکاری توام با آکندن کاربرد زیادی دارد [۲].

در کمپرسورخانه‌های تولید هوای فشرده، نظیر هر تاسیسات دیگری، مجموعه‌ای از ماشین‌آلات، مخازن، لوله، شیلنگ، کابل، تسمه و ... وجود دارد که در معرض فرسودگی و خرابی ناشی از آن قرار دارند. البته این امکان وجود دارد که خرابی ناشی از فرسودگی، قبل از آسیب رساندن جدی به اشخاص یا اموال آشکار شود. ولی در هر حال، بروز شکست در بسیاری از این اقلام، ممکن است به صورت ناگهانی رخ دهد و خسارات جبران ناپذیری را چه از نظر جانی و چه از نظر مالی مترتب کارگاه نماید. مخازن هوای فشرده در این بین یکی از وسایل بالقوه بسیار خطرناک می‌باشند که در معرض فرسودگی و بتبع آن خرابی و شکست قرار دارند [۳]. تدوین دستورالعمل‌های تعمیر و نگهداری، اجرای بازرسی‌های مدون و ممیزی‌های سالانه توسط مراجع ذیصلاح قانونی برای اطمینان از صحت عملکرد چنین مخازنی می‌تواند تا حد زیادی از میزان ریسک انفجار این مخازن که سلامت افراد را تهدید می‌کند، بکاهد.

۱- استاد دانشگاه استرلینگ انگلستان، آدرس الکترونیکی: sko1@stir.ac.uk

۲- کارشناس ارشد مهندسی معدن، کارشناس حفاظت کار (ایمنی معادن) مرکز تحقیقات، تعلیمات حفاظت و بهداشت کار، وزارت کار و امور اجتماعی، آدرس الکترونیکی: arash\_good@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد مهندسی معدن، شرکت مهندسین مشاور کاوشگران، آدرس الکترونیکی: basi56@yahoo.com

## ۲- کمپرسورها

کمپرسورها ماشین‌های تراکم هوا می‌باشند که انرژی مکانیکی که به آنها داده می‌شود را به صورت انرژی پتانسیل هوای فشرده در می‌آورند. کمپرسورها از نظر فرایند تراکم‌سازی به دو دسته کمپرسورهای جابجایی مثبت و کمپرسورهای دینامیکی تقسیم می‌شوند. در کمپرسورهای جابجایی مثبت، فشار هوا با کاهش حجم افزایش می‌یابد. کمپرسورهای پیستونی و اسکرو از متداول‌ترین نوع این کمپرسورها می‌باشند. اما کمپرسورهای سانتریفیوژ با دادن شتاب به ذرات هوا و سپس برخورد این ذرات با Diffuser، انرژی جنبشی را به فشار تبدیل می‌کنند. کمپرسورهای دینامیکی در مواقعی که احتیاج به هوای فشرده با ظرفیت‌های بالا و فشارهای متوسط است بکار گرفته می‌شوند.

کمپرسورهای نوع اسکرو از متداول‌ترین نوع کمپرسورهای هوا می‌باشند. در این نوع کمپرسور، هوا در یک ماریچ حلزونی فشرده می‌شود. از آنجایی که در کمپرسور اسکرو روغنی، هوا با روغن در واحد هواساز مخلوط و فشرده می‌شود، روغن باید در قسمت Oil Separator جدا شده و پس از خنک شدن و فیلتراسیون، مجدداً به چرخه تراکم باز گردد.

هوای خروجی از Oil Separator در After Cooler توسط آب یا هوا خنک می‌شود. هوای خروجی از هواساز کمپرسور به صورت هوای کاملاً اشباع با درجه حرارت بالا می‌باشد. در قسمت کولر، دمای هوا تا ۱۰ درجه سانتیگراد بالاتر از هوای محیط خنک می‌شود ولی این هوا هنوز قابلیت استفاده در صنعت را ندارد و باید با استفاده از خشک‌کن‌های تبریدی یا جذبی، میزان آب موجود در آن کاهش داده شود. آب اصلی‌ترین و مهمترین عامل آسیب‌های جدی به دستگاه‌های توزیع کننده و مصرف‌کننده هوا می‌باشد.

## ۳- مخازن هوای فشرده

هوای فشرده با هر نوع کمپرسوری که تولید شود باید برای جلوگیری از شوک‌های لحظه‌ای در زمان مصرف و متعادل نمودن فشار در خط انتقال، در مخازن هوای فشرده (Air Receiver) ذخیره شود. در کمپرسورهای سیار، مخزن بر روی شاسی دستگاه نصب می‌شود اما در کمپرسورهای ثابت و پر حجم، این مخزن در محلی جدا و معمولاً بعد از دستگاه سردکننده انتهایی قرار دارد.



شکل ۱: مخزن هوای فشرده ایستاده

اندازه مخزن جهت داشتن یک سیستم Load/Unload مناسب برای کمپرسور بسیار حایز اهمیت است. در صورتی که مخزن بزرگ باشد کمپرسور در حالت Unload می‌ماند که باعث هدر رفتن هد (Blow off) یا خاموش شدن کمپرسور می‌شود. از طرف دیگر کوچک بودن مخزن در هنگام قرار گرفتن همه مصرف‌کنندگان در مدار، سبب وارد آمدن فشار به کمپرسور و صدمه دیدن مصرف‌کننده‌ها در اثر افت فشار می‌شود که اثرات مخرب زیادی برای کمپرسور به همراه دارد [۴].

هر چند هوای فشرده شده قبل از خروج از دستگاه توسط سیستم‌های خنک‌کننده و خشک‌کن، سرد و خشک می‌شود ولی هنوز دارای رطوبت است و به قدر لازم خنک نگردیده است. لذا قبل از فرستاده شدن هوا در شبکه، باید در مخزنی ذخیره شود تا هم به آن فرصت سرد شدن داده شود و هم آب و روغن جمع شده در کف مخزن تحت فشار، بوسیله شیرهای خودکار یا دستی که در کف مخزن نصب شده است، تخلیه گردد.

هوا به همراه عوامل خورنده‌ای از قبیل: رطوبت، گاز  $SO_2$  و سایر گازهای مخرب وارد مخزن می‌شود و سطوح داخلی آن را تحت تاثیر خوردگی قرار می‌دهد. سرعت و فشار بالای هوا نیز می‌تواند مشکلاتی در ارتباط با سایش سطوح داخلی بر اثر برخورد شدید ذرات معلق به وجود آورد. علاوه بر عوامل خورنده و

ساینده‌ای که مخزن هوای فشرده در معرض آن قرار دارد چنین مخازنی به طور معمول باید حداقل فشاری در حدود ۶-۹ bar را تحمل نمایند.

اهمیت و کاربرد وسیع مخازن تحت فشار از جمله مخازن هوای فشرده در صنایع و شدت حوادث ناشی از این وسایل سبب شد استانداردهای مختلف در طراحی مخازن تحت فشار در کشورهای مختلف وضع شود تا طراحی و ساخت چنین مخازنی طبق قوانین کنترل شده‌ای انجام شود تا به‌مراه بازرسی‌های ادواری از چنین تجهیزاتی، بستر مناسبی برای پیشگیری از حوادث محتمل فراهم شود. استاندارد انجمن مهندسين مکانیک آمریکا (ASME) یکی از پیشرفته‌ترین استانداردها در این زمینه می‌باشد.

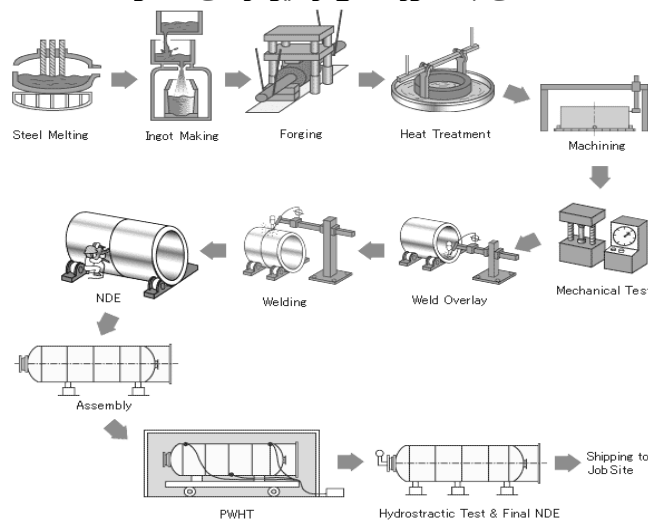
مخازن تحت فشار، ظروف بدون نشستی هستند که بسته به کاربردشان، موادی به صورت مایع یا گاز با فشار و درجه حرارت مختلف در آنها وارد می‌شود و می‌توانند به شکل‌های مختلفی نظیر استوانه‌ای، کروی، بیضوی یا ترکیبی از آنها باشند. امروزه در صنایع گوناگون و بویژه در استخراج معادن بطور وسیعی از مخازن و تجهیزات تحت فشار پنوماتیک استفاده می‌شود.

پوسته‌های استوانه‌ای در ساخت چنین مخازنی از رول کردن ورق‌های استاندارد، به عرض‌های معلوم و در ضخامت‌های مختلف ساخته می‌شوند. در بسیاری از موارد نمی‌توان با رول کردن تنها یک ورق مخزن را ساخت. در چنین مواردی از دو یا چند کورس ورق باید استفاده شود. روال ساخت مخازن تحت فشار در شکل ۲ که شامل ذوب، شمش، آهن‌گری، عملیات حرارتی، ماشین‌کاری، آزمایش خواص مکانیکی ورق، جوشکاری، اجرای تست‌های غیرمخرب، مونتاژ قطعات و در نهایت اجرای تست هیدرواستاتیک و آزمون‌های غیرمخرب نهایی می‌باشد، نمایش داده شده است.

مخازن تحت فشار مرسوم در صنعت معمولاً به شکل استوانه‌ای یا کروی ساخته می‌شوند. مخازن هوای فشرده اغلب از نوع استوانه‌ای می‌باشند. مخازن استوانه‌ای تحت فشار به صورت افقی و عمودی وجود دارند. یک مخزن تحت فشار معمولاً از اجزای ذیل تشکیل می‌شود [۵]:

- پوسته استوانه‌ای که از رول کردن ورق ساخته می‌شود.
- کله‌گی‌ها (عدسی‌های انتهایی) که با فرم دادن ورق ساخته می‌شوند.
- تکیه‌گاه مخازن که در مخازن افقی به نام Saddle و در مخازن عمودی به نام‌های Leg, Skirt و Lug وجود دارند.
- لوله‌ها و فلنج‌ها؛

جوشکاری مهمترین روش اتصال قطعات مخازن تحت فشار است که با در هم آمیختگی یا ترکیب موضعی فلز در محل اتصال بوسیله گرمایش فلز تا دمای ذوب صورت می‌گیرد. همه اتصالات اصلی محوری و محیطی در استاندارد ASME باید به طور کامل رادیوگرافی شوند به گونه‌ای که درجه امتحان اتصال یا همان بازده اتصال (E) روی حداکثر فشار مجاز کاری مخزن اثر مستقیم می‌گذارد (رابطه ۶). به عنوان مثال یک اتصال اصلی روی پوسته استوانه‌ای که به طور کامل رادیوگرافی شده باشد دارای بازده اتصال  $E=1$  است در صورتی که اگر همان اتصال اصلی به طور کامل رادیوگرافی نشود  $E=0.7$  است.



شکل ۲: مراحل ساخت مخازن تحت فشار

#### ۴- تنش در مخازن تحت فشار

پوسته‌ها، عناصری ساختمانی هستند که از نظر هندسی به شکل سطوحی با انحناء یک یا دو جانبه می‌باشند. ضخامت پوسته‌های نازک نسبت به ابعاد دیگرشان بسیار کم است. در مهندسی، پوسته‌ها کاربردهای زیادی دارند و مقاومت آنها از نظر مکانیکی بسیار زیاد است و در ساخت انواع مخازن تحت فشار بکار می‌روند [۶].

انتقال نیروها به شکل فضایی از ویژگی‌های مکانیکی پوسته‌ها است. به عبارت دیگر، تحت اثر نیروهای وارده، در پوسته‌ها، تنش‌های دو بعدی ایجاد می‌گردد که میزان آن در پوسته‌های استوانه‌ای به قرار ذیل است:

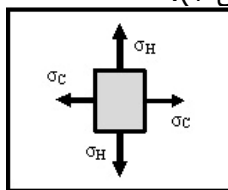
#### ۴-۱- تنش در پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک، تحت اثر فشار داخلی

هر جسم در مقابل اعمال نیروهای خارجی از خود مقاومت نشان می‌دهد و تنش به صورت نیروهای داخلی به ازای واحد سطح ماده مقاوم در مقابل نیروهای خارجی تعریف می‌شود. استوانه تحت فشاری که ضخامت پوسته آن از نصف شعاع داخلی تجاوز نکند، استوانه جدار نازک نامیده می‌شود. اکثر مخازن هوای فشار در شبکه‌های تولید و توزیع هوای فشرده از نوع مخازن جدار نازک هستند.

فشار داخلی یک پوسته استوانه‌ای که از دو انتها مسدود است سعی در ترکاندن آن در دو راستای متمایز دارد. فشار کلی وارد به پوسته سعی در ایجاد گسیختگی در راستای طول و فشار وارد بر کله‌گی‌ها، سعی در ایجاد ترک بر روی پوسته در جهت دور محیط آن دارد.

این تنش‌ها با توجه به نحوه مقاومت استوانه در برابر فشار اعمالی به ترتیب تنش‌های طولی (غشایی، Hoop stress،  $\sigma_H$ ) و عرضی (محیطی، Circumference stress،  $\sigma_C$ ) نامیده می‌شوند و هر دو از نوع تنش‌های کششی می‌باشند.

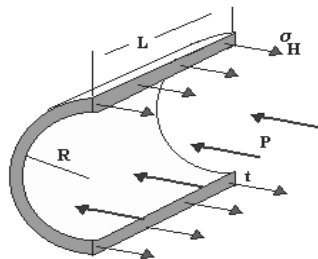
برای آنالیز تنش در چنین ظرفی، محورهای مختصات منطبق با خطوط تقارن ظرف در نظر گرفته می‌شوند. با این فرض، دو تنش اصلی ( $\sigma_H, \sigma_C$ )، یکی در راستای طول و دیگری در راستای محیط بر ظرف اعمال شده و تنش برشی وجود ندارد (شکل ۳).



شکل ۳: تنش‌های اصلی وارده بر جداره ظرف تحت فشار استوانه‌ای با جدار نازک

#### محاسبه تنش غشایی ( $\sigma_H$ )

پوسته‌ای استوانه‌ای به ضخامت  $t$  و با شعاع متوسط  $R$  تحت اثر فشار نسبی داخلی  $P$  فرض می‌شود. از آنجایی که شکل مسئله حالت متقارن دارد، نیمی از جسم آزاد برای تعیین تنش غشایی در نظر گرفته می‌شود. (شکل ۴)



شکل ۴: جسم آزاد نیمی از پوسته استوانه‌ای تحت تاثیر فشار داخلی  $P$

معادله تعادل استاتیکی برای تنش غشایی و نیروی فشار داخلی در پوسته استوانه‌ای به شکل رابطه ۱ نوشته می‌شود [۷]:

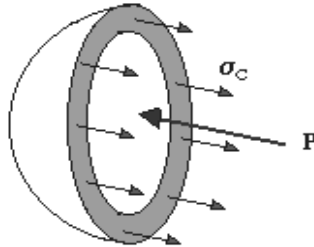
$$2\sigma_H \cdot t \cdot L = P \cdot 2R \cdot L \quad (1)$$

از رابطه ۱ مقدار  $\sigma_H$  تعیین می‌شود:

$$\sigma_H = \frac{PR}{t} \quad (۲)$$

### محاسبه تنش محیطی ( $\sigma_c$ )

برای تعیین تنش محیطی در کله‌گی مخزن (پوسته کروی)، برشی از مقطع عرضی مخزن فرض می‌شود (شکل ۵). از آنجایی که جسم آزاد در تعادل استاتیکی است، لذا میزان نیروی ناشی از تنش محیطی با مقدار نیروی ناشی از فشار داخلی برابر است. پس [۷]:



شکل ۵: جسم آزاد کله‌گی مخزن تحت تاثیر فشار داخلی P

$$\sigma_c \cdot t \cdot 2\pi R = P \cdot \pi \cdot R^2 \quad (۳)$$

لذا تنش محیطی ( $\sigma_c$ ) در پوسته کروی با جدار نازک (کله‌گی مخزن) از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_c = \frac{PR}{2t} \quad (۴)$$

از مقایسه دو رابطه ۲ و ۴، برای تنش حلقوی و تنش محیطی در ظرف استوانه‌ای جدار نازک مشخص می‌شود که میزان تنش محیطی، معادل نصف مقدار تنش حلقوی است. لذا تنشی که در بدنه مخازن تحت فشار استوانه‌ای با جدار نازک بر اثر فشار داخلی بوجود می‌آید دو برابر تنش در کله‌گی‌های سر و ته مخزن است [۷].

میزان تنش چه غشایی و چه محیطی در مخازن تحت فشار با طول ظرف وابستگی ندارد ولی با شعاع و فشار داخلی رابطه مستقیم دارد. یعنی در شرایط مشابه، هر چه میزان شعاع ظرف بیشتر باشد، تنش بیشتری بر جداره آن اعمال خواهد شد.

ضوابط موجود در اکثر آیین‌نامه‌ها از جمله ASME، بر اساس اصول مقاومت مصالح مقرر می‌دارد که حداکثر فشار مجازی کاری برای پوسته یک مخزن تحت فشار استوانه‌ای از معادله کلاسیک ذیل محاسبه - شود [۷]:

$$MAWP = \frac{TS \times t \times E}{SF \times R} \quad (۵)$$

در رابطه فوق: MAWP (Maximum allowable working pressure) حداکثر فشار مجاز کاری بر حسب psi، TS مقاومت کششی ورق پوسته بر حسب psi، t کمترین ضخامت ورق بر حسب اینچ، E بازده اتصال، SF ضریب اطمینان، R شعاع داخلی پوسته بر حسب اینچ است. حداکثر فشار مجاز کاری در قسمت کله‌گی‌های کروی مخزن بر اساس روابط ۲ و ۴، نصف مقدار محاسبه شده برای بدنه آن است. نسبت مقاومت کششی ورق پوسته به ضریب اطمینان، حداکثر تنش مجاز ماده در دمای طراحی است که همواره باید از بیشترین مقدار تنش در مخزن تحت فشار بزرگتر باشد. حداکثر تنش مجاز کششی مواد در جدول‌های خواص مواد آمده است.

ضریب اطمینان برای مخازن تحت فشاری که بر اساس اصول استاندارد ASME SECTION VIII طراحی و ساخته شده باشند ۳/۵ است. شایان ذکر است مهم‌ترین بهبود در آخرین ویرایش استاندارد ASME، کاهش ضریب اطمینان از ۴ به ۳/۵ می‌باشد. این کاهش ضریب اطمینان در طراحی ظروف تحت

فشار برای اولین بار در ۵۰ سال گذشته رخ داده است که دلیل آن بهبود خواص مواد، روش‌های طراحی و رویه‌های بازرسی است [۸].

کم شدن ضخامت و نازک شدن در مخازنی که در معرض خوردگی، فرسایش یا سایش مکانیکی هستند امری طبیعی است که باید برای طول زمان بهره‌برداری پیش‌بینی شود. حداقل ضخامت پوسته‌ها و کله‌گی‌های مخازن هوای فشرده بعد از شکل دادن آنها بر اساس استاندارد ASME، در هیچ شرایطی نباید از سه سی و دوم اینچ (۲/۴ میلیمتر) کمتر شود [۸].

### ۵- بازرسی فنی برای مخازن هوای فشرده

ممکن است انواع نقص‌ها در ماده یا قطعه مورد استفاده به اندازه‌های مختلف در طول زمان بهره‌برداری بوجود آید. ماهیت و اندازه نقص می‌تواند بر کارکرد ایمن آتی وسیله مورد استفاده تاثیر زیادی داشته باشد. بنابراین برای آشکارسازی نقص‌ها و تعیین آهنگ رشد آنها در حین عمر کاری هر وسیله، باید روش‌های مدونی وجود داشته باشد.

با استفاده از اصول اولیه فیزیکی، شماری از سیستم‌های بازرسی غیر چشمی ساخته شده‌اند که بدون تغییر یا تخریب قطعات و مجموعه‌های مورد آزمایش، دانسته‌های مربوط به کیفیت ماده را به دست می‌دهند. چنین آزمون‌هایی، آزمایشات غیرمخرب (Non destructive test) نامیده می‌شوند [۹].

### ۵-۱- آزمون اولتراسونیک (مافوق صوت)

استفاده از امواج مافوق صوت (اصواتی با فرکانس بیش از گستره شنوایی انسان) و ارسال انرژی صوتی پرفرکانس به داخل محیط اندازه‌گیری، یکی از روش‌های موثر در بازرسی از مخازن هوای فشرده در طول زمان بهره‌برداری است که برای تعیین ضخامت باقی مانده از ورق پوسته به منظور تعیین حداکثر فشار مجاز کاری آنها بکار می‌رود (رابطه ۵).

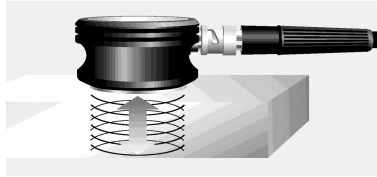
بررسی‌های اولتراسونیک بر روی طیف وسیعی از مواد مختلف نظیر: مواد ریخته‌گری شده، آهنگری شده، جوشکاری شده می‌توانند انجام شوند و اطلاعات زیادی از قبیل: مقدار ضخامت، محل ناپوستگی‌های موجود (ترک، درزه، شکاف) و ویژگی‌های آکوستیک جسم مورد بررسی در آزمایشات اولتراسونیک بدست می‌آیند.

انتشار امواج مکانیکی در یک محیط کشسان و همگن با سرعت ثابت انجام می‌شود و مقدار سرعت به ویژگی‌های فیزیکی محیط مربوط است و به شکل موج و دامنه آن بستگی ندارد. مثلاً سرعت متوسط صوت در فولاد تقریباً ۵۹۲۰ متر بر ثانیه است.

برای انتقال امواج مکانیکی مثل صوت، محیط مادی لازم است. تمام محیط‌های مادی مانند فولاد، دارای خواص کشسانی هستند و لذا می‌توانند امواج مکانیکی را انتقال دهند. خاصیت کشسانی محیط باعث می‌شود که در هر جزئی از محیط که از وضعیت تعادلش جابجا شود، نیروهای بازگرداننده ایجاد گردد. اینرسی تعیین می‌کند که واکنش این جز جابجا شده در برابر نیروهای بازگرداننده چگونه باشد. این دو عامل یعنی خاصیت اینرسی و کشسانی محیط، سرعت موج را تعیین می‌کنند.

رفتار امواج مافوق صوت مشابه صوت است و می‌تواند منعکس، منکسر یا متمرکز شوند. پدیده‌های انعکاس و انکسار در برخورد امواج به سطح ما بین دو محیط با ویژگی‌های آکوستیکی متفاوت، رخ می‌دهد. انعکاس امواج مافوق صوت از سطح دیواره پشت ورق، می‌تواند در تعیین ضخامت آن استفاده شود. از روی زمان گذر صدا از یک محیط، می‌توان مسافت عبور صدا را از آن محیط بدست آورد.

در کاربردهای صنعتی برای تولید امواج ماوراء صوت از ترانسدیوسر استفاده می‌شود (شکل ۶). ترانسدیوسر، یک قطعه پیزوالکتریک است که از آن برای تبدیل انرژی الکتریکی تولید شده از باتری به ارتعاشات مکانیکی (صدا) استفاده می‌شود. از ترانسدیوسر هم برای ارسال و هم دریافت انرژی صوتی استفاده می‌شود. روش‌های گوناگونی برای اجرای آزمون ضخامت‌سنجی اولتراسونیک وجود دارد. به طور معمول از تکنیک پالس - اکو که خاص مواردی است که فقط یک سطح از ماده مورد آزمایش در دسترس است در بازرسی فنی و ضخامت‌سنجی مخازن هوای فشرده استفاده می‌شود [۹].



شکل ۶: استفاده از ترانسدیوسر برای تعیین ضخامت با محاسبه زمان رفت و برگشت صوت در ورق

اطلاعات مربوط به موج منعکسه وارد دستگاه ضخامت‌سنج شده و بعد از آنالیز، میزان ضخامت ورق مورد آزمایش بر روی صفحه دستگاه گزارش می‌شود (شکل ۷).



شکل ۷: دستگاه پرتابل ضخامت‌سنج دیجیتال (D-meters) برای سنجش ضخامت پوسته مخازن تحت فشار

## ۲-۵- آزمون هیدرواستاتیک

تست هیدرواستاتیک یکی از آزمون‌های مرسوم در بازرسی از مخازن تحت فشار است که هم در کارخانه سازنده مخزن و هم در زمان بهره‌برداری در دوره‌های زمانی مشخص شده در آیین‌نامه‌های حفاظتی، بعد از تست ضخامت‌سنجی باید انجام شود.

بستن همه اتصالات مخزن با فلنج کور (به غیر از ورودی آب و مانومتر)، پر کردن مخزن از آب، فراهم کردن پمپی که قابلیت بالا بردن فشار آب را در مخزن تا  $1/5$  برابر فشار کاری داشته باشد، همگی از آماده‌سازی‌های لازم قبل از تست می‌باشند.

از آنجایی که آب سیالی تقریباً تراکم‌ناپذیر است، در صورت وجود عیبی در بدنه ظرف، خطری در زمان آزمایش وجود نخواهد داشت. در صورتی که این آزمایش با سیال تراکم‌پذیری مثل هوا انجام شود، از آنجایی که گازها می‌توانند تا چند صد بار حجم اولیه متراکم شوند در صورت وجود نقص در بدنه یا جوش‌ها، خطر بروز انفجار بسیار مهیبی وجود خواهد داشت. لذا باید از قبل از افزایش فشار، از هواگیری کامل مخزن اطمینان یافت [۱۰].

بعد از انجام آماده‌سازی‌های لازم، فشار آب توسط پمپ تا  $1/5$  برابر حداکثر فشار کاری افزایش می‌یابد. مخزن، فشار اعمالی را باید حداقل به مدت ۳۰ دقیقه بدون هیچ اثری از تغییر شکل و یا نشست با فشار ثابت تحمل کند.

فشار همه جانبه‌ای که در حین آزمایش هیدرواستاتیک به پوسته، کله‌گی‌ها و جوش‌های ظروف تحت فشار اعمال می‌شود یکی از بهترین روش‌های تشخیصی برای اطمینان از صحت عملکرد ظروف تحت فشار می‌باشد.

## مطالعه موردی

نتایج به دست آمده از ۵ مورد ضخامت‌سنجی ادواری مخزن هوای فشرده‌ای به حجم ۱۰۰۰ lit و قطر cm ۱۲۰ که از ورق SA516GR70 با مقاومت کششی ۷۰,۰۰۰ psi با بازده جوشکاری ۰/۷ ساخته شده است در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: حداکثر فشار مجاز کاری برای مخزنی به شعاع cm ۶۰ که در معرض ساییش و خوردگی قرار دارد

حداکثر فشار مجاز کاری مخزن		شعاع مخزن		مقاومت کششی	بازده جوش	ضخامت ورق		جنس ورق
						inch	mm	
bar	psi	ft	cm	psi×1000				
۱۳/۱	۱۸۷	۲۳/۶	۶۰	۷۰	۰/۷	۰/۳۱	۸	SA_516 (Grade:70)
۱۱/۵	۱۶۳	۲۳/۶	۶۰	۷۰	۰/۷	۰/۲۸	۷	SA_516 (Grade:70)
۹/۸	۱۴۰	۲۳/۶	۶۰	۷۰	۰/۷	۰/۲۴	۶	SA_516 (Grade:70)
۸/۲	۱۱۷	۲۳/۶	۶۰	۷۰	۰/۷	۰/۲۰	۵	SA_516 (Grade:70)
۶/۶	۹۳	۲۳/۶	۶۰	۷۰	۰/۷	۰/۱۶	۴	SA_516 (Grade:70)

گزارشات ادواری بازرسی فنی بیانگر کاهش ضخامتی از ۸ mm به ۴ mm برای بدنه مخزن تحت فشار است. یعنی به ازای هر دوره، ۱ mm از ضخامت ورق کاسته شده است. با توجه به اطلاعات پایه و لحاظ ضریب اطمینانی معادل ۲/۵ و با استفاده از رابطه ۵، حداکثر فشار مجاز کاری مخزن (MAWP) در ستون آخر جدول ۱ آورده شده است.

محاسبات بیانگر این حقیقت است که با فرض فشار کاری ۷ bar برای مخزن، وقتی که ضخامت بدنه آن از ۸ mm به ۴ mm برسد حداکثر فشار کاری مجاز آن از ۱۳/۱ bar برای ضخامت ۸ mm به ۶/۶ bar تنزل می‌کند. چنین مخزنی دیگر ایمنی لازم برای کار کردن در فشار کاری ۷ bar را ندارد و با باید در اسرع وقت با مخزن جدیدی جایگزین شود.

## ۶- بحث و نتیجه‌گیری

تاسیسات موجود در معدن باید مطابق با استاندارد طراحی اولیه نگهداری شوند و به شکل ادواری مورد آزمایش و بررسی قرار گیرند تا هر گونه خرابی وسایل قبل از وقوع حادثه بر طرف شود. هوای خروجی از کمپرسورها علی‌رغم تصیفه، فیلتراسیون و خشک کردن، باز دارای عوامل خورنده و ساینده‌ای است که مدار هوای فشرده و به خصوص مخزن آن را به مرور زمان نازک می‌کند. این نازکی جداره باید با ضخامت‌سنجی با روش‌های مافوق صوت، مشخص و سپس با توجه به شعاع مخزن، مقاومت کششی، بازده جوشکاری، حداکثر فشار مجاز کاری مخزن از سوی مراجع ذیصلاح تعیین و تایید شود. عدم رعایت نکات فنی و بازرسی‌های لازم از مخازن هوای فشرده می‌تواند منجر به بروز حوادث ناگواری شود که صدمات جبران ناپذیری را در پی خواهد داشت (شکل‌های شماره ۸ و ۹).



شکل ۸: حادثه انفجار مخزن هوای فشرده که منجر به کشته شدن دو نفر در سال ۱۳۸۴ در ساوه شد.





شکل ۹: حادثه انفجار مخزن تحت فشار که منجر به کشته شدن دو نفر در سال ۱۳۸۷ در زنجان شد.

## ۷- منابع

- [۱] - مدنی، حسن. ۱۳۸۵. خدمات فنی در معادن. مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر. تهران. صفحات: ۲۲۳-۳۷۵.
- [۲] - اورعی، سیدکاظم. ۱۳۸۳. روش‌های استخراج زیرزمینی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. تهران. صفحات: ۲۰۰-۱۹۱.
- [۲] - والث، یان. ۱۳۸۱. سیستم‌های ایمنی. مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت. تهران. صفحات: ۱۴۳-۱۳۷.
- [۴] - کاویانی، احمد. ۱۳۸۶. کمپرسورها. دانشگاه صنعت پژوه. تهران. صفحات: ۲۱۶-۲۱۰.
- [۵] - زارع بغدادی، حمید. ۱۳۸۳. طراحی مخازن تحت فشار. موسسه فرهنگی انتشاراتی آیه. تهران. صفحات: ۶۷-۱.
- [۶] - فرشاد، مهدی. ۱۳۶۸. مقاومت مصالح. انتشارات دیبا. صفحات: ۱۴۱۴-۱۴۰۸.
- [۷] - اسپرینگ، هری و کوهن، آنتونی. ۱۳۸۶. راهنمای کاربران دیگ بخار و مخازن تحت فشار. انتشارات ارکان دانش، صفحات: ۱۴۰-۱۱۵.
- [۸] - فر، جیمز و جواد، مان. ۱۳۸۴. راهنمای استفاده از ASME section VIII برای طراحی مخازن تحت فشار. انتشارات دانش و فن، تهران، صفحات: ۱۳۴-۱.
- [۹] - بری، هال و ورنون، جان. ۱۳۸۵. آزمون‌های غیرمخرب. انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف. تهران، صفحات: ۱۰۴-۶۷.

[10] -Ellenberger, P & Chuse, R. 2004. Pressure vessels. McGraw-Hill, U.S.A. P:141-165.

[11] -Antaki, G. 2005. Fitness for service and integrity of piping, vessels and tank. McGraw-Hill, U.S.A.

[12] -ASME boiler and pressure vessel committee. 2006. ASME boiler and pressure vessels code. The American society of mechanical engineers.

# Technical inspection from air pressure vessels in mines

Prof. Kazem Oraee<sup>1</sup>, Arash Goodarzi<sup>2</sup>, Bahareh Asi<sup>3</sup>

1- Faculty of Stirling University, UK, E-mail: sko1@stir.ac.uk

2- Msc Graduate, Center of research and training for occupational safety and health, Ministry of labor and social affairs, E-mail: arash\_good@yahoo.com

3- Msc Graduate, Kavoshgaran Consulting engineers, E-mail: basi56@yahoo.com

## **Abstract**

Compressed air is the most common type of energy used in underground mines. Despite its low efficiency and high cost, it is used for various purposes, especially for drilling. This type of energy is still used relatively frequently, mainly due to its safety benefits and technical matters even though it is generated with a premium in relation to electrical power. However, compressed air that looks to be safe, could cause major accidents in mines and during the installation. The air receiver is similar to any pressure vessel and requires periodic technical inspection to ensure the accuracy of the vessel and its safety devices. In this paper authors try to elaborate on different circumstances, control and calculations surrounding pressure vessels whilst inspecting, based on division 1 section VIII ASME standard. The results obtained could be used in all underground mines where compressed air is used as a form of energy.

**Key words:** Pressure vessels, Safety, Air receiver, ASME standard