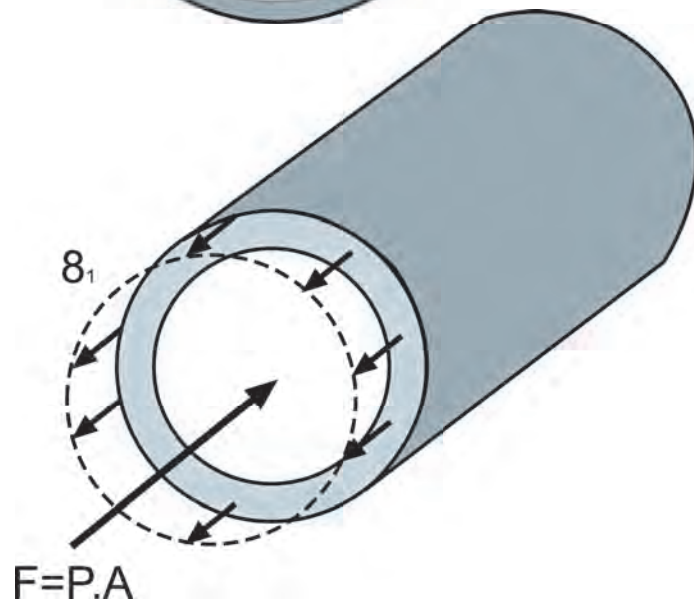
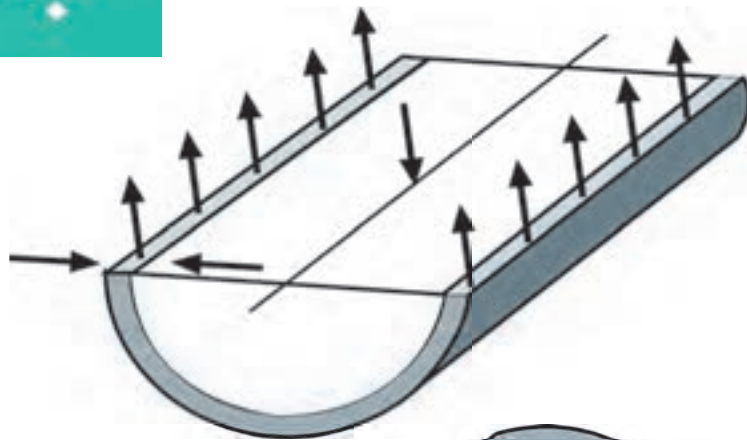


# فصل ۶

## مخزن های جدار نازک



## هدف‌های رفتاری فصل ششم :

آیا می‌توانید ابعاد یک مخزن جدار نازک را محاسبه و تعیین نمایید؟

پس از پایان این درس از هنرجو انتظار می‌رود که :

- مخزن جدار نازک را بشناسد.
- تنش در مخزن جدار نازک را بشناسد.
- با محاسبه یا با کمک نمودار، مخزن جدار نازک طراحی نماید.

مدت زمان آموزش :

- ۴ ساعت



## ۶- مخزن‌های جدار نازک

برای نگه‌داری، ذخیره‌سازی و حمل سیالات (مایعات و گازها) از مخزن استفاده می‌شود. در شکل ۶-۱ که نمایی از یک کارخانه پتروشیمی را نمایش می‌دهد انواع مختلفی از مخزن‌ها مشاهده می‌شوند. مخزن‌ها از نظر کاربرد به دو دسته مخزن‌های ذخیره و مخزن‌های تحت فشار، تقسیم می‌شوند.



شکل ۶-۱- کارخانه پتروشیمی

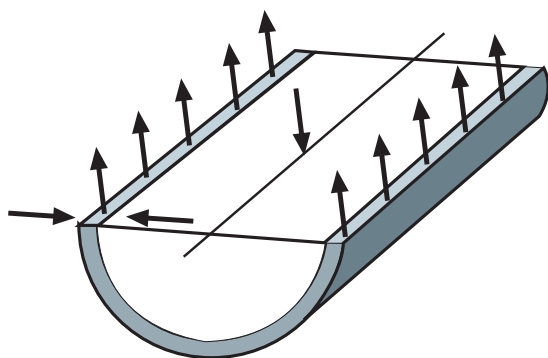
محاسبات مربوط به طراحی و استحکام مخزن‌ها در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی و هم‌چنین صنعت تأسیسات از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از پرکاربردترین مخزن‌ها، مخزن جدار نازک است. به مخزنی جدار نازک گفته می‌شود که قطر آن بیش از بیست برابر ضخامت

جداره (گوشه دیواره) باشد. این مخزن‌ها معمولاً استوانه‌ای شکل هستند و با ورق‌های فلزی ساخته می‌شوند.

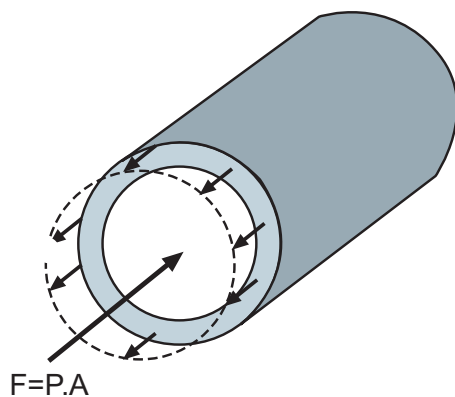
### ۱-۶- تنش در جداره‌های مخزن

در اثر فشار وارد شده از سیال در یک مخزن جدار نازک مانند مخزن نگهداری سوخت یا بخار آب، نیروهایی به سطح مخزن وارد می‌شود. این نیروها باعث به وجود آمدن تنش در جداره فلزی مخزن می‌شوند. بدیهی است که تنش‌های به وجود آمده نباید از تنش مجاز فلز جداره مخزن بیش‌تر باشند. این تنش‌ها در دو جهت اصلی طولی و عرضی به وجود می‌آیند.

شکل ۲-۶ الف - مقطع طولی و شکل ۲-۶ ب - مقطع عرضی در یک مخزن استوانه‌ای یا لوله را نشان می‌دهند.



الف) تنش در مقطع طولی



$$F = P \cdot A$$

ب) تنش در مقطع عرضی

شکل ۲-۶

در این فصل با روش محاسبه این تنش‌ها آشنا شده و کاربرد آن‌ها در طراحی یک مخزن جدید بیان خواهد شد.

### فشار هیدرواستاتیکی

در درس فیزیک با فشار مایعات آشنا شده‌اید. در مخزن‌های ذخیره مایعات با سطح آزاد، اگر چگالی مایع و عمق نقطه‌ای از آن را بدانیم، می‌توانیم فشار موجود در آن نقطه را به دست آوریم. رابطه فشار مایعات به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P = \rho gh$$

که در آن  $\rho$  چگالی مایع،  $g$  شتاب جاذبه زمین و  $h$  عمق نقطه‌ای است که فشار آن را محاسبه می‌کنیم.



بیشترین فشار در مخزن ذخیره مایعات با سطح آزاد در عمیق‌ترین نقطه آن است.



به دلیل اهمیت کیفیت ساخت مخزن‌های CNG این مخزن‌ها تحت تست مخرب فشار قرار می‌گیرند به شکل و جهت گسیختگی در مخزن دقت کنید.



به مخزن‌های کروی کمترین تنش وارد می‌شود.

چرا؟

### ۱-۱-۶- تنش در مقطع طولی: شکل ۲-۶- الف نمودار جسم آزاد مقطع طولی

یک مخزن استوانه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نیروهای داخلی در جداره مخزن در مقابل نیروی ناشی از فشار سیال در مخزن مقاومت می‌کنند. مقدار تنش به وجود آمده در مقطع طولی در مخزن با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{\text{طولی}} = \frac{PD_i}{2t} \quad \text{رابطه ۱-۶}$$

که در آن:

$\sigma_{\text{طولی}}$ : تنش کششی در مقطع طولی مخزن، با یکای MPa و ...

P: فشار سیال، با یکای MPa و ...

$D_i$ : قطر داخلی مخزن، با یکای mm و ...

t: ضخامت جداره مخزن، با یکای mm و ...

این تنش در لوله‌ها و در بخش استوانه‌ای مخزن‌ها به وجود می‌آید.

### ۲-۱-۶- تنش در مقطع عرضی: شکل ۲-۶- ب نمودار جسم آزاد مقطع عرضی

در مخزن را نشان می‌دهد. مقدار این تنش با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{\text{عرضی}} = \frac{PD_i}{4t} \quad \text{رابطه ۲-۶}$$

که در آن:

$\sigma_{\text{عرضی}}$ : تنش کششی در مقطع عرضی مخزن، با یکای MPa و ...

P: فشار سیال، با یکای MPa و ...

$D_i$ : قطر داخلی مخزن، با یکای mm و ...

t: ضخامت جداره مخزن، با یکای mm و ...

این رابطه برای محاسبه تنش در محل اتصال عدسی‌ها در دو سر مخزن استوانه‌ای و

هم‌چنین در مخزن‌های کروی استفاده می‌شود.

**نکته:** با مقایسه دو رابطه ۱-۶ و ۲-۶ ملاحظه می‌شود که در یک مخزن استوانه‌ای مقدار

تنش در مقطع طولی دو برابر تنش در مقطع عرضی است. در شرایطی که در مخزن کروی تنش در

هر دو مقطع با هم برابر و از رابطه ۲-۶ به دست می‌آید.

## ۲-۶ طراحی مخزن استوانه‌ای با کمک نمودار

در صنعت برای افزایش سرعت در طراحی‌های صنعتی، جداول و نمودارهایی تهیه شده و در کتاب‌هایی که "Hand Book" نام دارند، منتشر می‌شوند. این نمودارها در واقع نتایج محاسبات انجام شده، برای مقادیر اولیه متفاوت هستند و استفاده کننده را از انجام محاسبه بی‌نیاز می‌کنند. امروزه با پیشرفت رایانه‌ها، رفته‌رفته نرم‌افزارهای محاسباتی جایگزین جداول و نمودارها می‌شوند. اما جداول و نمودارها به دلیل در دسترس بودن و سهولت در استفاده هم‌چنان جایگاه خود را حفظ کرده‌اند.

نمودار ۱-۶ برای طراحی مخزن استوانه‌ای جدار نازک فولادی (با تنش مجاز  $140 \text{ MPa} = \sigma$ )، براساس رابطه ۱-۶ تهیه شده است. با استفاده از این نمودار می‌توان ضخامت ورق جداره (t) را با دانستن فشار سیال (P) و قطر مخزن موردنظر ( $D_i$ ) به دست آورد.

محور افقی در این نمودار قطر داخلی مخزن را با یکای متر نشان می‌دهد و محور عمودی ضخامت جداره را با یکای mm مشخص می‌کند. خط‌های شعاعی ترسیم شده نشان دهنده فشار داخلی مخزن با یکای اتمسفر (atm) هستند. با استفاده از رابطه ۳-۶ یکای فشار را تبدیل می‌کنند.

$$1 \text{ MPa} = 9.87 \text{ atm}$$

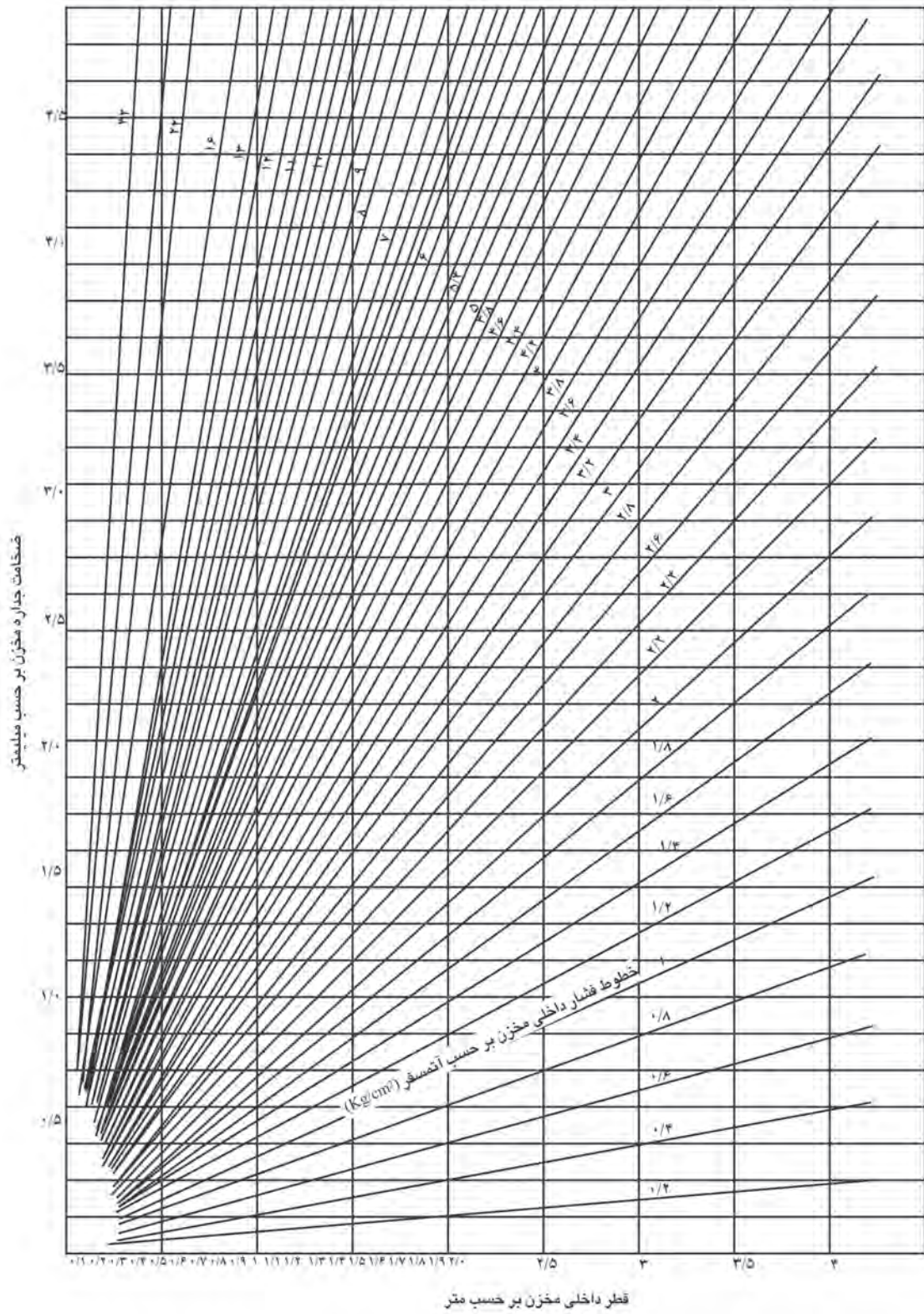
رابطه ۳-۶



### محمد خوارزمی

محمد بن موسی خوارزمی (سده‌های دوم و سوم هجری) بزرگ‌ترین عالم عصر خود در ریاضی، جغرافی، نجوم و تاریخ بوده است. یکی از مهمترین پیشرفت‌ها در ریاضیات با کارهای خوارزمی شروع شد. این پیشرفت، شروع جبر نام دارد. مهمترین کتاب خوارزمی کتاب حساب "الجبر و المقابله" است. کلمه‌ی Algebra از نام این کتاب گرفته شده است.

یک اتمسفر (atm) یا یک کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع ( $\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ) معادل فشار ده متر ارتفاع آب است.



نمودار ۶-۱

**تمرین نمونه ۱-۶:** بیشترین فشار سیال در یک مخزن استوانه‌ای فولادی به قطر یک متر و ضخامت جداره ۴mm چقدر می‌تواند باشد تنش مجاز این فولاد را  $200 \text{ MPa}$  در نظر بگیرید.

**راه حل:** می‌دانیم که تنش در مقطع طولی مخزن‌های استوانه‌ای که می‌تواند منجر به خرابی آنها شود، با کمک رابطه ۱-۶ محاسبه می‌شود. پس داریم:

$$\sigma_{\text{طولی}} = \frac{PD}{2t} \rightarrow (200 \text{ MPa}) = \frac{P(1000 \text{ mm})}{2(4 \text{ mm})} \rightarrow P = 1/6 \text{ MPa}$$

بیشترین فشار مجاز سیال در این مخزن  $1/6 \text{ MPa}$  یا  $16$  اتمسفر می‌باشد.

**تمرین نمونه ۲-۶:** یک مخزن کروی به قطر  $3/5$  متر از جنس آلیاژ آلومینیوم  $2024$  برای نگهداری گاز نیتروژن تحت فشار  $6 \text{ MPa}$  استفاده می‌شود. ضخامت جداره  $20$  میلی‌متر است. آیا مخزن از استحکام کافی برخوردار است؟ ضریب اطمینان را محاسبه کنید.

**راه حل:** می‌دانیم که در مخزن‌های کروی بیشترین تنش در جداره از رابطه ۲-۶ محاسبه می‌شود.

$$\sigma_{\text{عرضی}} = \frac{PD}{4t} = \frac{(6 \text{ MPa})(350 \text{ mm})}{4(20 \text{ mm})} = 263 \text{ MPa}$$

با مراجعه به جدول مشخصات مواد (پیوست ب-۲) تنش تسلیم برای آلیاژ فوق را استخراج می‌کنیم:

$$\sigma_y = 325 \text{ MPa}$$

استحکام تسلیم:  $325 \text{ MPa} > 263 \text{ MPa}$  تنش در جداره مخزن:

ملاحظه می‌شود که تنش ایجاد شده در مخزن، کوچکتر از استحکام تسلیم فلز است. اکنون ضریب اطمینان را

با رابطه ۹-۲ محاسبه می‌کنیم:

$$F.S. = \frac{\text{استحکام تسلیم}}{\text{تنش}} = \frac{325}{263} = 1/24$$

**سؤال:** ملاحظه می‌شود که ضریب اطمینان کوچک است. با چه تغییری در ضخامت جداره مخزن می‌توانیم

ضریب اطمینان را حداقل تا مقدار ۲ افزایش دهیم؟

**تمرین نمونه ۳-۶:** برای ساخت مخزن فولادی آب گرم کن به قطر  $50$  سانتی‌متر با فشار  $10$  اتمسفر از ورق فولادی با چه ضخامتی استفاده کنیم؟ برای حل از نمودار کمک بگیرید.

**راه حل:** با مراجعه به نمودار ۱-۶ بر روی محور افقی قطر  $50$  متر را انتخاب کرده و خط مربوط به آن را

ادامه می‌دهیم تا خط فشار  $10$  اتمسفر را قطع کند. از محل تلاقی، به صورت افقی حرکت کرده و ملاحظه می‌شود که مقدار  $1/8$  میلی‌متر برای ضخامت ورق به دست می‌آید.

**تمرین:** ضخامت ورق مخزن فوق را با استفاده از رابطه ۱-۶ محاسبه و پاسخ‌ها را با هم مقایسه کنید.



## طراحی کنید

امروزه نرم‌افزارها با دقت زیاد و سرعت در محاسبه، جایگزین جدول‌ها و نمودارهای محاسباتی می‌شوند.

شما نیز می‌توانید یک برنامه ساده نرم‌افزاری محاسباتی بسازید.

با استفاده از یک فایل صفحه گسترده (در نرم‌افزار Excel) برنامه‌ای بسازید که با دریافت فشار سیال و قطر داخلی مخزن و انتخاب جنس مخزن، ضخامت جداره را محاسبه و اعلام کند.



شکل ۳-۶- مخزن ۲۰۰ هزار لیتری مواد شیمیایی، پس از ساخت به محل نصب حمل می‌شود.

## تمرین‌های فصل ششم

۶-۱ فشار در یک مخزن استوانه‌ای  $50^{\circ}\text{kPa}$  است. قطر مخزن  $2/5\text{m}$  و ضخامت جداره  $10\text{mm}$  است.

- الف) بیشترین تنش ایجاد شده در مخزن چه قدر است؟  
ب) چه ماده‌ای برای ساخت این مخزن قابل توصیه است؟

۶-۲ برای ساخت لوله‌های انتقال بخار به قطر  $450\text{mm}$  با فشار  $550\text{kPa}$  از ورق با چه ضخامتی استفاده شود. تنش در جداره لوله نباید از  $62\text{MPa}$  تجاوز کند.

۶-۳ در لوله‌ای فولادی با قطر داخلی  $250\text{mm}$  و ضخامت جداره  $10\text{mm}$  اگر تنش مجاز  $120\text{MPa}$  باشد، حداکثر فشار کاری را محاسبه کنید.

۶-۴ گاز نیتروژن در یک مخزن کروی با قطر  $4/5\text{m}$  فشار  $860\text{kPa}$  دارد. اگر جنس مخزن را از آلیاژ آلومینیوم  $2024$  انتخاب کنیم چه ضخامت ورقی مناسب است؟

۶-۵ یک مخزن کروی به قطر  $1/5$  متر برای نگه داری گاز هلیوم با فشار  $700\text{kPa}$  مورد نیاز است. اگر اتصالات جوشی در ساخت مخزن  $8\%$  مقاومت ورق به کار رفته را داشته باشند، ضخامت ورق فولادی St37 مورد نیاز را تعیین کنید.

۶-۶ در لوله‌ای فولادی با تنش مجاز  $140\text{MPa}$  و قطر داخلی یک متر فشار معادل  $10/5$  اتمسفر اعمال شده است. ضخامت ورق مخزن را با هر دو روش محاسباتی و نمودار به دست آورید.

۶-۷ کپسول اکسیژن به قطر  $220\text{mm}$  و ضخامت  $8/75\text{mm}$  که در جوشکاری اکسی استیلن استفاده می‌شود در فشار  $260\text{bar}$  معادل  $26\text{MPa}$  مورد تست قرار گرفته است. مقادیر تنش‌های طولی و عرضی را در کپسول محاسبه کنید.

## پاسخ تمرین‌ها

### فصل اول

۱-۱

شکل ۱-۳۵

$$F_x = \overline{28/28} \text{ kN}$$

$$F_y = \downarrow 28/28 \text{ kN}$$

شکل ۱-۳۶

$$F_x = \overline{28/3} \text{ kN}$$

$$F_y = \downarrow 20/57 \text{ kN}$$

شکل ۱-۳۷

$$F_x = \overline{135} \text{ kgf}$$

$$F_y = \uparrow 233/8 \text{ kgf}$$

۱-۲

$$F_x = \overline{51/9} \text{ N}$$

$$F_y = \uparrow 30 \text{ N}$$

۱-۳

شکل ۱-۳۸

$$R = 263/4 \text{ kN}$$

$$\theta = 71/63^\circ$$

شکل ۱-۳۹

$$R = 51/2 \text{ N}$$

$$\theta = 79/45^\circ$$

شکل ۱-۴۰

$$R = 25/1 \text{ N}$$

$$\theta = 32/34^\circ$$

۱-۴

$$R = 22/3 \text{ N}$$

$$\theta = 30/9^\circ$$

۱-۵

$$R = 17/43 \text{ kN}$$

$$\theta = 26^\circ$$

۱-۶

$$R = 106/9 \text{ N}$$

$$\theta = 65^\circ$$

۱-۷

$$m = 8/5 \text{ kg}$$

$$A_x = 0$$

$$B = 66/66 \text{ kN}$$

$$A_y = 42/33 \text{ kN}$$

۱-۹

$$A_x = 0$$

$$B = 71/7 \text{ kN}$$

$$A_y = 48/35 \text{ kN}$$

۱-۱۰

$$M_A = 48 \text{ N.m}$$

$$A_y = 80 \text{ kN}$$

$$A_x = 0$$

۱-۱۱

$$d = 800 \text{ mm}$$

۱-۱۲

$$A = 1154/7 \text{ N}$$

$$B_y = 242/8 \text{ N}$$

$$B_x = 0$$

۱-۱۳

$$F_E = 1400 \text{ N}$$

$$F_{yA} = 1000 \text{ N}$$

$$F_{xA} = 0$$

۱-۱۴

$$F_y = 801/61 \text{ N}$$

$$F_x = 0 \text{ (الف)}$$

$$F_B = 1356/58 \text{ N (ب)}$$

۱-۱۵

۱-۱۶

$$F_A = \downarrow 51/96 \text{ kN}$$

$$F_{xB} = 103/92$$

$$F_{yB} = 111/96 \text{ kN}$$

## فصل دوم

۲-۱

$$\sigma = 150 \text{ MPa}$$

۲-۲

$$\sigma = ۴/۵۸ \text{ MPa}$$

۲-۳

$$F = ۱۸/۸۴ \text{ kN}$$

۲-۴

$$\sigma = ۴/۱۶ \text{ MPa}$$

۲-۵

$$d = ۱۱۱/۷۳ \approx ۱۱۲ \text{ mm}$$

۲-۶

$$\sigma = ۲۲۳/۹ \text{ MPa}$$

$$\tau = ۸۹/۵۷ \text{ MPa}$$

۲-۷

$$h = ۸ \text{ mm}$$

۲-۸

$$\Delta L = ۰/۳ \text{ mm}$$

$$\varepsilon = ۷/۵ \times ۱۰^{-۴}$$

۲-۹

$$F = ۶۶۵/۶۸ \text{ kN}$$

۲-۱۰

$$\sigma_۱ = ۰/۶۹۳ \text{ MPa}$$

۲-۱۱

$$\sigma = ۲۴۰ \text{ MPa}$$

$$\sigma_۲ = ۱/۳۸ \text{ MPa}$$

$$F = ۱۲ \text{ kN}$$

۲-۱۲

St 44

St 52

$$\sigma_{\text{مجاز}} = 165 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{مجاز}} = 213 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{مجاز}} = 110 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{مجاز}} = 142 \text{ MPa}$$

۲-۱۳

$$17/55 \text{ kN}$$

۲-۱۴

(الف)

$$\text{قطر خارجی} = 65/91 \text{ mm}$$

$$\text{قطر داخلی} = 43/94 \text{ mm}$$

(ب)

$$\text{قطر خارجی} = 106/56 \text{ mm}$$

$$\text{قطر داخلی} = 94/56 \text{ mm}$$

## فصل سوم

۳-۱

$$\text{ب) } F_w = 100/7 \text{ kN}$$

$$\text{الف) } L = 53/59 \text{ mm}$$

۳-۲

$$L = 123/58 \text{ mm}$$

۳-۳

$$\text{ب) } F = 109/5 \text{ kN}$$

$$\text{الف) } F = 78/58 \text{ kN}$$

۳-۴

$$F = 146/51 \text{ kN}$$

۳-۵

$$F = 128/9 \text{ kN}$$

۳-۶

$$\text{ب) } L = 84/4 \approx 84/5 \text{ mm}$$

$$\text{الف) } 315 \text{ kN}$$

$$W_y = 7/65 \approx 8 \text{ mm}$$

$$W_x = 12/8 \approx 13 \text{ mm}$$

## فصل چهارم

۴-۱

$$M = 60 \text{ N.m (الف)}$$

$$P = 500 \text{ N (ب)}$$

۴-۲

$$\tau_{\text{مجاز}} = 120 \text{ MPa}$$

۴-۳

$$\tau = 66/34 \text{ MPa}$$

۴-۴

$$t = 3/45 \text{ mm}$$

۴-۵

$$\sigma_c = 477/6 \text{ MPa}$$

۴-۶

$$\sigma = 47/36 \text{ MPa} , \tau = 85/98 \text{ MPa}$$

۴-۷

$$F.s = 2/97 \approx 3$$

۹-۸

۴-۸

$$\text{الف) قطر پیچ} = 18 \text{ mm}$$

$$\text{ب) } h = 36 \text{ mm}$$

$$\text{ج) } b = 55/8 \text{ mm}$$

$$\text{قطر سوراخ} = 19/8 \text{ mm}$$

## فصل پنجم

۵-۱

$$\text{الف) } F_p = 61365/3 \text{ kgf}$$

$$\text{ب) } F_p = 31456/7 \text{ kgf}$$

۵-۲

$$43659 \text{ N}$$

۵-۳

رسم نمودار

## فصل ششم

۶-۱

$$\text{الف) } \sigma_{\text{طولی}} = 62/5 \text{ MPa}$$

۶-۲

$$t = 2 \text{ mm}$$

۶-۳

$$P = 9/6 \text{ MPa}$$

۶-۴

$$t = 2/97 \approx 3 \text{ mm}$$

۶-۵

$$t = 1/4 \text{ mm}$$

۶-۶

$$\text{محاسباتی } 3/7 \text{ mm} ، \text{ نمودار } 3/6 = 3/5$$

۶-۷

$$\sigma_{\text{طولی}} = 326/8 \text{ MPa} ، \sigma_{\text{عرضی}} = 163/4 \text{ MPa}$$