

مخازن تحت فشار

دکتر مهدی اخلاقی

استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

از آنجائی که در صنایع کشور تولید دیگ های صنعتی از اهمیت خاصی برخوردار است، لذا محاسبه و طراحی فرمی مخازن تحت فشار، که از طریق جوش کاری تولید می شوند، مطابق دستورالعمل استاندارد DIN ارائه شده است.

نخست محاسبه ضخامت قسمت های مختلف شامل قسمت سیلندری و قسمت کلاهک (کلگی) مخزن و همچنین چگونگی گره های جوش مورد بحث قرار گرفته و سپس به کمک نمونه هایی از چگونگی اتصال لوله های انشعابی و فلانژهای مربوطه طراحی فرمی آن تکمیل شده است. همچنین با رعایت جنبه ایمنی، چگونگی کنترل مخازن ساخته شده ارائه گردیده است.

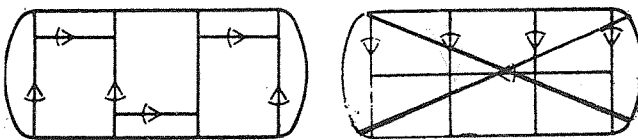
۱ - مقدمه:

با توجه به این که تولید مخازن در صنایع امروزی نقش مهمی را دارا هستند، چگونگی تعیین ضخامت و طراحی فرمی دیگ های صنعتی تحت فشار و همچنین نحوه کنترل آن ها در صنعت از منابع مختلف جمع آوری و به صورت مقاله زیر از نظر تان خواهد گذشت. لازم به توضیح است که با توجه به اهمیت مسائل ایمنی در غالب ممالک صنعتی پیشرفته، تولید مخازن تحت فشار تحت شرایطی خاص و استاندارد صورت می گیرد. به همین دلیل روابط کمکی، ضرائب اطمینان لازم و نوع جوش ها براساس استاندارد^۱ «DIN» آورده شده اند.

Rm	[mm]	شعاع متوسط
S	[mm]	ضخامت
Se	[mm ²]	ضخامت مورد نیاز
S [*]	[-]	ضریب اطمینان
α	[°]	زاویه
B	[-]	ضریب کمکی
σ	[N/mm ²]	تنش
σ مجاز	[N/mm ²]	تنش مجاز
V	[-]	ضریب ضعیفی

۳ - چگونگی تعیین ضخامت و نحوه صحیح طراحی فرمی مخازن

به طور کلی مخازن (دیگ های صنعتی) را از برخورد سر به سر با جوش های جناغی «V» جناغی ریشه جوش خورده «V» و یا «X» تولید می کنند. جوشهای طولی را در طول جابجا (شکل ۱) و جوش های عرضی را از لبه کف به بیرون (شکل ۲)، قرار می دهند.



شکل (۱) جوش های طولی مخازن جابه جا می شوند.

۲ - علائم و واحدها مربوطه

A	[mm ²]	سطح مقطع
a ₁ , a ₂	[mm]	ضخامت جوش
C	[mm]	مقدار اضافی
D _a , D _i	[mm]	قطر خارجی، قطر داخلی
d _a , d _i	[mm]	قطر خارجی، قطر داخلی (لوله)
F ₁ , F _N	[N]	نیرو
(h ₁ , h ₂ , x)	[mm]	طول
K	[N/mm ²]	حد جاری گرمائی
p	[N/mm ²]	فشار
R, r	[mm]	شعاع

بر جزء کوچک فوق الذکر نیروی قائم ΔFN که با نیروی «F» در تعادل است، اثر می کند:

$$\Delta FN \approx p \cdot \Delta u \cdot \Delta l \quad (1)$$

دو انتهای کروی مخزن نیز در اثر فشار «p» پوشش سیلندری در جهت طولی می کشند؛ اما چون نیروی «Fi» دارای مؤلفه شعاعی نیست، لذا رابطه زیر برقرار است:

$$F = \frac{\Delta FN}{\sin \Delta \alpha} = \frac{\Delta FN}{\Delta \alpha} = \frac{p \cdot \Delta u \cdot \Delta l}{\Delta \alpha} \quad (2)$$

$$R_m = \frac{\Delta u}{\Delta \alpha} \quad (3)$$

$$F = p \cdot R_m \cdot \Delta l \quad (4)$$

بنابراین تنش کششی مماسی برابر است با:

$$\sigma = \frac{F}{\Delta A} = \frac{F}{S \cdot \Delta l} = \frac{p \cdot R_m \cdot \Delta l}{S \cdot \Delta l} = \frac{p \cdot R_m}{S} \quad (5)$$

$$R_m = \frac{D_a - S}{2} = \frac{D_i + S}{2} \quad (6)$$

رابطه (۵) به صورت زیر درمی آید:

$$\sigma = p \cdot \frac{D - S}{2S} = p \cdot \frac{D_i + S}{2S} \quad (7)$$

از تنش به دست آمده، با توجه به تنش مجاز، ضخامت دیواره محاسبه می گردد. با رعایت حد جاری گرمائی «K» و اطمینان در مقابل حد جاری «S*»، تنش مجاز برابر است با:

$$\sigma = K/S^* \quad (8)$$

هم چنین برای گره های جوش، با رعایت ضریب ضعیفی قسمت جوش در مقابل ورق پر (راندمان جوش) «V»:

$$V = 0.8 \dots 1.0 \quad (9)$$

تنش مجاز برابر است با:

$$\sigma_{\text{مجاز}} = V \cdot \sigma \quad (10)$$

با رعایت مقداری برای تولورانس ورق (ناصافی ورق) و هم چنین خوردگی (ضریب «C» از جدول ۱) حداقل ضخامت پوشش قسمت سیلندری برابر است با:

$$S = \frac{D_a \cdot p}{2(K/S^*)V + p} + C = \frac{D_i \cdot p}{2(K/S^*)V - p} + C \leq S_e \quad (11)$$

$D_a/D_i \leq 1.2$ برای مخازن تحت فشار

$D_a/D_i \leq 1.7$ برای مخازن بخار

برای لوله $d_a \leq 200$ [mm], $d_a/d_i \leq 1.7$

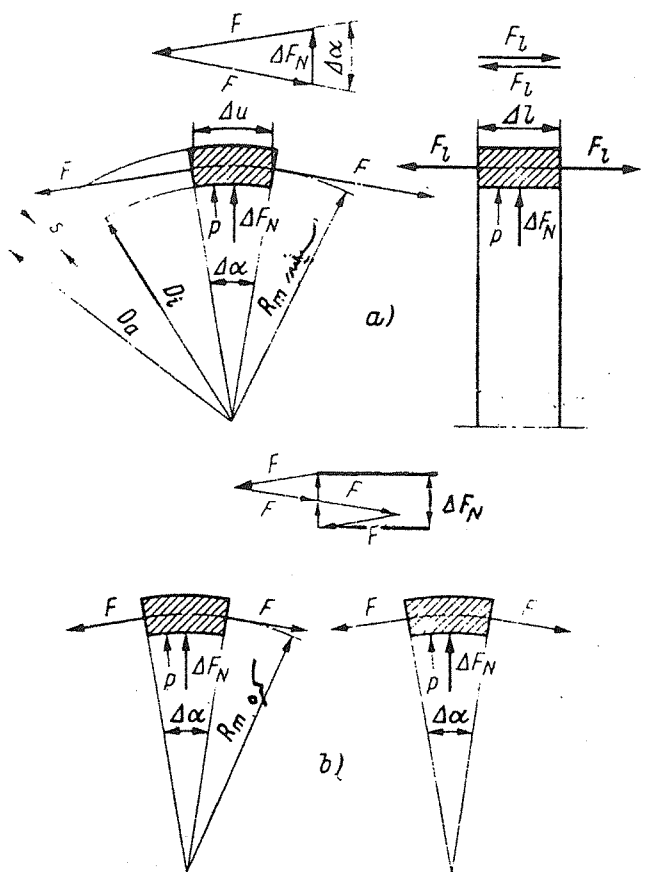


شکل (۲) جوش های عرضی از لبه کف به بیرون قرار می گیرند.

گره های جوش، خصوصاً برای مخازن تحت فشار، باید مطلقاً آب بندی و محکم باشند. مخازن را بیشتر از ورق، لوله و اجزاء ریختگی و آهنگری تولید می کنند.

دیواره مخزن در اثر ازدیاد فشار داخلی کشیده شده به طوری که تحت بار کششی قرار می گیرد. در اثر ازدیاد فشار خارجی برعکس دیواره جمع می شود. در حالت اول فشار بر سطح داخلی و در حالت دوم فشار بر سطح خارجی است. فشار به عنوان تنش شعاعی در مقطع دیواره به سمت صفر کاهش می یابد. از این رو برای دیواره های نسبتاً نازک تقریباً سطح وسطی به عنوان سطح فشاری فرض شده به طوری که روابط حاصل برای فشار خارجی و هم برای فشار داخلی صادق اند.

شکل (۳) جزء کوچکی از پوشش سیلندری (حالت «a») و از پوشش کروی (حالت «b») یک مخزن را نشان می دهد.



شکل (۳) نیروها بر جزء کوچکی از مخزن.

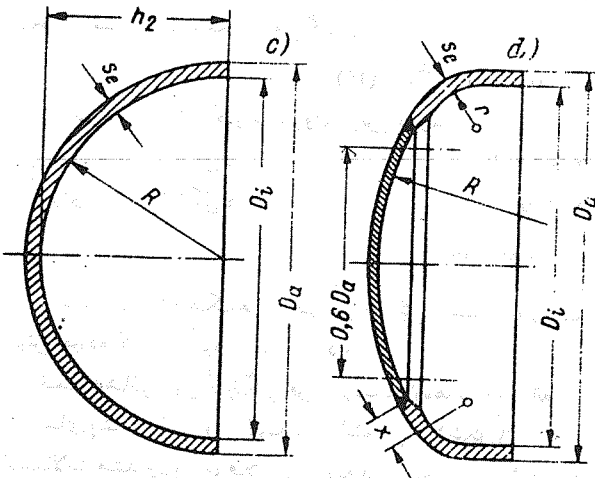
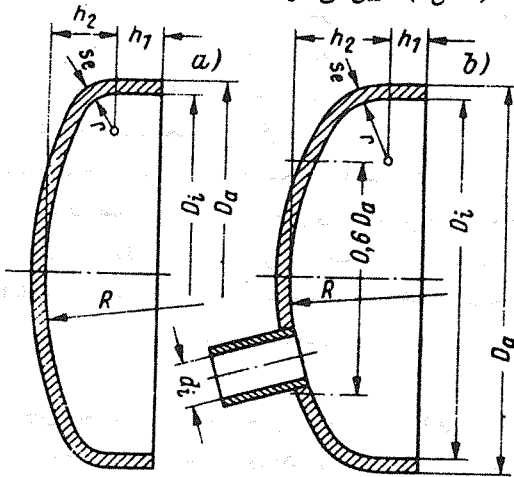
$$\frac{Se - C}{D_a} = 0.001 \dots 0.1$$

$$R = D_i/2 \quad D_a/D_i \leq 1.2 \quad h_1 = 0 \quad h_2 = R \quad (15) \text{ نوع «c»}$$

ضمناً ارتفاع پوشش سیلندری کلاهک مخازن h_1 نباید از مقادیر زیر تجاوز کند:

h_1 [mm]	تا ۵۰ میلی متر
۱۵۰ میلی متر	تا ۸۰ میلی متر
۱۲۰ میلی متر	تا ۱۰۰ میلی متر
۱۰۰ میلی متر	تا ۱۲۰ میلی متر
۷۵ میلی متر	بیش از ۱۲۰ میلی متر
۵۰ میلی متر	

توضیح این که به کمک ضریب «B» از محاسبات مربوط به کره مخازن محاسبه می گردد. ضریب B (از جدول ۲) با توجه به فرم کلاهک (شکل ۴) تعیین می گردد.



شکل (۴) کلاهک یا کلگی مخازن.

ضریب اطمینان S^* :

برای فولادهای آهنگری و نورد: $S^* = 1.5$
 برای فولاد چدن: $S^* = 2.0$
 ازدیاد فشار داخلی: $S^* = 1.5$
 ازدیاد فشار خارجی: $S^* = 1.8$
 ازدیاد فشار خارجی: $S^* = 2.4$

$$C = C_1 + C_2$$

C_1 : مقدار اضافی برای تئورانس منفی ضخامت ورق:

$S = 3 \dots 3.5$ [mm]	$C_1 = 0.3$ [mm]
$= 4 \dots 4.75$ [mm]	$= 0.35$ [mm]
$= 5 \dots 10$ [mm]	$= 0.4$ [mm]
$= 10 \dots 30$ [mm]	$= 0.5$ [mm]
$= 30 \dots 35$ [mm]	$= 0.6$ [mm]
$= 35 \dots 40$ [mm]	$= 0.7$ [mm]
$= 40 \dots 45$ [mm]	$= 0.8$ [mm]
$= 45 \dots 50$ [mm]	$= 0.9$ [mm]
> 50 [mm]	$= 1.0$ [mm]

برای لوله ها: C_1 برابر «۱۵٪» ضخامت دیواره است.

C_2 : مقدار اضافی برای خوردگی:

برای فولادهای فریت معادل یک میلی متر. برای $Se \geq 30$ [m]
 و همچنین لوله های باحفاظت کافی، فولادهای آستنیت و فلزات غیر آهنی مقداری در نظر گرفته نمی شود ($C_2 = 0$).

جدول (۱) ضرایب اطمینان و مقادیر اضافی برای مخازن.

با توجه به این که قسمت کروی انتهای مخزن (کلاهک یا کلگی مخزن) به صورت محدب است، لذا نیروی قائم ΔFN با چهار نیروی «F»، شکل (۳) حالت «b» در تعادل است. در این حالت چهار نیروی «F» جمعاً به اندازه دو نیروی «F» حالت «a» می باشند. بنابراین تنش فشاری یا کششی مخازن کروی نصف از آن مخازن سیلندری است و حداقل ضخامت کلگی مخزن برابر است با:

$$S = \frac{D_a \cdot p \cdot B}{4(K/S^*)V+p} + C = \frac{D_i \cdot p \cdot B}{4(K/S^*)V+p} + C \leq Se \quad (12)$$

معمولاً ابعاد انواع کلاهک مخازن (شکل ۴) برابرند با:

$$R = D_a \quad \text{نوع «a»}$$

$$r = 0.1 D_a$$

$$h_1 \geq 3.5 S$$

$$h_2 = 0.1935 D_a - 0.455 Se \quad (13)$$

$$\frac{Se - C}{D_a} = 0.001 \dots 0.1$$

$$R = 0.8 D_a \quad \text{نوع «b»}$$

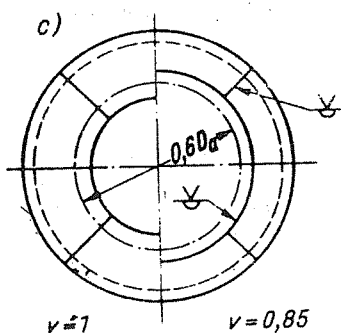
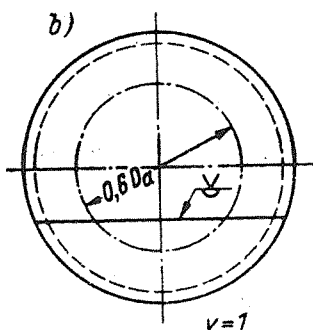
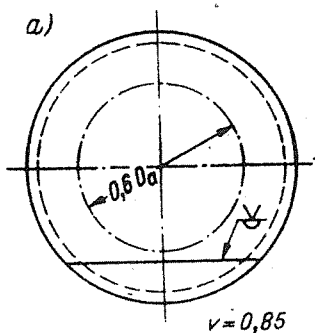
$$r = 0.154 D_a$$

$$h_1 \geq 3S$$

$$h_2 = 0.255 D_a - 0.635 Se \quad (14)$$

شکل ۴ - نوع «b» di/Da										شکل ۴ - نوع «a» di/Da						Se - C Da		
۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲	۰/۱۵	۰/۱	۰		۰/۶	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰/۲۵	۰/۲		۰/۱۵	۰
					۱	۷/۱	۵/۶	۴/۲	۳/۲						۸	۷	۶	۰/۰۰۱
				۷/۵	۶/۴	۵/۵	۴/۵	۳/۴	۲/۷				۸/۲	۷	۶/۱	۵/۴	۴/۶	۰/۰۰۲
			۸	۶/۴	۵/۶	۴/۷	۳/۸	۳/۱	۲/۴				۹	۷	۶/۱	۵/۳	۴/۶	۰/۰۰۳
		۸/۸	۷/۲	۵/۷	۵	۴/۳	۳/۶	۲/۸	۲/۵				۷/۸	۶/۳	۵/۶	۴/۸	۴/۳	۰/۰۰۴
		۸/۱	۶/۵	۵/۳	۴/۶	۴/۱	۳/۴	۲/۶	۲/۲			۸/۷	۷/۳	۵/۸	۵/۲	۴/۵	۴	۰/۰۰۵
۶/۸	۶/۱	۵/۱	۴/۲	۳/۸	۳/۲	۲/۸	۲/۳	۱/۸		۷/۵	۶/۶	۵/۷	۴/۷	۴/۳	۳/۷	۳/۳	۲/۷	۰/۰۱
۵/۳	۴/۷	۴/۱	۳/۴	۳/۱	۲/۷	۲/۵	۲/۳	۱/۸		۵/۸	۵/۲	۴/۵	۳/۸	۳/۵	۳/۳	۲/۸	۲/۶	۰/۰۲
۴/۷	۴/۱	۳/۶	۳/۱	۲/۷	۲/۶	۲/۵	۲/۲	۱/۸		۵/۳	۴/۶	۴/۱	۳/۴	۳/۲	۲/۸	۲/۸	۲/۵	۰/۰۳
۴/۳	۳/۷	۳/۳	۲/۸	۲/۶	۲/۵	۲/۴	۲/۲	۱/۷		۴/۷	۴/۳	۳/۷	۳/۳	۳/۱	۲/۸	۲/۸	۲/۵	۰/۰۴
۴/۱	۳/۵	۳/۲	۲/۶	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۲	۱/۷		۴/۴	۳/۸	۳/۵	۳/۲	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۴	۰/۰۵
۳/۲	۲/۸	۲/۷	۲/۶	۲/۴	۲/۴	۲/۴	۲/۲	۱/۷		۳/۷	۳/۴	۳/۱	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۴	۰/۱

جدول (۲) ضرائب «B» برای کلاهک (کلگی) های متفاوت



شکل (۵) کلاهک (کلگی) مخازن

ضخامت کلگی بدون سوراخ در قسمت کروی (با شعاع «R»)
 برای $l = Di = 2R$ و در قسمت گرد (با شعاع r مابین قسمت
 کروی و سیلندری) برای « β » با « di/Da » محاسبه می شود
 (شکل ۴ حالت d). قسمت سیلندری (با ارتفاع «h») نظیر پوشش
 سیلندری کل مخزن محاسبه می گردد. ضخامت تمامی کلاهک در
 حالت یکنواخت باید حداقل برابر ضخامت قسمت گرد با شعاع « r »
 باشد. حداقل ضخامت کلاهک با مجرای باز (شکل ۴ حالت b) از
 « β » برای « di/Da » به دست می آید. مجرای باز باید در فاصله
 « $0.6 Da$ » قرار گیرد. ضخامت به دست آمده هم برای قسمت
 کروی و هم برای قسمت گرد مناسب است.

جوش اتصال در نوع «d» (شکل ۴) باید فاصله کافی تا قسمت
 گرد داشته باشد. فاصله مذکور «X» برای ضخامت های متفاوت
 قسمت های گرد و کروی کلاهک از رابطه زیر («S» به عنوان
 ضخامت قسمت گرد) محاسبه می گردد.

$$X = 0.5\sqrt{R(S-C)} \quad (16)$$

و برای ضخامت دیواره یکنواخت روابط زیر برقرارند:

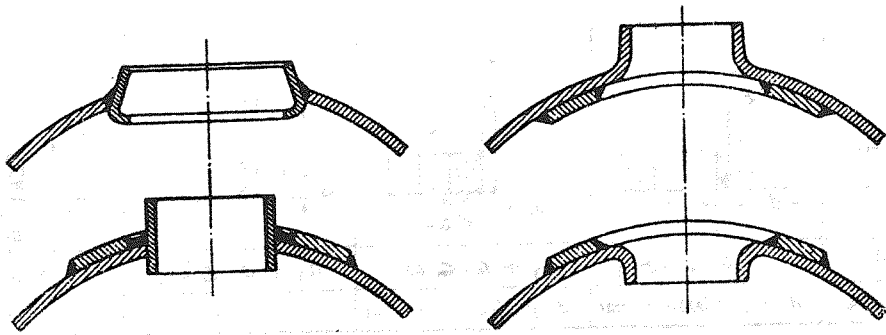
$$X = 3.5.S \quad \text{برای حالت a شکل ۴} \quad (17)$$

$$X = 30.S \quad \text{برای حالت b شکل ۴}$$

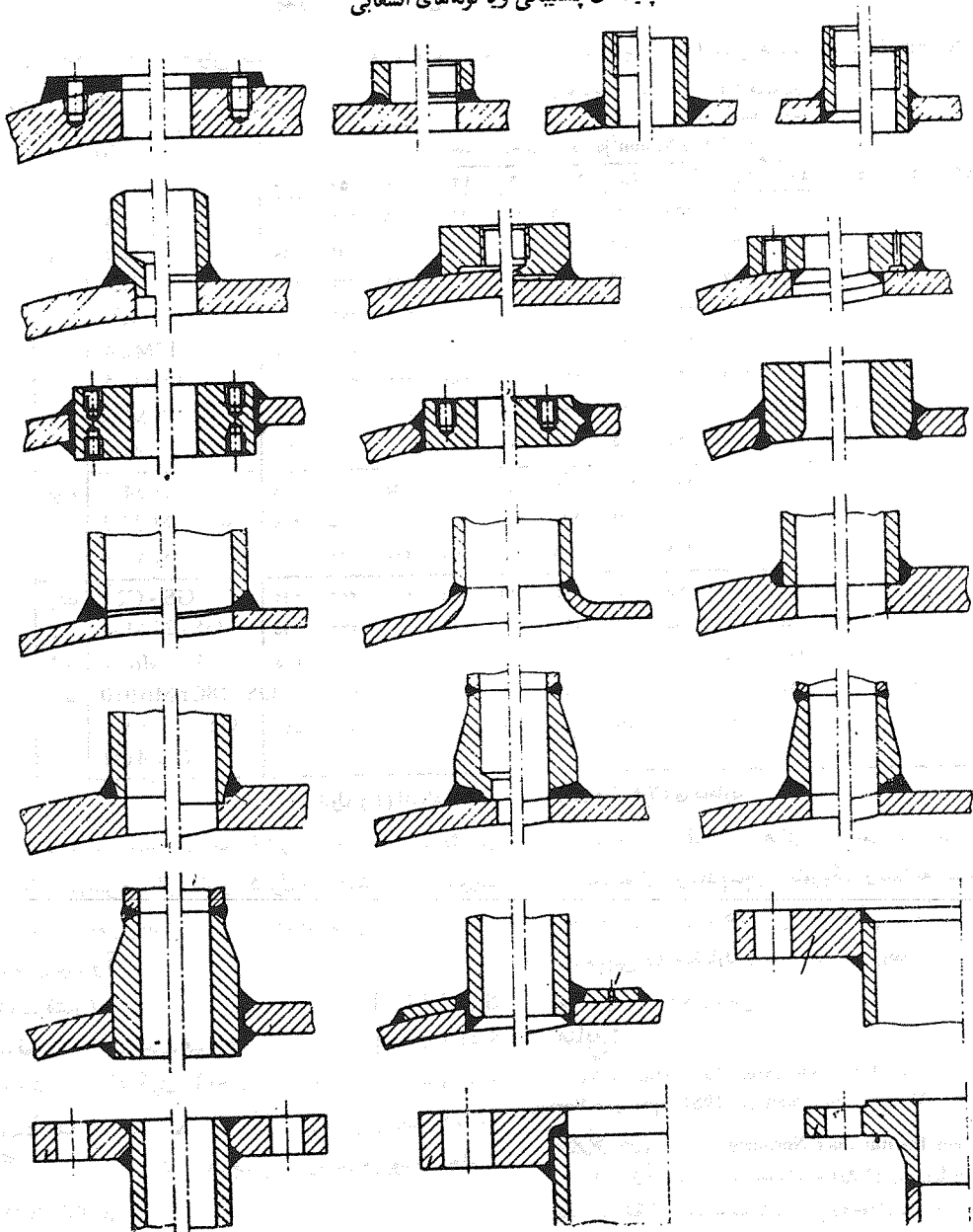
$$X > 100 \text{ [mm]}$$

(شکل ۵) کلاهک های جوشی متشکل از قسمت های بهم
 جوش خورده کروی و گرد را نشان می دهد.

نمونه هائی از چگونگی قوی کردن دیواره ها در محل اتصال
 پایه های پشتیبانی و یا لوله های انشعابی در (شکل ۶) و انواع
 اتصالات متداول پایه، فلانژ و لوله ها به مخازن در (شکل ۷)
 جمع آوری شده اند.



شکل (۶) نمونه‌هایی از چگونگی قوی کردن دیواره‌ها در محل اتصال پایه‌های پشتیبانی و یا لوله‌های انشعابی



شکل (۷) انواع متداول اتصالات پایه، فلانژ و لوله مخازن

$a_1 + a_2 \geq 1,4s_1$	$a_1 + a_2 \geq 1,4s_1$	$a_1 + a_2 \geq 2s_1$	$a_1 + a_2 \geq 2s_1$	$a_1 + a_2 \geq 2s_1$
$d_1 \cdot p \leq 10000 \text{ mm} \cdot \text{bar}$	$d_1 \cdot p \leq 10000 \text{ mm} \cdot \text{bar}$	$d_1 \cdot p \leq 20000 \text{ mm} \cdot \text{bar}$	نامحدود	تا محدود

اختلاف «a₁» و «a₂» نباید بیش از ۲۵٪ باشد
 جدول (۳) چگونگی اتصال فلانز به لوله های انشعابی مخازن

در جدول ۳ فلانزهای جوش خورده به لوله های مخازن و در (جدول ۴) نیز اعداد مشخصه $K [N/mm^2]$ مواد مخازن به ازای دمای کاری $[^{\circ}C]$ مشخص شده اند. ضخامت مورد نیاز مشخص شده اند.

عدد مشخصه «K» در $[N/mm^2]$ در $[^{\circ}C]$											مواد				
۵۵۰	۵۲۰	۵۰۰	۴۵۰	۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۶۰	۱۲۰	۱۰۰	۵۰	۲۰		
		۲۹	۷۸	۹۸	۱۱۸	۱۳۷	۱۶۷	۱۷۶	۱۸۳	۱۹۰	۱۹۸	۲۰۹	۲۱۶	HI	ورق مخازن
		۲۹	۹۸	۱۱۸	۱۳۷	۱۵۷	۱۸۶	۲۰۶	۲۱۷	۲۲۷	۲۳۸	۲۴۲	۲۴۵	HII	
		۲۹	۱۱۸	۱۳۷	۱۵۷	۱۷۶	۲۰۶	۲۲۵	۲۳۶	۲۴۶	۲۵۸	۲۶۲	۲۶۵	HIII	
		۲۹	۱۲۷	۱۴۷	۱۴۷	۱۸۶	۲۱۶	۲۳۵	۲۴۶	۲۵۷	۲۶۸	۲۷۱	۲۷۵	HIV	
	۳۰	۳۹	۱۳۷	۱۵۷	۱۷۶	۲۰۶	۲۲۵	۲۴۵	۲۵۱	۲۵۶	۲۶۲	۲۶۹	۲۷۵	17Mn 4	
	۳۰	۳۹	۱۵۷	۱۷۶	۲۰۶	۲۲۵	۲۴۵	۲۶۵	۲۷۰	۲۸۱	۲۹۲	۳۰۶	۳۱۴	19 Mn 5	
۳۱	۵۹	۱۳۷	۱۵۷	۱۶۷	۱۷۶	۱۹۶	۲۲۵	۲۴۵	۲۴۹	۲۵۲	۲۵۶	۲۶۲	۲۶۵	15 Mo3	
۴۹	۹۴	۱۷۶	۱۹۶	۲۰۶	۲۱۶	۲۳۵	۲۵۵	۲۷۴	۲۷۸	۲۸۱	۲۸۵	۲۹۱	۲۹۴	13CrMo4	
						۱۰۸	۱۲۷	۱۴۳	۱۵۴	۱۶۵	۱۶۵	۱۷۵	۱۷۵	St 34-2	لوله ها
						۱۲۲	۱۴۳	۱۶۱	۱۷۴	۱۸۷	۱۸۷	۲۰۵	۲۰۵	St 35 , St 37-2	
						۱۳۹	۱۶۱	۱۷۸	۱۹۱	۲۰۵	۲۰۵	۲۲۰	۲۲۰	St 45 , St 42.2	
			۱۲۴	۱۳۰	۱۳۵	۱۶۰	۱۷۵	۱۹۴	۲۱۴	۲۱۴	۲۳۳	۲۴۵	۲۴۵	GS - C25	چدن فولاد
			۱۳۵	۱۴۵	۱۵۵	۱۶۵	۱۷۷	۱۹۰	۲۰۵	۲۲۱	۲۲۱	۲۳۶	۲۴۵	GS - 22 Mo4	
۱۶۰	۱۷۲	۱۸۰	۱۹۰	۲۰۵	۲۱۵	۲۳۰	۲۴۲	۲۵۵	۲۷۱	۲۸۸	۲۸۸	۳۰۵	۳۱۵	GS - 17Cr Mo55	گرماسخت
۲۴۰	۲۶۴	۲۸۰	۳۰۵	۳۱۵	۳۳۰	۳۴۵	۳۵۵	۳۵۵	۳۶۷	۳۸۰	۳۸۰	۳۹۲	۴۰۰	GS - 18Cr Mo 910	
۳۰۰	۳۳۹	۳۶۵	۴۲۰	۴۴۵	۴۶۰	۴۷۰	۴۸۵	۵۰۰	۵۲۵	۵۵۰	۵۵۰	۵۷۵	۵۹۰	GS - X22 Cr Mo 4121	

DIN I 7155

DIN 1.626,1623

DIN I 7245

جدول (۴) اعداد مشخصه «K» برای مواد فولادی مخازن

ضخامت قسمت های مختلف یک مخزن تحت فشار بدون استفاده از روابط پیچیده تئوریک و تنها به کمک جداول کمکی انجام می گیرد. همچنین نمونه هایی از چگونگی اتصال لوله های انشعابی به مخازن و فلانزهای مربوطه زمینه مناسبی برای شروع طراحی فرمی مخازن می باشد.

منابع:

1. Decker, Kabus, Maschinenelemente, 1982, Hanser-Verlag.
2. Niemann, B.H., Maschinenelemente, 1981, Springer-Verlag.

زیرنویس: I - DIN: = Deutsches Institut Fuer Normung.

۲ - از آنجائی که ضخامت ورق (یا پروفیل) به لحاظ روش تولیدی در تمامی نقاط یکسان نیست، از این رو مقداری به عنوان تاورانس منفی در نظر گرفته شده و در ضخامت منظور می گردد.

قبل از استفاده، مخازن تحت فشار را به وسیله آب با فشاری معادل «۱/۳» برابر فشار کاری کنترل می کنند. در این صورت ضریب اطمینان در مقابل حد جاری باید حداقل برابر:

- برای فولادهای نورد و آهنگری (مخازن تحت فشار) $S = 1.1 [-]$
- برای چدن فولاد (مخازن تحت فشار) $S = 1.5 [-]$
- برای فولادهای نورد و آهنگری (مخازن بخار) $S = 1.4 [-]$

باشد. ضمناً عدد مشخصه K از جدول مربوطه برای دما ۲۰ درجه سانتی گراد تعیین می شود. همچنین در روابط مربوطه ضخامت $S = Se - C$ قرار می گیرد.

۴ - نتایج