اویل ایندستری
Oilindustry.ir
CLICK HERE

ضریب اطمینان ظروف تحت فشار

سیروس یحیی پور ASME Authorized Inspector

رییس هیئت مدیره شرکت مهندسان مشاور نهان کاوش

sirus_yehipoor@yahoo.se

چکیده

ضریب اطمینان Factor of Safety (FoS) یا به بیان مرسوم Safety Factor، عبارت است از نسبت مقاومت آلیاژها به حداکثر تنشی که در حین بهره‌برداری برای تجهیز رخ می دهد. هر چه این نسبت بزرگتر باشد، ایمنی دستگاه در قبال حوادث ناشی از کار افزایش خواهد یافت. در گذشته شاید تنها راه برای حصول اطمینان از دستگاه‌ها، افزایش ضریب اطمینان آنها بود. این ضریب و اندازه عددی آن، تقریبا از اولین روزهای تدوین استانداردهای ظروف تحت فشار جداره نازک استوانه‌ای در طراحی مطرح و محل بحث و گفتگو شد. در ابتدا میزان ضریب اطمینان بر اساس تنش کششی Tensile Stress، در اولین کدهای ASME B & PV برابر ۴ در نظر گرفته شد، با پیشرفت علم مواد، نسبت ضریب اطمینان علاوه بر تنش کششی با تنش تسلیم Yield Stress نیز مقایسه شد. عدد ۴ مذکور مدتی طولانی ثابت ماند، تا در اثر پیشرفت تکنولوژی تولید ورق، لوله، بهبود روش‌های طراحی کامپیوتری و پیشرفت متدهای بازرسی، بهره برداری و نگهداری، در نسخه Sec VIII Div1 سال ۲۰۰۱ از ۴ به ۳,۵ تبدیل شد و بعد از سالها، تنش مجاز آلیاژها در حدود ۱۴درصد افزایش و حداقل ضخامت بدنه هم حدود ۱۲,۵درصد کاهش یافت. در متن پیش رو سعی می شود که ضمن بررسی کلی ضریب اطمینان، تاریخچه، اندازه و اثر آن در برخی از استانداردهای ظروف تحت فشار ASME بررسی گردد.

واژگان کلیدی

ضریب اطمینان، ظروف تحت فشار، استاندارد، ASME ، تنش کششی، تنش تسلیم، تنش مجاز

مقدمه

درابتدای قرن نوزدهم با نیاز روز افزون صنایع به سرعت و دمای بالاتر، ساخت دیگهای بخار رونق یافت. طراحی، انتخاب مواد و روش ساخت اولین سازندگان دیگ های بخار کاملا سری بود و سعی می کردند که دانش آن را در انحصار خود داشته باشند. از میانه قرن نوزدهم تا اواخر قرن، زنجیره‌ای از انفجارهای فاجعه بار رخ داد که سبب مجروح و کشته شدن تعداد زیادی از انسانها گشت. در نتیجه تلاش شد که اول، طراحی و ساخت این تجهیزات استاندارد شود و سامان یابد. و دوم، با طراحی ضریب اطمینان مناسب، علاوه بر در نظر گرفتن ملاحضات اقتصادی، از انفجار تجهیزات ممانعت گردد. اما باید توجه داشت که افزایش ضریب اطمینان در عین حال موجب گرانی دستگاه، بالارفتن ضخامت، افزایش وزن و گرانی حمل و نقل خواهد شد، به علاوه افزایش فرایندهای ساخت نظیر جوشکاری، خمکاری، نورد، تنش زدایی، و... گاهی در سلامت و کیفیت تجهیز اثر منفی دارد. در نتیجه یافتن نقطه بهینه در طراحی و ساخت دستگاه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در کنار ضریب اطمینان، عامل دیگری بنام Margin of Design نیز هست، که در عین مشابهت، با ضریب اطمینان تفاوت‌دارد. توضیح مقوله اخیر در حوصله این مقاله نیست و فرصت دیگری می طلبد.

ضریب اطمینان

ضریب اطمینان $S_F = \frac{strength}{stress} > 1$ عبارت است از نسبت مقاومت آلیاژها به حداکثر تنشی که احتمال دارد برای تجهیز، در حین کار کردن رخ دهد. معمولا مبنای ضریب اطمینان را برای مواد ترد Brittle، تنش کششی Tensile Stress و برای مواد چکش خوار Ductile، تنش پلاستیک یا تسلیم Yield Stress در نظر می گیرند.

- ضریب اطمینان دو کارکرد اصلی دارد:

الف) سبب اطمینان به کارکرد تجهیز می شود.
ب) سطح اطمینان دستگاه را بصورت کمی تعریف می کند.

- مقدار ضریب اطمینان در درجه اول بستگی دارد به:

- سطح تکنولوژی طراحی و ساخت دستگاه

هرچه در طراحی و ساخت دستگاه از تکنولوژی پیشرفته‌تری استفاده شود، مقدار ضریب اطمینان می تواند کاهش یابد.

- میزان مرغوبیت مواد

با افزایش سطح کیفی مواد و استفاده از مواد مرغوبتر در ساخت دستگاه، می‌توان اندازه ضریب اطمینان را کاهش داد. مثلا در صنایع فضایی که سبکی وزن دستگاه‌ها بسیار مهم است اما جنبه‌های اقتصادی اهمیت زیادی ندارد، تمام تلاش مهندسان صنعت فضایی معطوف به کاهش وزن تجهیزات است، در نتیجه با آزمایش‌های گران‌قیمت و سخت‌گیرانه از مواد با سطح کیفیت بالا استفاده می‌شود و ضریب اطمینان آنها برابر ۱ است. در هواپیمای جنگی که با حفظ سبکی وزن، برای ایمنی بیشتر، به صندلی پرتاپ و چتر خلبان مجهز می شود، ضریب اطمینان را در حدود ۱,۲ در نظر می گیرند. در هواپیماهای مسافری نیز که هر سه عامل، سبکی وزن هواپیما، جنبه‌های اقتصادی و ایمنی مسافران اهمیت دارد، ضریب اطمینان حداکثر ۱,۵ مرسوم است.

- عمر دستگاه

عمر مورد انتظار از دستگاه، عامل دیگری است که در تعیین سطح ضریب اطمینان تاثیر دارد. مثلا در طراحی و ساخت موشک، به دلیل یک بار مصرف بودن، ضریب اطمینان ۱ را در نظر می گیرند. عمر طرح‌های مبتنی بر B31.1 در حدود ۴۰ سال و عمر سایت‌های مبتنی بر استاندارد B31.3 معمولا بین ۲۵ تا ۳۰ سال در نظر گرفته می‌شود. دلیل اصلی اختلاف ضریب اطمینان دو استاندارد هم در این نکته نهفته است.

- میزان خطای انسانی در طراحی و ساخت

استفاده از متدهای بروز مدیریت کیفیت، و تکنیک‌های دقیق بازرسی، می‌تواند سبب کاهش احتمال خطای انسانی، هنگام ساخت شود. در چنین حالتی مقدار ضریب اطمینان نیز می تواند کم گردد. مثلا ضریب اطمینان در کد ASME Sec VIII Div2 که الزام به استفاده از مواد با کیفیت تر و بازرسی دقیق‌تری دارد، به میزان قابل توجهی کمتر از SEC VIII Div1 است.

- میزان خطر دستگاه برای انسان

هرچه دستگاه ها برای انسان و محیط زیست خطرناک‌تر باشد، از ضریب اطمینان بالاتری برخوردارند.

❑ از زاویه روش تعیین اندازه، ضریب اطمینان به دو طبقه کلی تقسیم می گردد:

۱) ضرایب اطمینانی که بطور اختصاصی برای هر دستگاه محاسبه یا انتخاب می شود.

۲) ضرایب اطمینانی که توسط استاندارد، کد یا دستورالعمل دولتی، بطور کلی برای انواعی از دستگاه ها مشخص می گردد. استانداردهای ASME B & PV و B31 از این روش تبعیت می کنند.

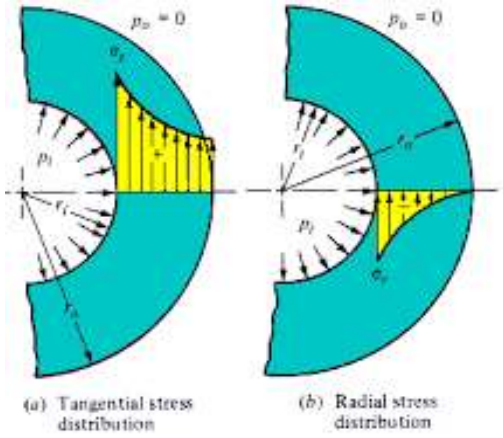
❑ ضریب اطمینان را از منظر اثر تنش نیز می توان طبقه بندی کرد:

الف) ضریب اطمینان متوسط Central Factor of Safety

ضریبی است که بطور کلی، مبنای محاسبه دستگاه قرار می گیرد و از تفاوت آن با ضریب تنش‌های دیگری که ممکن است بطور همزمان در اجزای غیر اساسی دستگاه پیش آید، صرف نظر می شود. ضریب طراحی Sec VIII Div1 از این نوع است.

ب) ضریب اطمینان محدود Partial Factor of Safety

در طراحی و ساخت دستگاه‌هایی بکار می رود که در یک جز یا اجزا آنها، بصورت همزمان، باید انواع تنش، نظیر تنش کششی یا برشی را مد نظر قراردهند. ضریب اطمینان ASME Sec VIII Div2 در برخی موارد و ضریب اطمینان Sec VIII DIV3 همواره از این نوع است. در مخازن تحت فشار جداره ضخیم استوانه‌ای که تنش‌های متفاوتی در لایه‌های مختلف ضخامت بدنه رخ می‌دهد صرفا این نوع ضریب کاربرد دارد.



شکل۱- توزیع تنش در ظروف تحت فشار استوانه ای جداره ضخیم

روش های تعیین ضریب اطمینان

برای تعیین ضریب اطمینان روشهای مختلفی مرسوم است. اغلب قریب به اتفاق روش‌های تعیین ضریب، بعد از جنگ جهانی دوم تدوین شدند.

برخی از آنها عبارتند از:

۱) روش Fish Bone Causes and Effects diagram
۲) روش Affinity Diagram and Design Failure Mode
۳) روش Reliability
۴) روش Visodic Safety Factor Model
۵) روش Norton Safety Factor Model
۶) روش Pugsley Safety Factor Model
۷) روش Misc. Safety Factor Model

برای آشنایی بیشتر، روش شماره ۴ یا روش Visodic Safety Factor Model به عنوان نمونه تشریح می شود. روش تجربی جوزف ویسودیچ در ۱۹۴۸ بر مبنای ضریب متوسط Central Factor of Safety طرح گردید. مبنای ضریب اطمینان برای مواد چکش‌خور Ductile مقایسه با تنش تسلیم و برای مواد ترد Brittle مقایسه با تنش کششی است. ضریب اطمینان برای دستگاه هایی که تحت بارهای سیکلی Cyclic Loading قرار دارد، دو برابر دستگاه هایی در نظر گرفته می شود که تحت بارهای غیر سیکلی است.

Table 1. Recommended Central Safety Factors for Ductile Materials based on Yield Strength [Shigley & Mischke, 2001, P. 25]

Safety Factor	Knowledge of Loads	Knowledge of Stress	Knowledge of Material	Knowledge of Environment
1.2-1.5	Accurate	Accurate	Well Known	Controllable
1.5-2.0	Good	Good	Well Known	Constant
2.0-2.5	Good	Good	Average	Ordinary
2.5-3.0	Average	Average	Less Tried	Ordinary
3.0-4.0	Average	Average	Untried	Ordinary
3.0-4.0	Uncertain	Uncertain	Better Known	Uncertain

جدول۱- ضریب اطمینان آلیاژهای چکش خور بر مبنای تنش تسلیم

گرچه روش‌های دیگر تعیین ضریب اطمینان در اینجا توضیح داده نشده است اما برای مزید اطلاع جدول مقایسه روش‌های وسودیچ، نورتون و پاگسلی در ذیل آمده است.

Table 6. A Comparison of Safety Factor Models

Test Cases	Visodic	Norton	Pugsley
1. **Commercial aerospace structure** – Very well tested materials and structures. Well Characterized loads. Predictable service environment. Periodic inspection and maintenance throughout long life. Failure usually results in high risk to many human lives. (A SF of 1.5 is expected.)	1.2-1.5	1.3	1.4
2. **Trailer hitch coupler** – Defined maximum loads by class. Occasional service loads 2-3 times defined maximums. Corrosive environment. Cyclic and impact loading. Very little inspection and maintenance during moderately long life. Failure may result in high risk to human life.	4.5-6.0	4.0	4.0
3. **Large utility power transformer** – Well defined maximum loads. Occasional service loads 1-2 times normal. Cyclic and impact loading. Predictable but challenging service environment. Periodic inspection and maintenance throughout very long life. (A SF of 5 is customary.)	3.8-5.0	4.0	3.8

جدول ۲- مقایسه ضرایب پیشنهادی در روش های ویسودیچ، نورتون و پاگسلی

ضریب ایمنی در ظروف تحت فشار ASME

در میانه قرن نزدهم ریاضی دان و مهندس خود ساخته انگلیسی بنام پیتر بارلو (1776-1862) Peter Barlow فرمولی تجربی را برای نسبت تنش، فشار و ضخامت در ظروف تحت فشار استوانه ای، پیشنهاد کرد که تا امروز بهترین فرمول پیشنهادی است و علیرغم تغییراتی که در آن اعمال شد، اساس آن هم چنان پا برجا است. فرمول بارلو به این صورت است $t=PD/2S$ ، که در آن:

P ، فشار کاری ظرف تحت فشار

D ، قطر خارجی

t ، ضخامت جداره

و S ، حداکثر تنش کششی Ultimate Tensile Strength فولاد بود.

در اولین ویرایش استاندارد Sec VIII Div1 انجمن مهندسان مکانیک آمریکا، از فرمول بارلو استفاده کردند و برای ایمنی بیشتر، فرمول را تغییر دادند و به این صورت درآوردند.

$$P = \frac{Ts \times t \times E}{R \times Fs}$$

P = maximum allowable pressure (psi)
Ts = ultimate tensile strength (psi)
t = minimum thickness of shell (inch)
E = efficiency of longitudinal joints
R = inside radius (inch)
Fs = factor of safety

در فرمول فوق برای ضریب ایمنی Fs عدد ۴ را در نظر گرفتند و به همین دلیل است که معروف شد، ضریب ایمنی کد Sec VIII Div1 برابر ۴ است. با پیشرفت دانش متالورژی و استاندارد شدن آلیاژها سعی شد که برای تعیین ضریب ایمنی روشی مهندسی‌تری اتخاذ گردد. در نتیجه با تهیه جداولی از تقسیم حداکثر تنش کششی آلیاژها در دمای معین بر عدد ۴، مفهومی بنام تنش مجاز Allowable Stress پدید آمد که بتدریج علاوه بر مقایسه با حداکثر تنش کششی با تنش الاستیک Yield Stress آلیاژ نیز مقایسه شد. تا سالهای ۱۹۹۰ جداول مشخصات Properties در درون Sec VIII جای داشتند و بعدها در Sec II part D جای گرفتند و بصورت مستقل منتشر گشتند. ضریب ایمنی ۴ تا انتشار نسخه جدید Sec VIII Div1 در سال ۲۰۰۱ میلادی استمرار داشت. در این چاپ بر اساس الحاقیه Addenda ۱۹۹۹ ضریب ایمنی را از ۴ به ۳,۵ کاهش دادند و به این ترتیب بعد از سالها، جداول مشخصات مکانیکی آلیاژها دستخوش تغییرات جدی گشت و تنش مجاز آلیاژها در حدود ۱۴درصد افزایش و حداقل ضخامت بدنه هم حدود ۱۲,۵درصد کاهش یافت. باید در نظر داشت که ضریب اطمینان ظروف تحت فشار، به صورت یک سان برای تمام اجزا و لوازم صدق نمی کند و ضریب اطمینان، برخی از اجزا، شیرها، لوازم کنترل فشار و ... بر اساس استاندارد طراحی و ساخت آن‌ها، یا ملاحظات ایمنی، ممکن است تفاوت‌هایی با ضریب ایمنی کلی Central داشته باشد. مثلا در کد طراحی و ساخت بویلرها Sec I بندPG-31 علیرغم ضریب اطمینان کلی ۳,۵ ، تاکید شده است که ضریب اطمینان مسدود کننده ها نباید از ۴ کمتر باشد. در Appendix X کد B31.3 برای طراحی لوله های غیر فلزی بند X302.1.1 نیز تصریح شده است که ضریب اطمینان برای Squirm Pressure از ۲,۲۵ نباید کمتر شود.

نمونه جدول های تعیین تنش

در ذیل چهار جدول از جدول‌های تنش برای کدهای مختلف ASME برای مقایسه انتخاب شده است. برای سهولت مقایسه از میان صدها آلیاژ، فولاد کربنی A106 Gr B که مخصوص لوله بدون درز است و در صنعت نفت بصورت وسیع استفاده می شود، انتخاب گشت.

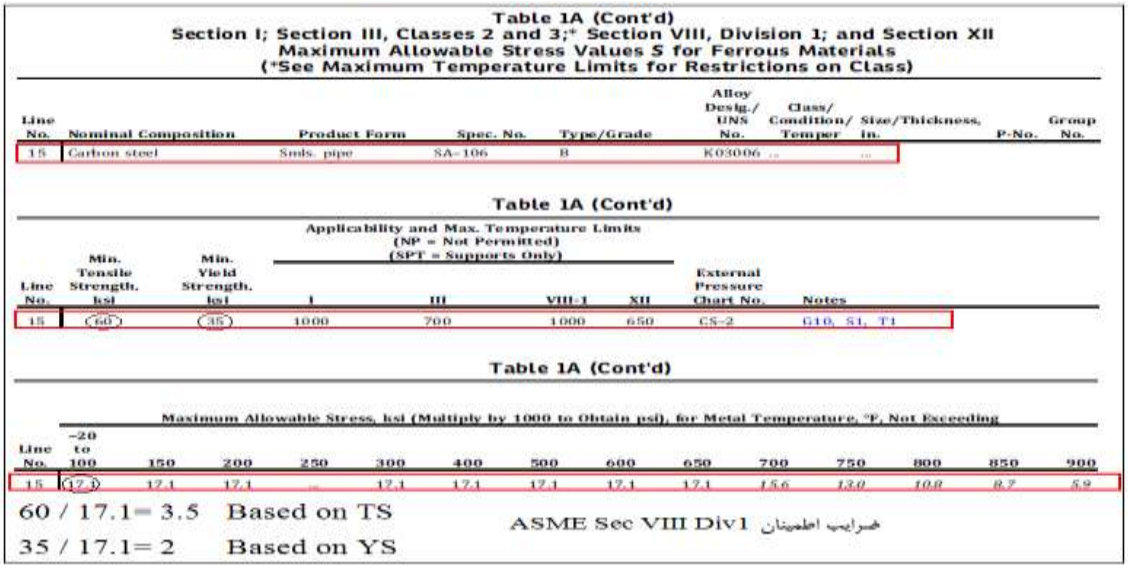


Table 1A (Cont'd)
Section I; Section III, Classes 2 and 3;* Section VIII, Division 1; and Section XII
Maximum Allowable Stress Values S for Ferrous Materials
(*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/Thickness, in.	P-No.	Group No.
15	Carbon steel	Smls. pipe	SA-106	B	K03006	..	..		

Table 1A (Cont'd)

Line No.	Min. Tensile Strength, ksi	Min. Yield Strength, ksi	Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only) I	III	VIII-1	XII	External Pressure Chart No.	Notes
15	60	35	1000	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T1

Table 1A (Cont'd)

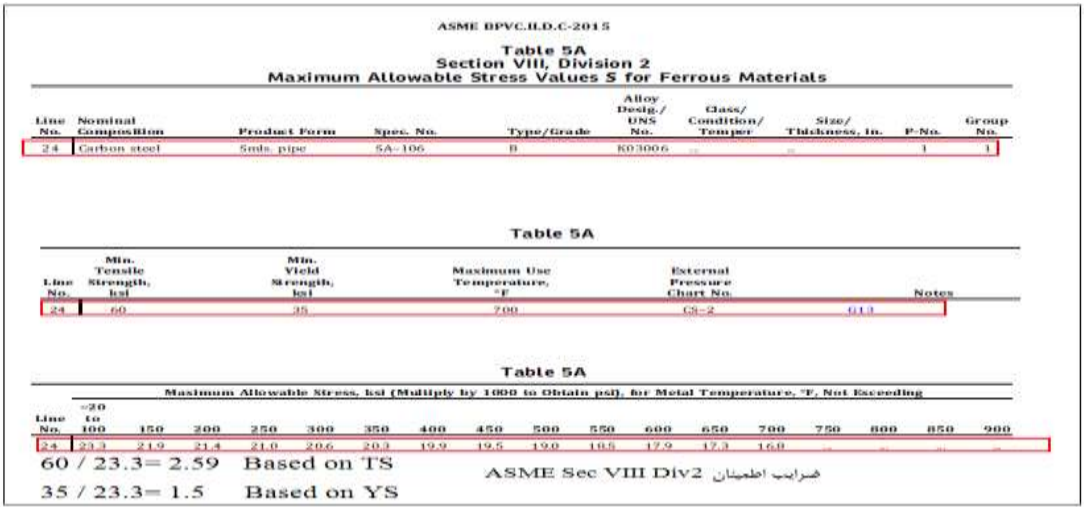
Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding

Line No.	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900
15	17.1	17.1	17.1	..	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	15.6	13.0	10.8	8.7	5.9

60 / 17.1= 3.5 Based on TS
35 / 17.1= 2 Based on YS

ASME Sec VIII Div1 ضرایب اطمینان

شکل ۲- نمونه جدول تنش ASME Sec II Part D که تنشها را برای ASME Sec VIII Div1 مشخص کرده است



ASME BPVC.II.D.C-2015

Table 5A
Section VIII, Division 2
Maximum Allowable Stress Values S for Ferrous Materials

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/ Thickness, in.	P-No.	Group No.
24	Carbon steel	Smls. pipe	SA-106	B	K03006	..	..	1	1

Table 5A

Line No.	Min. Tensile Strength, ksi	Min. Yield Strength, ksi	Maximum Use Temperature, °F	External Pressure Chart No.	Notes
24	60	35	700	CS-2	G13

Table 5A

Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding

Line No.	-20 to 100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
24	23.3	21.9	21.4	21.0	20.6	20.3	19.9	19.5	19.0	18.5	17.9	17.3	16.0	..	..	..	..

60 / 23.3= 2.59 Based on TS
35 / 23.3= 1.5 Based on YS

ASME Sec VIII Div2 ضرایب اطمینان

شکل۳- نمونه جدول تنش ASME Sec II Part D که تنشها را برای ASME Sec VIII Div2 مشخص کرده است

با مقایسه شکل‌های ۲ و ۳ روشن است که برای فولادی یکسان در Sec VIII Div2 نسبت به Div1 ، اجازه استفاده از تنش بالاتری وجود دارد. به عبارت دیگر در شرایط یکسان، مخزن طراحی شده با Div2 ضخامت کمتری در مقایسه با Div1 خواهد داشت. البته در این مقاله هدف صرفامقایسه ضرایب اطمینان با هم است، و منظور این نیست که ساخت مخزن با Div2 به دلیل ضریب اطمینان کمتر، همواره

مناسب تر خواهد بود. بدلیل هزینه بالای آزمایش‌های کیفیت مواد و غیر مخرب حین ساخت، اگر مخزنی با فشارهای متوسط فرض شود، ساخت مخزن با Div1 ، علیرغم ضریب اطمینان بالاتر، در اکثر قریب به اتفاق مواقع، مقرون به صرفه‌تر است.

در شکل های ۴ و ۵ ذیل، تنش های مجاز دو استاندارد معروف لوله کشی تحت فشار، بر مبنای فولاد A106 Gr B با هم مقایسه شده اند. دلیل اصلی تنش مجاز کمتر و ضریب اطمینان بیشتر در کد B31.1 نسبت به B31.3 را باید در طول عمر طرح هایی که با این دو استاندارد طراحی می شوند، جستجو کرد. همان طور که قبلا ذکر شد، عمر پروژه هایی که با B31.1 طراحی می شود، حدود ۴۰ سال و عمر سایت هایی که با B31.3 طراحی می گردد، بین ۲۵ تا ۳۰ سال در نظر گرفته می شود. در شرایط یکسان طراحی، ضخامت لوله در B31.1 بیشتر از لوله ای است، که با B31.3 طراحی گردد.

ASME B31.3-2014

Table A-1 Basic Allowable Stresses in Tension for Metals (Cont'd)

Numbers in Parentheses Refer to Notes for Appendix A Tables; Specifications Are ASTM Unless Otherwise Indicated

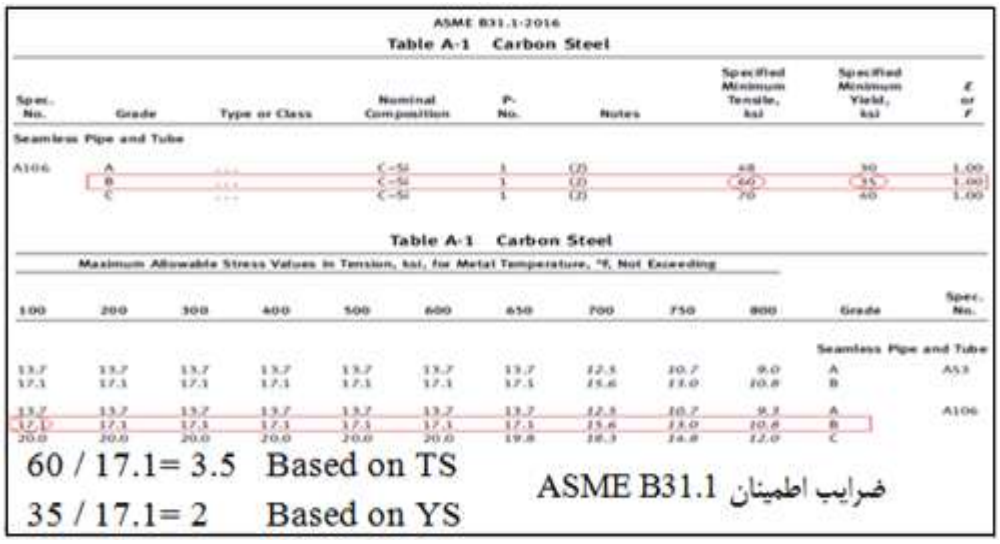
Material	Spec. No.	Type/ Grade	UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size, in.	P-No. (5)	Notes	Min. Temp., °F (6)	Specified Min. Strength, ksi Tensile	Yield	Min. Temp. to 100	200	300
...	A106	B	K03006	...	...	1	(57)	B	60	35	20.0	20.0	20.0

60 / 20= 3 Based on TS

35 / 20= 1.75 Based on YS

ضرایب اطمینان ASME B31.3

شکل ۴- نمونه جدول تنش ASME B31.3



شکل۵- نمونه جدول تنش ASME B31.1

منابع

۱) یحیی پور سیروس، طراحی سیستمهای لوله کشی تحت فشار، در دست انتشار

2) ASME Sec II Part D, 2015

3) ASME B31.3, 2014

4) ASME B31.1, 2016

5) Shigley, Joseph. Mischke, Charles R. *Mechanical Engineering Design*, McGraw Hill, (2001).

6) Darlaston, John. Wintle, John. "*Safety factors in the design and use of pressure equipments*", Engineering Failure Analysis. (2007)