مقدمه :

قبل از انقلاب استفاده از فولاد اعلاء *High Strength Steel* در ساختمان در مورد ساختمانهای صنعتی و قابهای شیبدار در ایران مرسوم بوده است چرا که نسبت ریالی فولاد اعلا به فولاد معمولی از نسبت مقاومت آنها کمتر بود . آنچه در ایران بعنوان فولاد پر مقاومت شناخته می شد ردیف فولاد $St-52$ بود و فولاد های معمولی با انواع $St-33$ و $St-37$ مشخص می گردید که نوع اخیر آن معمول تر بوده است.

به بهانه آنکه شرکت فولاد مبارکه اصفهان بعد از گذشت حدود بیست و هفت سال محرومیت از وجود ورقهای فولاد اعلاء به تولید آن پرداخته ، این مقاله به رشته تحریر در آمده و در سمینار "کاربرد فولادهای پراستحکام در سازه های فولادی " بخشی از آن ارائه گردیده است.امید است که دست اندرکاران محاسبات و طراحی سازه ها با استفاده از این فولاد ، بتوانند زمینه استفاده از آنرا هر چه بیشتر فراهم آورند.

استفاده از فولاد اعلاء در ساختمان

استفاده از فولاد اعلاء در سازه های فولادی به اواسط قرن بیستم بر می گردد . قطعات خمشی و فشاری که باید بارهای زیادی را تحمل کنند با استفاده از فولاد اعلاء از مقاطع ظریفتر و مناسبتر برخوردار خواهند بود.

انواع فولاد :

مشخصات فولاد آمریکایی طبق جدول شماره ۱ میباشد .

TABLE 1
Availability of Shapes, Plates and Bars According to ASTM Structural Steel Specifications

Steel Type	ASTM Designation	F_y Minimum Yield Stress (ksi)	F_u Tensile Stress[a] (ksi)	Shapes: Group per ASTM A6 [b]1	Shapes: Group per ASTM A6 2	Shapes: Group per ASTM A6 3	Shapes: Group per ASTM A6 4	Shapes: Group per ASTM A6 5	Plates and Bars: To ½" incl.	Over ½" to ¾" incl.	Over ¾" to 1¼" incl.	Over 1¼" to 1½" incl.	Over 1½" to 2" incl.	Over 2" to 2½" incl.	Over 2½" to 4" incl.	Over 4" to 5" incl.	Over 5" to 6" incl.	Over 6" to 8" incl.	Over 8"
Carbon	A36	32	58–80																
		36	58–80[c]	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
	A529	42	60–85	■					■										
High-Strength Low-Alloy	A441	40	60													■	■	■	
		42	63				■	■					■	■	■				
		46	67			■					■	■							
		50	70	■	■				■	■	■	■							
	A572 Grade 42	42	60	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	A572 Grade 50	50	65	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
	A572 Grade 60	60	75	■	■				■	■	■								
	A572 Grade 65	65	80	■	■				■	■	■								
Corrosion-Resistant High-Strength Low-Alloy	A242	42	63				■	■					■	■	■				
		46	67			■					■	■							
		50	70	■	■				■	■									
	A588	42	63														■	■	
		46	67													■			
		50	70	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Quenched & Tempered Alloy	A514[d]	90	100–130													■	■	■	
		100	110–130						■	■	■	■	■	■					

[a] Minimum unless a range is shown.
[b] Includes bar-size shapes.
[c] For shapes over 426 lbs./ft. minimum of 58 ksi only applies.
[d] Plates only
■ Available.
□ Not available.

همان طوری که در این جدول مشاهده میشود حدوداً از سال 1960 به بعد عملاً فولاد $A33$ که معادل فولاد $St-37$ با تنش جاری شدن حدود 2400 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع (هر کیلو گرم بر سانتیمتر مربع 0.09806 نیوتن بر میلیمتر مربع است)، از رده خارج شده و حداقل فولاد $A36$ با تنش جاری شدن 2530 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع مورد استفاده قرار میگیرد. ($A36$ به مفهوم تنش جاری شدن فولاد در $KIPS36$ است. هر $KIPS$ معادل 70.4 کیلو گرم بر سانتیمتر مربع میباشد).

فولادهای اعلاتر با آلیاژ کم (*HIGH STREGHT LOW ALLOY*) در استاندارد *ASTM* معادل $A441$ و $A572$ می باشد که معادل $St-52$ اروپایی است. نوع فولادهای ارائه شده توسط فولاد مبارکه اصفهان از نوع $St-33$، $St-37$ و $St-52-3$ بوده که دومی از نوع فولادهای معمولی و سومی از انوع فولاد اعلاء است.

اقسام فولادهای ساختمانی با استاندارد *DIN* به شرح زیر می باشند :

۱- فولاد $St-37$ یا فولاد نرمه معمولی که موارد استعمال آن فوق العاده زیاد است و اغلب ساختمانهای فلزی از این نوع ساخته می شود.

۲- فولاد $St-33$ فولاد ساختمانی تجارتی است که مشخصات آن بخوبی فولاد $St-37$ نمی باشد.

۳- فولاد $St-34$ مورد استعمال آن در میخ پرچ برای اتصال فولاد $St-37$ است.

۴- فولاد $St-38$ مورد استعمال آن در پیچ است که برای اتصال فولاد $St-37$ مصرف می شود.

۵- فولاد $St-42$ در ورقهای نوع خوب و مخصوصاً برای کارهای کشتی سازی مصرف دارد.

۶- فولاد $St-44$ فولاد نوع اعلاء که هم در کارهای ساختمانی و هم در ساختن میخ پرچ برای اتصال فولادهای $St-52-3$ مصرف دارد.

۷- فولاد $St-52$ یا $St-52-3$ فولاد بسیار اعلاء با مقاومت زیاد است که برای ساختمانهای مهم و پلها با دهانه های بزرگ مورد استفاده دارد .

فولادهای $St-33$، $St-37$ و $St-52$ بیش از انواع دیگر در کارهای ساختمانی مورد استفاده قرار می گیرند .

فولادهای $St-34$، $St-42$، $St-50$، $St-60$ و $St-70$ برای کشتی سازی و ساختن دیگ های بخار بکار میرود .

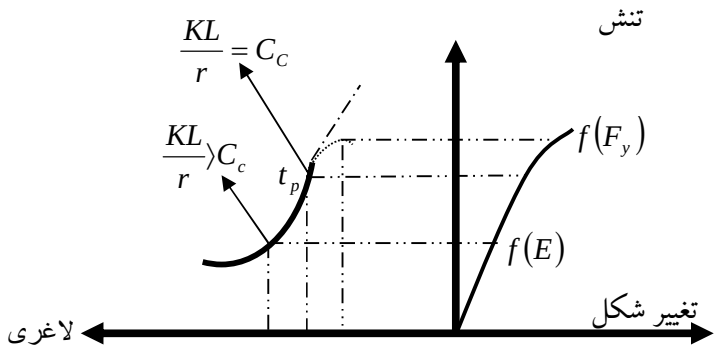
اعداد 52,44,37 و غیره حداقل مقاومت نهائی فولاد در آزمایش کشش استاندارد است که بر حسب کیلوگرم بر میلیمتر مربع نوشته می شود .

دلایل استفاده از فولاد اعلاء :

همان طوری که مشخص است ملاک اولیه محاسبات ، مقاومت یکه یا مشخصه می باشد . بنابراین چه در سازه های بتنی و چه در سازه های فولادی ، اعلاء بودن فولاد مورد توجه قرار گرفته است. کارآئی این استفاده ، درتنش کششی بیشتر از استفاده در تنش فشاری است، حال چه کشش مستقیم و چه کشش ناشی از خمش باشد. طبیعی است که قطعات طراحی شده با فولاد اعلاء ظریفتر است . در فشار مسائل شعاع ژیراسیون و کمانش کلی یا موضعی مطرح میباشد و بنابراین ممکن است به علت کمانش ، از کلیه ظرفیت باربری قطعه (به علت ظرافت) نتوان بهره گرفت . در حالی که در کشش چنین نیست و معمولاً از کلیه ظرفیت قطعه میتوان استفاده نمود. دلیل این امر آن است که بالاترین لاغری مربوط به کمانش غیر ارتجائی یا بالاترین تنش مربوط به کمانش ارتجاعی ($\frac{KL}{r}=C_c$) مرزی است که در پائین تر از این لاغری ، تنش مجاز باربری تابع f_y می باشد و در بالاتر از این حد ، تنش

مجاز باربری تابع E میباشد . بنابراین استفاده از فولاداعلاء در فشار وقتی مناسب است که $\frac{KL}{r}\langle C_c$ باشد $\left(C_c = \sqrt{\frac{®^2 E}{F_y}}\right)$ و در بالاتر از این حد لاغری عملاً نوع فولاد تاثیری در باربری نخواهد داشت چرا که تابع F_y نیست و فقط تابع E است که برای فولادها ، یکسان می باشد .

شکل منحنی باربری و رابطه آن بشرح زیر است :



در عمل براحتی و با مصرف مقدار کمی دانش ، می توان مقدار $\frac{KL}{r}$ را بواسطه کم کردن در طول کمانش کاهش داد و بنابراین با جلوگیری از کمانش ، در فشار نیز از فولاد اعلاء بهره گرفت . در کشش نیز چون معمولاًبا مسئله کمانش مواجه نمی باشیم ، می توان از تمامی تنش مجاز فولاد اعلاء بهره گرفت .

محاسبات نشان می دهد که بهای فولاد مصرفی برای یک تیر (با دهانه بلند) حدود 25 در صد و برای ستونها حدود 10 تا 15 در صد کاهش خواهد داشت .

اگر چه اعداد فوق به شدت به طراحی مربوط می باشند ولی دور از واقعیت نیستند. استفاده از فولاد اعلاء در بال تیر و فولاد معمولی در جان تیر تجویز می گردد که آن

را تیر دو گانه (*HYBRID GIRDERS*) می نامند و تنش مجاز خمشی آن بر اساس آئینامه *AISC* :

$$F_b \leq F_b \left[\frac{12 + \frac{Aw}{A_f}\left(3\sim - \sim^3\right)}{12 + 2\left(\frac{Aw}{A_f}\right)} \right]$$

که درآن آلفا برابراست با تنش جاری شدن جان به تنش جاری شدن بال است. نکته بسیارمهم در طراحی فولادهای اعلاء آنست که فولاد دارای نرمی متعادل جهت جذب انرژی باشد .

فولادهایی که با زیاد کردن کربن و یا منگنز سخت می شوند ، خاصیت شکل پذیری *DUCTILITY* خود را از دست داده و به نوع ترد شکن *BRITTLE* تبدیل می شوند . مشکل این گونه مصالح آن است که خاصیت جذب انرژی خود را ندارند و بعضاً با تغییر شکل کم، در هنگام خرابی استفاده کننده را ازخطر بی اطلاع می گذارندو در مقابل ضربه نیز حساس می باشند . انواع حاضر فولاد اعلاءکارخانه مبارکه از *ELONGATION* بالا برخوردار بوده و حدود آن از استاندارهای جهانی (حدود 21 در صد) زیادتر (بین 21 تا 41 در صد) می باشد .

جوش پذیری این فولاد کم آلیاژ ، نیز تامین گشته است .

۱- آنالیز شیمیایی

نوع فولاد	%C	%mn	%Si	%P Max	%S Max	%Al Max	%Nb	N PPM	Ce (کربن معادل)
St ۳۷٫۲	۰٫۱۲۰-۰٫۱۷۰	۰٫٤۰۰-۰٫۱۷۰	۰٫۳۰۰	۰٫۰۲۵	۰٫۰۲۳	۰٫۰۸	—	۱۲۰	۰٫۱۸۷-۰٫۳۲۰
St ۵۲٫۳	۰٫۱۳۰-۰٫۱۷۰	۰٫۷۵۰-۱٫۰۵	۰٫۱۵۰-۰٫۳۵	۰٫۰۲۵	۰٫۰۱۱	۰٫۰۳۵	۰٫۰۱۵-۰٫۰۵۰	۷۰	۰٫۲۵۵-۰٫۳٤۵

۲- خواص مکانیکی

Elongation	Ultimate Tensile Strength	Yield Point	**نوع فولاد**
%	**N/mm**	N/mm	
۲۷-۴۰	۳۵۰-۴۷۰	۲۴۰-۳۸۰	St ۳۷٫۲
۲۱-۴۱	۴۹۰-۵۹۰	۳۶۴-۴۸۰	St ۵۲٫۳

سابقه استفاده :

استفاده از فولادهای اعلاء سالهای 1350 به بعد در ایران در ساخت ساختمانهای صنعتی و پلهای ، رایج و متداول بوده است .

شرکت آکام فلز و سولیران با استفاده از فولاد $St-52-3$ پوشش دهانه های تا 60 متر را توسط طراحی آقای دکتر مارکار گریگوریان برای انبارهای آپرین به انجام رسانیده ، که بزرگترین دهانه ساختمانهای قابهای شیبدار می باشد و استفاده از این نوع فولاد در آن شرکت ها رایج بوده است .

شرکت صنایع فلزی ایران نیز بسیاری از پلهای خود را بر اساس فولاد $St-52-3$ طراحی نموده است . مطمئناً شرکتهای دیگر نیز به استفاده از این نوع فولاد دست زده اند که نگارنده از آن بی اطلاع می باشم .

جمع بندی :

با توجه به سوابق استفاده در دنیا از فولادهای اعلاء و سابقه استفاده موفق در ایران و نکات مثبت طراحی اقتصادی و ظرافت طراحی ، مخصوصاً در دهانه های بلند و ساختمانهای مرتفع ، جوش پذیری مناسب و شکل پذیری ($DUCTILITY$) استفاده از این نوع فولاد که یک دستاورد ملی است را به کلیه دست اندرکاران طراحی و اجرا توصیه مینماید .

تفسیر *commentary*

مقدمه :

برای استفاده بیشتر مهندسین محاسب بخش زیر تحت عنوان تفسیر به توضیح طراحی می پردازد .

موضوع :

همانطوریکه در موضوع مقاله آورده شد ، فولادهای اعلاء در کشش رفتار بسیار مناسبی از خود نشان می دهد ، اما این موضوع به رفتار این فولاد در فشار بر نمی گردد و باید در طراحی توجه کافی به آن مبذول داشت .

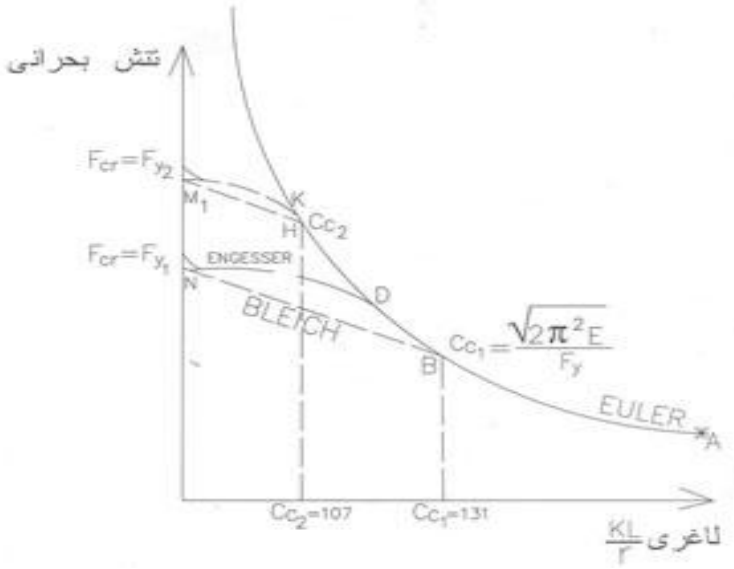
همانطوریکه در شکل (۱) مشاهده می شود . منحنی تنش بحرانی (F_{cr}) در مقابل تنش بحرانی $\left(\frac{KL}{r}\right)$ ترسیم می گردد . این منحنی معروف به رابطه *EULLER* بوده و به صورت : $F_{cr} = \frac{®^2 E}{\left(KL/r\right)^2}$ می باشد. .

انگسر *ENGESSER* رابطه خود را با توجه به ضریب ارتجاعی مماسی (E_t) مطرح نموده است که به صورت: $F_{cr} = \frac{®^2 E_t}{\left(KL/r\right)^2}$ می باشد .

بلیچ *BLEICH* با استفاده از رابطه انگسر و پیش بینی تنش پس ماند (Residual stress) برابر $F_R = \frac{F_y}{2}$ که در آن F_y تنش جاری شدن فولاد است رابطه انگسررا تبدیل به رابطه زیر می نماید :

$$F_{CR} = F_y\left[1 - \frac{Fy}{4®^2 E}\left(\frac{KL}{r}\right)^2\right]:$$

هر کدام از منحنی ها روی شکل (۱) آمده است .



شکل (۱)

$$F_{cr}=\frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}\ \text{EULER}$$

$$F_{cr}=\frac{\pi^2 Et}{(KL/r)^2}\ \text{ENGESSER}$$

BLEICH $$F_{cr}=F_y\left[1-\frac{F_y}{4\pi^2 E}(KL/r)^2\right]$$

برای هر نوع فولاد قسمت منحنی اولر کمانش ارتجاعی و بخشی منحنی انگسر ، بلیچ را کمانش غیر ارتجاعی برای آن نوع فولاد می نامند .

برای روشن شدن بهتر موضوع در شکل (۲) روی منحنی تنش تغییر شکل هر بخش از این منحنی آورده شده است .

همانطوریکه دیده می شود در لاغری های زیاد (بین A,B) تنش های اعلاء فولاد هیچگونه تاثیری در تنش بحرانی قطعه نخواهد داشت . در بین نقطه (B,H) تنش های اعلاء فولاد در فشار نقش بازی می کند .

نقطه لاغری حدی را C_C یا *PROPERTIONAL LIMIT* نامیده شده و حد کمانش ارتجاعی از غیر ارتجاعی است و با برابر گذاشتن رابطه اولر با بلیچ بدست می آید .

$$\frac{KL}{r}=\sqrt{\frac{2\pi^2E}{Fy}}$$

این لاغری حدی برای فولاد $ST-37$ تقریبا" عدد $\frac{KL}{r}=131$ برای فولاد $ST-52-3$ برابر $\frac{KL}{r}=107$ می باشد .

آئینامه *AISC* برای طراحی قطعات فشاری در دامنه ارتجاعی ضریب اطمینان (*SAFTY FACTOR*) ثابت معادل :

$$SF=\frac{23}{12}=1.92$$

و برای طراحی در دامنه غیر ارتجاعی ضریب اطمینان متغیر برابر با:

$$S.F=\frac{5}{3}+\frac{3}{8}\frac{KL/r}{C_c}-\frac{(KL/r)^3}{8C_c^{\,3}}$$

را معرفی می نمایند

مقدار ضریب اطمینان در مورد کمانش غیر ارتجاعی $1.66<SF<1.92$ می رسد .

(عدد 1.66 معکوس 0.60 می باشد که برای ضریب اطمینان فولاد در موارد طراحی مختلف معمولا" بکار میرود)

بنابراین مشاهده می شود که هر چه لاغری کوچکتر می شود ضریب اطمینان نیز کوچک میشود و F_{Cr} به سمت طراحی های اقتصادی تر پیش می رود .

جدول شمار (۱) نشان دهنده همین نکته است که در مورد قطعات فشاری ، اگر لاغری را بتوان کاهش داد ، می توان مقاطع اقتصادی تر طراحی نمود ، بدون آنکه برای نگهداری این قطعات ، مساحت زیادی فولاد لازم باشد .

در جدول (۱) دیده می شود که براساس آئینامه $AISC$ اگر لاغری $\frac{KL}{r} = 120$ باشد تنش های مجاز باربری برای هر دو نوع فولاد :

$$Fa = 750KG/Cm^2$$

$fa = fallowalde$ می باشد.

دیده می شود اگر این لاغری با نگهداری جانبی به یکدوم و یک چهارم برسد،مقادیر تنش ها چگونه برای هر دو فولاد زیاد شده و در عین حال فولاد اعلاء خواص خود را نشان می دهد .

جدول (۲) نشان می دهد برای باربری یک قطعه فشاری به مقدار $P = 22500KG$ مساحات لازم برای لاغری های مختلف چقدر میباشد . بطوریکه دیده می شود با کاهش لاغری به یک چهارم در مورد فولاد اعلا مساحت به حد $\frac{11/5}{30} = .38$ و برای فولاد معمولی به $\frac{16.6}{30} = .55$ کاهش می یابد که نشان دهنده سه نکته است :

اولا" ، لاغری تاثیرزیادی در طراحی قطعات فشاری دارد .

ثانیا" ، فولاد اعلاء در لاغری های کم ، تاثیر کیفیت فشاری خود را عیان می سازد .

ثالثا" ، مساحت قطعه نگهدارنده ، در مقابل مساحت صرفه جوئی شده بسیار ناچیز است .

نتیجه گیری :

استفاده از فولاد اعلاء درکشش و قطعات کششی تقریبا" درتمامی طراحی ها قابل تجویز میباشد ،

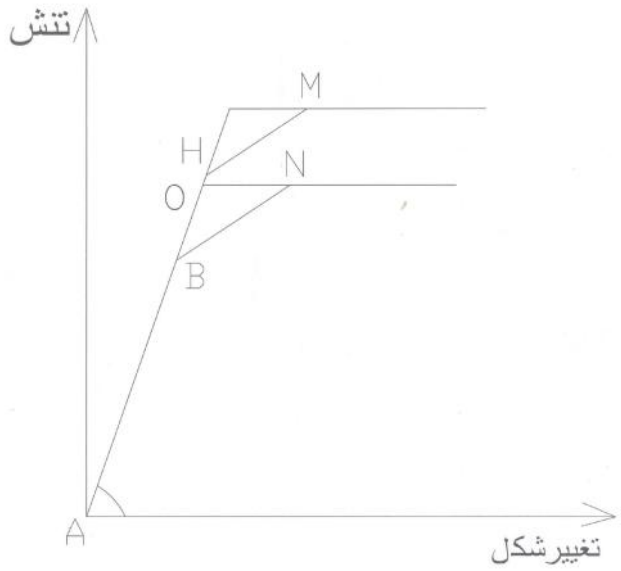
اما در مورد قطعات فشاری ، وقتی قابل تجویز می باشد که لاغری ها در حد کم بوده و حداقل از حد C_C برای فولاد درجه پائین تر کمتر باشد .

لاغری ←	30	60	120	نوع فولاد ↓
تنش های مجاز باربری *AISC*	1954	1638	750	*St*.52
	1334	1173	750	*St*.37

جدول ۱

لاغری ←	30	60	120	نوع فولاد ↓
مساحت لازم برای باربری ۲۲/۵۰۰ تن Cm^2 *AISC*	11.51	13.75	30	*St*.52
	16.86	19.18	30	*St*.37
	0.96	0.32	0	مساحت → نگهدارنده *AISC*

جدول ۲



شکل(٢)