# Study of Strengthening Methods of Steel Structures Using Prestressing

**وحید رضا کلات جاری [۱]، ابوالفضل عسکری [۲]، محمد حسین طالب پور [۳]**

**۱- استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود**

**۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود**

**۳- دانشجوی دکترا سازه، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود**

⋮

**Abstract**

Prestressing is considered as one of the most efficient methods of strengthening and retrofitting of structures. This approach has made significant progress in concrete structures, although in steel structures, less attention has been done. The lack of investigation in this field is so that this knowledge is almost unknown in Iran.

This paper reviews different methods of retrofitting steel structures by applying prestressing force. For this purpose, the concept and nature of prestressed steel and also methods such as prestressing with FRP laminates, using cables and rebar for prestressing, prestressing by pre-flex method has been studied. Finally, requirements of these methods, equipments and results, has been criticized and evaluated.

**Key Words: Retrofitting, Prestressing, Steel Structures.**

## ۱. مقدمه

امروزه دنیای علم با سرعت عجیبی رو به پیشرفت نهاده ودر این مسیر ترقی، ابداعات واکتشافات نقش بسیار مهمی را ایفا می کنند. اما قسمت عمده ای از این روند را بهینه سازی آنچه که در دست داریم تشکیل می دهد و بخش عظیمی از تلاش های علمی بر پایه استفاده بهینه از امکانات است. عرصه مهندسی عمران نیز مستثنی از این قاعده نیست وکاهش هزینه های ساخت وتولید، نگهداری، مقاوم سازی و نیز بیشینه استفاده از امکانات موجود همواره مد نظر بوده است. پیش تنیدگی از جمله کارآمدترین شیوه ها در راستای نیل به اهداف مذکور می باشد. این روش در عرصه سازه های بتنی پیشرفت قابل توجهی نموده و کاربرد گسترده ای دارد. در دهه های اخیر، مشاهده نتایج بسیار خوب این روش در سازه های بتنی دانشمندان را بر آن داشت تا این روش را در سازه های فولادی نیز مورد ارزیابی قرار دهند و همانطور که انتظار می رفت، این روش با پاسخگویی بسیار خوب چه از لحاظ اقتصادی و چه از لحاظ افزایش ظرفیت باربری، برخی از اهل علم را مجاب کرد تا به عنوان یک روش ارزنده بیشتر به آن بپردازند [۱، ۲].

نیاز به افزایش ظرفیت های باربری، الزامات معماری، کاهش هزینه ها و نیاز به ترمیم ومقاوم سازی سازه های فولادی موجود، مسایلی است که پیش تنیدگی، با پاسخگویی مناسب به آنها خود را به عنوان یک فن ایده آل معرفی نموده است. در کشور ما به جز موارد بسیار نادر از جمله، مقاوم سازی پل غازیان انزلی، این فن قدرتمند کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۳].

در این مقاله سعی بر آن است تا روش های متداول پیش تنیدگی سازه های فولادی مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، کلیات و چگونگی انجام هر روش مورد بحث قرار گرفته ودر نهایت سعی شده است تا ارزیابی جامعی نسبت به روش های متداول پیش تنیدگی ارائه گردد.

## ۲. مفهوم پیش تنیدگی

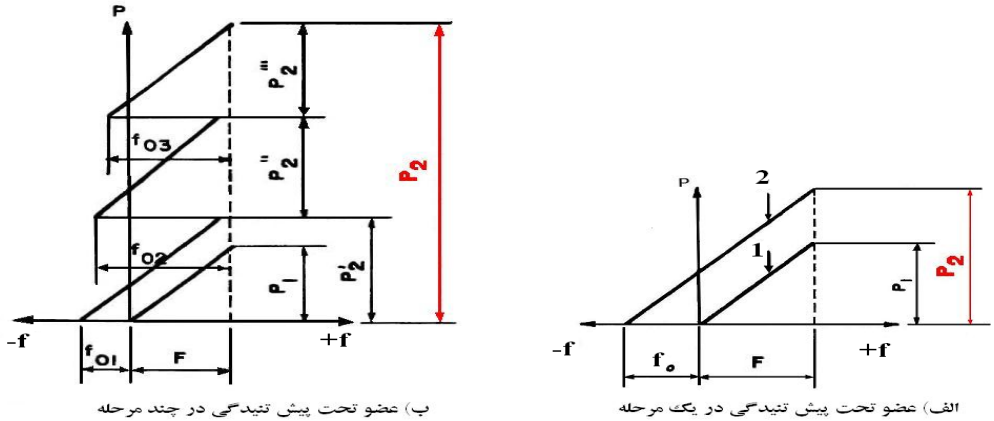
پیش تنیدگی عبارت است از ایجاد یک تنش ثابت و دائمی در یک عضو، به نحو دلخواه و به اندازه لازم، به طوری که در اثر این تنش، مقداری از تنش های ناشی از بارهای سرویس در این عضو خنثی شده و در نتیجه، مقاومت و باربری آن افزایش یابد. در سازه های فولادی پیش تنیده، تنش ها به صورت ساختگی ایجاد و اغلب در جهت عکس تنش های ناشی از بارگذاری اعمال می شوند. بر اساس شکل ۱- الف، با ایجاد پیش تنیدگی $f_0$ در یک سازه، تنشی در خلاف جهت تنشهای ناشی از بارگذاری خواهیم داشت. این تنش باعث افزایش دامنه محدوده ارتجاعی مصالح می شود. بدین منظوردر آغاز، تنش اولیه $f_0$ ایجاد می شود. با اعمال بار

[1] استادیار، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود، آدرس پست الکترونیکی: V_Kalatjari@shahroodut.ac.ir

[2] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود، آدرس پست الکترونیکی: Abolfazl.askari@yahoo.com

[2] دانشجوی دکترا سازه، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود، آدرس پست الکترونیکی: M.H.Talebpour@gmail.com

بزرگ تر $P_2$ نسبت به $P_1$، تنش در میله به تنش مفروض F می رسد. لذا نیروی کشش تحمل شده بوسیله میله پیش تنیده به مقدار $f_0A$ بزرگتر از نیرویی است که عضو مشابه بدون پیش تنیدگی تحمل می کند.




ب) عضو تحت پیش تنیدگی در چند مرحله — الف) عضو تحت پیش تنیدگی در یک مرحله

**شکل ۱ - پیش تنیدگی در یک و چند مرحله**

اگر اعمال نیروی پیش تنیدگی و بارگذاری به طور متناوب در چند دوره تکرار شود، شاهد افزایش چشمگیر ظرفیت تحمل عضو خواهیم بود که به این حالت، پیش تنیدگی چند مرحله ای اطلاق می گردد. همانطور که از شکل ۱ – ب پیداست ظرفیت باربری اولیه عضوکه با $P_1$ نمایش داده شده است بواسطه پیش تنیدگی در چند مرحله به مقدار بسیار قابل ملاحظه ی $P_2$ افزایش یافته است [۴].

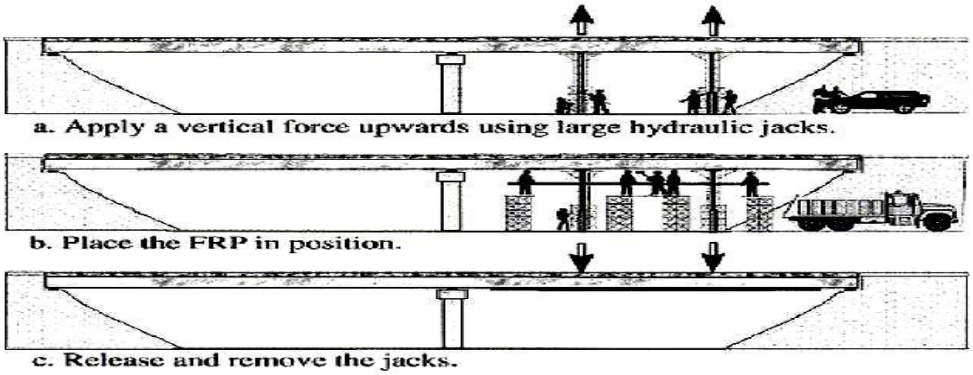
فرآیند فوق، مفهوم کلی ایجاد پیش تنیدگی می باشد. در راستای نیل به مفهوم و کارآیی مورد نظر، روش های مختلفی توسط محققین ارائه گردیده که در ذیل به بررسی رایج ترین این حالات پرداخته شده است.

## ۱.۲ پیش تنیدگی با صفحات CFRP

یکی از شیوه های مدرن و مرسوم پیش تنیدگی استفاده از صفحات FRP و CFRP می باشد که با توجه به نحوه اعمال نیروی پیش تنیدگی در آنها، در دسته های مختلف به شرح زیر ارائه شده و مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۱.۱.۲ پیش تنیدگی بواسطه ایجاد خیز منفی

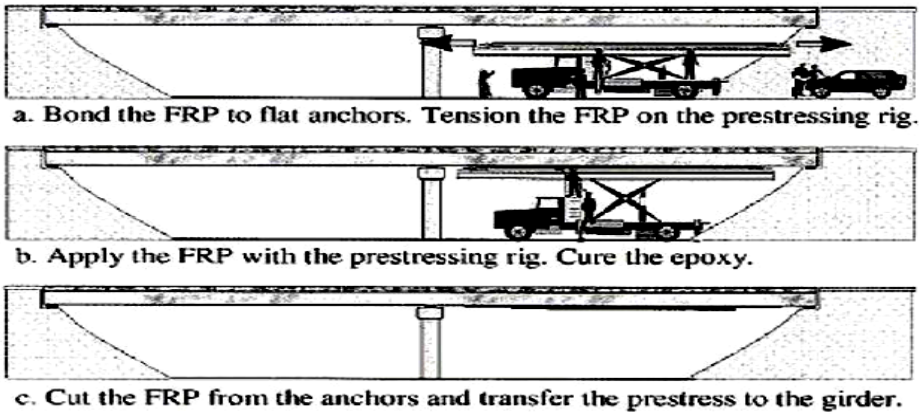
در این روش ابتدا تیر فولادی مورد نظر را بوسیله جکهای هیدرولیک قوی بالا برده و یک خیز منفی در آن ایجاد می کنند سپس سطح زیرین تیر که قبلاً کاملاً تمیز و آماده شده است و عاری از هرگونه زنگ زدگی و آلودگی گردیده را به چسب مخصوص آغشته کرده و سپس صفحات CFRP آغشته به چسب را به آن می چسبانند. پس از خشک شدن چسب، جک ها آزاد شده و بواسطه وزن تیر، یک نیروی پیش تنیدگی در زیر تیر ایجاد می گردد که این نیرو ظرفیت باربری تیر را به شکل قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. شکل ۲ روند کار مشروح در بالا را نشان می دهد.




**شکل ۲ - مراحل پیش تنیدگی CFRP با ایجاد خیز منفی**

### ۲.۱.۲ پیش تنیدگی بواسطه تجهیزات خارجی

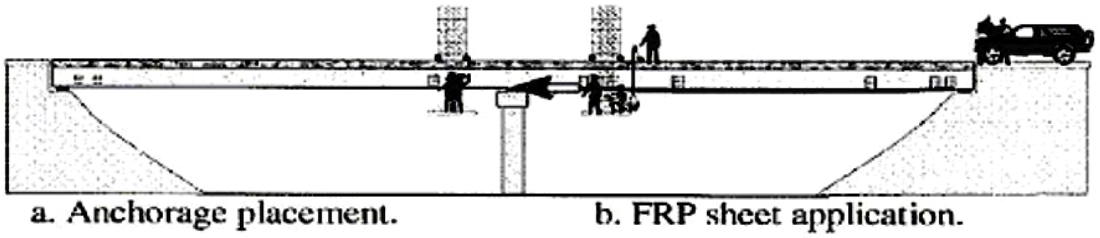
این روش یکی دیگر از روش های پیش تنیدگی با استفاده از صفحات CFRP است. در این روش صفحات CFRP توسط تجهیزات بیرونی از دو طرف کشیده می شود و پس از کشیده شدن توسط چسب به سطح آماده شده تیر می چسبد. بعد از خشک شدن چسب، کشش خارجی حذف می شود. حذف این کشش می تواند از طریق بریدن صفحات از اطراف صورت گیرد. شکل ۳ این روش را نشان می دهد.




**شکل ۳ - پیش تنیدگی بواسطه تجهیزات خارجی**

### ۳.۱.۲ پیش تنیدگی بواسطه تجهیزات الحاقی

در این روش یک سری مهار در سازه تعبیه می گردد و پیش تنیدگی از طریق این مهارها اعمال می شود. مهارها از یک طرف ثابت و از یک طرف به کمک جکهای خاص (به عنوان مثال جک نعل اسبی) قابلیت کشیده شدن را برای صفحات CFRP ایجاد می کنند. صفحات پیش تنیده توسط چسب به تیر فولادی چسبانده می شود. در شکل ۴ این روش نمایش داده شده است. مهار های استفاده شده در این روش ها به اشکال مختلف همچون دایروی، بیضوی و مسطح می باشند که متناسب با شرایط وکارآیی آنها مورد استفاده قرار می گیرد [۵].




**شکل ٤ - پیش تنیدگی بواسطه تجهیزات خارجی**

در روش های مذکور، کشش ایجاد شده در صفحات CFRP باعث ایجاد یک فشردگی در سطح تحتانی تیر و مشاهده نیروی قابل ملاحظه ای در خلاف جهت بارهای سرویس می باشد که پس از بارگذاری صرف غلبه بر نیروهای بهره برداری می گردد. نکته قابل توجه آن است که پس از بار گذاری و اعمال نیرو و خنثی شدن نیروی پیش تنیدگی، مرحله دوم کار صفحات آغاز می شود. بارگذاری بیش از نیروی پیش تنیدگی باعث بوجود آمدن کشش ثانویه در صفحات CFRP خواهد شد. این کشش مجدد افزایش نیروی پیش تنیدگی و به دنبال آن، افزایش سطح باربری را در پی خواهد داشت . در قسمت بعد به تفصیل در خصوص اعمال کشش اضافه توضیح داده خواهد شد.

## ۲.۲ پیش تنیده کردن اعضای فولادی به وسیله کابل ها

استفاده از کابل ها، متداول ترین شیوه پیش تنیدگی است که به روش های مختلفی انجام می پذیرد. در این قسمت به بررسی دو روش مرسوم پیش تنیدگی با کابل های مستقیم و کابل های آویخته پرداخته می شود.

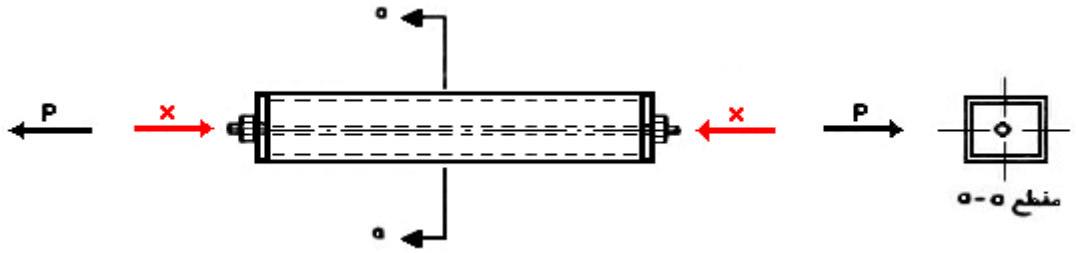
### ۱.۲.۲ کابل های مستقیم

میله ای فولادی با مقطع مستطیلی، تحت بار کششی P و بار فشاری X (نیروی پیش تنیدگی اولیه) قرارگرفته است. تنش های ایجادشده در عضو و کابل با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می شود.

$$f_m = \frac{P - X}{A} \qquad (۱)$$

$$f_t = \frac{X}{A_t} \qquad (2)$$

fm ، ft، A و At به ترتیب تنش عضو، تنش کابل، سطح مقطع عرضی عضو و سطح مقطع عرضی کابل می باشد.




**شکل ۵ - یک عضو در کشش در اثر پیش تنیدگی**

اعمال نیروی کششی اضافی، باعث افزایش طول عضو به اندازه $\Delta l$ و برابر با تغییر طول کابل می گردد. تغییر طول کابل متناسب با افزایش نیروی پیش تنیدگی نشان داده شده در شکل ۶ با رابطه (۳) قابل محاسبه است.

**شکل ٦ - اثر اضافه طول عضو**

$$\frac{P_{LL} - X}{AE} = \frac{\Delta X}{A_t E_t} \qquad (3)$$

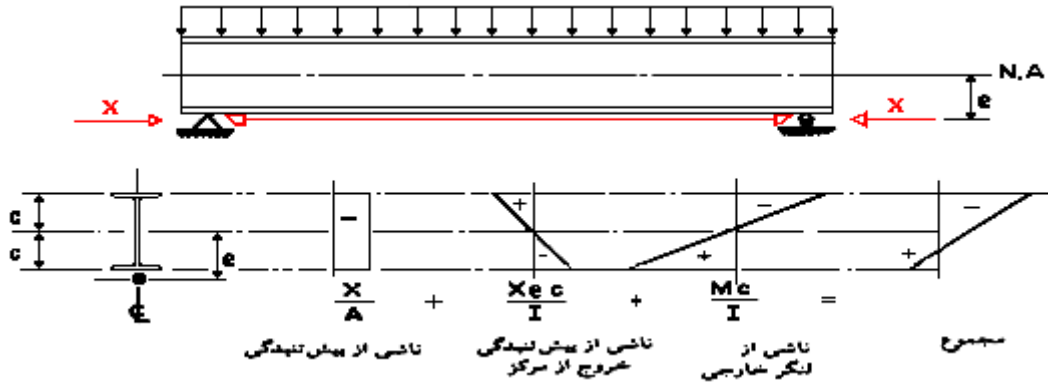
تنش نهایی کابل و عضو، پس از ایجاد نیروی پیش تنیدگی ثانویه را می توان با استفاده از روابط ( ۴) و (۵) محاسبه نمود.

$$f_t = \frac{X + \Delta X}{A_t} < F_t \qquad (4)$$

$$f_m = \frac{(P + P_{LL}) - (X + \Delta X)}{A} < F \qquad (5)$$

روابط فوق مقادیر تنش نهایی کابل و عضو را در حالت کلی نتیجه می دهد.

حال یک تیر متقارن I شکل که به وسیله کابل های واقع در بال تحتانی و تحت بارگذاری خارجی پیش تنیده شده است، بررسی می شود (شکل ۷).




**شکل ۷ - پخش تنش ناشی از پیش تنیدگی و بار روی یک تیر I شکل فولادی متقارن**

با اعمال نیروی پیش تنیدگی X، یک تنش یکنواخت فشاری در سطح A ایجاد می شود.

$$f = -\frac{X}{A} \tag{6}$$

با اعمال نیروی پیش تنیدگی با ویژگی خروج از مرکز e، تیر تحت لنگر اضافی X.e قرار می گیرد که علاوه بر لنگر ناشی از بار خارجی است. رابطه (۷) تنش حداکثر تولید شده در اثر این لنگر را نشان می دهد.

$$f = \pm\frac{Xec}{I} \tag{7}$$

حال اگر لنگر خارجی M، نتیجه اعمال بار خارجی در یک مقطع تیر باشد، در این صورت تنش حداکثر در سطح مقطع بر اثر بار مذکور و توزیع تنش برآیند پس از پیش تنیدگی به ترتیب مطابق با روابط (۸) و(۹) خواهد بود.

$$f = \pm\frac{Mc}{I} \tag{8}$$

$$f = -\frac{X}{A} \pm \frac{Xec}{I} \pm \frac{Mc}{I} \tag{9}$$

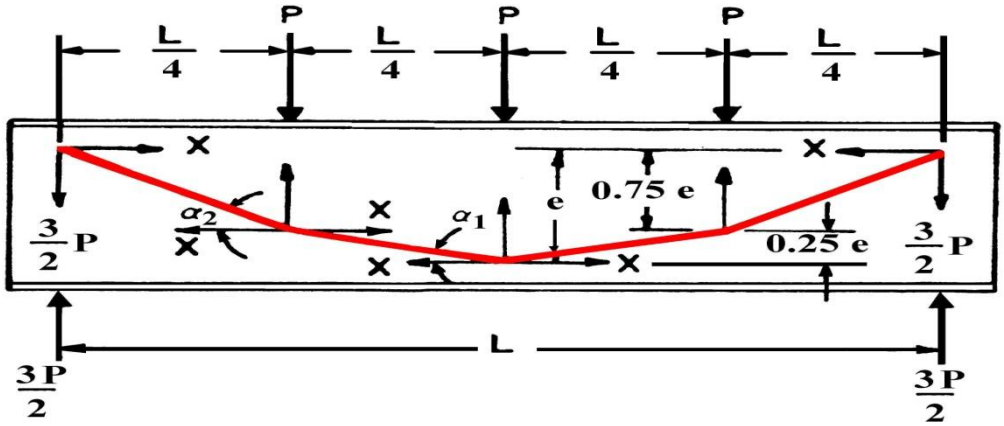
بنابراین با در نظرگرفتن تیر مذکور در شکل ۷، نتایج تنش ها در تارهای فوقانی و تحتانی مساوی نیست به گونه ای که تارهای فوقانی تحت تنش بیشتری نسبت به تارهای تحتانی قرار می گیرد [۶].

### ۲.۲.۲ کابل های آویخته

توزیع تنش در یک عضو پیش تنیده، عموماً ترکیبی از یک تنش محوری و یک تنش خمشی ناشی از ویژگی خروج از مرکز می باشد و طبق رابطه (۱۰) بیان می شود.

$$f = -\frac{X}{A} \pm \frac{Xe}{S} \tag{10}$$

که X و e و S به ترتیب مولفه افقی نیروی پیش تنیدگی، میزان خروج از مرکزیت نیرو و مدول مقطع عضو می باشند . تنش های ایجاد شده در اثر اعمال بارهای طراحی $\pm\frac{M}{S}$ است که در آن M لنگر خمشی می باشد. با توجه به اینکه هدف از پیش تنیدگی فولاد، خنثی کردن تنش ناشی از بارهای طراحی است، به نظر می رسد سیستم ایده آلی با اعمال توزیع مشابه و معکوس $\pm\frac{Xe}{S}$، و با حذف نیروی محوری $\frac{X}{A}$ به دست آید. در این حالت چگونگی کم شدن کشش در فولاد به صورت یک چندضلعی نامنظم به بارهای اعمال شده، مقدار کشش و نحوه مهار به قسمت فشاری تیر بستگی دارد (شکل ۸ و ۹). نتایج تحقیقات آزمایشگاهی نیز مؤید طرح بهینه حالت کابلهای آویخته نسبت به دیگر حالات است [۷ - ۹]. در یک شاهتیر دوسر ساده، مولفه های قائم کشش فولاد باعث ایجاد نیروهایی به سمت بالا در نقطه مهار شده می شود. طراحی نیروهای رو به بالا به گونه ای است که نیروهای رو به سمت پائین ناشی از بارهای خارجی را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش دهند. همچنین کابل آویخته لنگر و تنش های خمشی مشابه و مخالف جهت بارهای خارجی ایجاد می کند.




**شکل ۸ - یک کابل آویزان شده**

**شکل ۹ - پیش تنیدگی بواسطه کابلهای آویزان**

کاهش یا حذف لنگر ناشی از بارهای خارجی، اجازه می دهد بارهای اعمال شده بر سازه، با همان مدول مقطع قبلی افزایش یابند. برای مثال بر تیر موجود در شکل ۸ که به صورت دو سر ساده است سه بار متمرکز $P$ وارد می شود. نحوه استقرار کابل آویخته، مشخص و نیروهای افقی آن با $X$ نشان داده شده است. مولفه افقی کشش در کابل طراحی و مولفه قائم در مرکز نیروی $X$ برابر $\frac{M}{e}$ در نظر گرفته می شود. با توجه به هندسه شکل، مقدار لنگر $M$ و نیروی $X$ بر اساس روابط (۱۱) و (۱۲) حاصل خواهد شد.

$$M = (\frac{3P}{2}.\frac{L}{2}) - (\frac{PL}{4}) = \frac{PL}{2} \qquad (11)$$

$$X = \frac{PL}{2e} \qquad (12)$$

مولفه قائم کشش کابل عبارت است از:

$$V = 2X\tan\alpha = 2X\frac{0.25e}{0.25L} \qquad (13)$$

با جایگزینی مقدار $X$ رابطه (۱۴) حاصل خواهد شد.

$$V = \frac{PL}{2e}.\frac{2e}{L} = P \qquad (14)$$

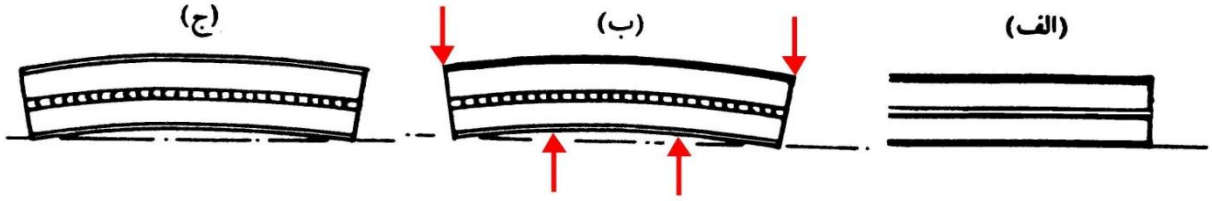
به طور مشابه، مولفه قائم نیروی کششی در هر ربع، با در نظر گرفتن $X = \frac{PL}{2e}$ و مولفه قائم کشش کابل با استفاده از رابطه (۱۵) زیر به دست می آید.

$$V = X\frac{0.75e}{0.25L} - X\frac{0.25e}{0.25e} = \frac{2Xe}{L} = P \qquad (15)$$

بنابراین وقتی که کابل ها کشیده می شوند، مولفه های قائم برابر با $P$ است و تیر تحت تاثیر سه بار متمرکز ضمن برخورداری از لنگر برش و افت صفر در هر مقطع، کاملاً بدون تنش در اثر بار مرده می باشد. بنابراین بر اساس شکل ( ۸) ممکن است مجموع بار بدون افزایش مدول مقطع به $3P$ افزایش یابد. لنگر خمشی ناشی از کشش در هر مقطع تیر ممکن است از نمودار بارگذاری و یا معادله $M = Xy$ به دست آید که در آن $y$ شکم دادگی کابل در هر مقطع است.

## ۳.۲ پیش تنیدگی تیرها به وسیله خمش

یک مقطع نورد شده، ممکن است در یک محدوده ارتجاعی، در اثر جوشکاری یا به کمک جک یا هر دو، تحت خمش قرار گیرد . به این ترتیب با حذف بار، تنش های پیش تنیدگی در آن باقی می ماند (شکل ۱۰). هنگام خم شدن چنین تیری تحت بار سرویس، عمل پیش تنیدگی در جهت مخالف بار، عمل می کند. تنش های حداکثر در تارهای مقطع، مخالف علامت تنش های پیش تنیدگی است، بنابراین به وجود آمدن یک توزیع یکنواخت تنش در مقطع تیر، باعث افزایش اثر مصالح می شود.

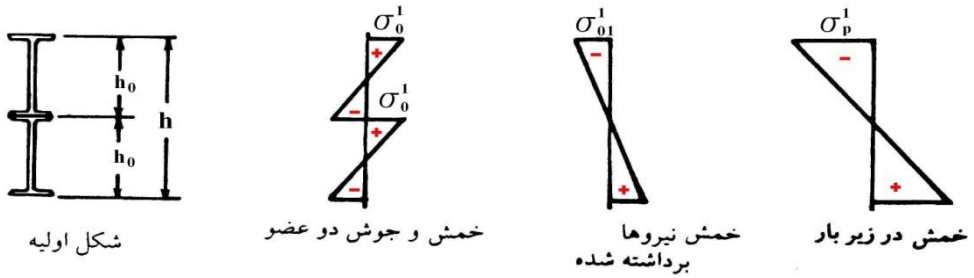



**شکل ۱۰ - پیش تنیده کردن به وسیله خمشی اولیه (الف) شکل اولیه : (ب) خمش و جوش دادن دو عضو ؛ (ج) یک عضو پیش تنیده**

یک تیر پیش تنیده، متشکل از دو عضو متقارن نسبت به محور افقی را در نظر بگیرید (شکل ۱۱). این تیر به وسیله تنش های کششی در بالا و تنش های فشار در لبه های تحتانی خم شده است. این تنش ها در تارهای بیرونی مربوط به مقاطع نورد شده مجزا ، بر اساس رابطه (۱۶) قابل محاسبه خواهند بود.

$$\sigma_{\circ}^{1} = \frac{M_{\circ}}{I_{\circ}} \times \frac{h_{\circ}}{2} = \frac{M_{\circ}}{S_{\circ}} \qquad (16)$$

که در آن $M_0$، $I_0$ و $S_0$ به ترتیب لنگر خمشی ، ممان اینرسی و مدول مقطع هر نیمرخ می باشد.




**شکل ۱۱ - نمودارهای تنش های عمودی تیرهای متقارن ناشی از خمش عضو**

لنگر خمشی پس از جوش شدن اعضا به یکدیگر برداشته می شود، به بیان دیگر، لنگر خمشی $2M$ بر تیر، به صورت لنگری با علامت مخالف عمل می کند. در این صورت تنش های تارهای فوقانی و تحتانی مطابق رابطه (۱۷) می باشد.

$$\sigma_{\circ 1}^{1} = \frac{2M_{\circ}}{S_w} = \frac{2\sigma_{\circ}^{1}S_{\circ}}{S_w} \qquad (17)$$

که در آن $S_w$ مدول مقطع تیرجوش شده می باشد . با قرار گرفتن تیر تحت اثر بارهای سرویس که در خلاف جهت بارهای پیش تنیدگی می باشند، تنش ها در تارهای مقطع از رابطه (۱۸) بدست خواهد آمد.

$$\sigma_p^1 = \frac{M_L}{I} \times \frac{h}{2} = \frac{M_L}{S_w} \tag{18}$$

از تنش های برآیند در لبه های فوقانی و تحتانی مقطع طبق روابط ( ۱۹) و (۲۰) قابل محاسبه می باشد.

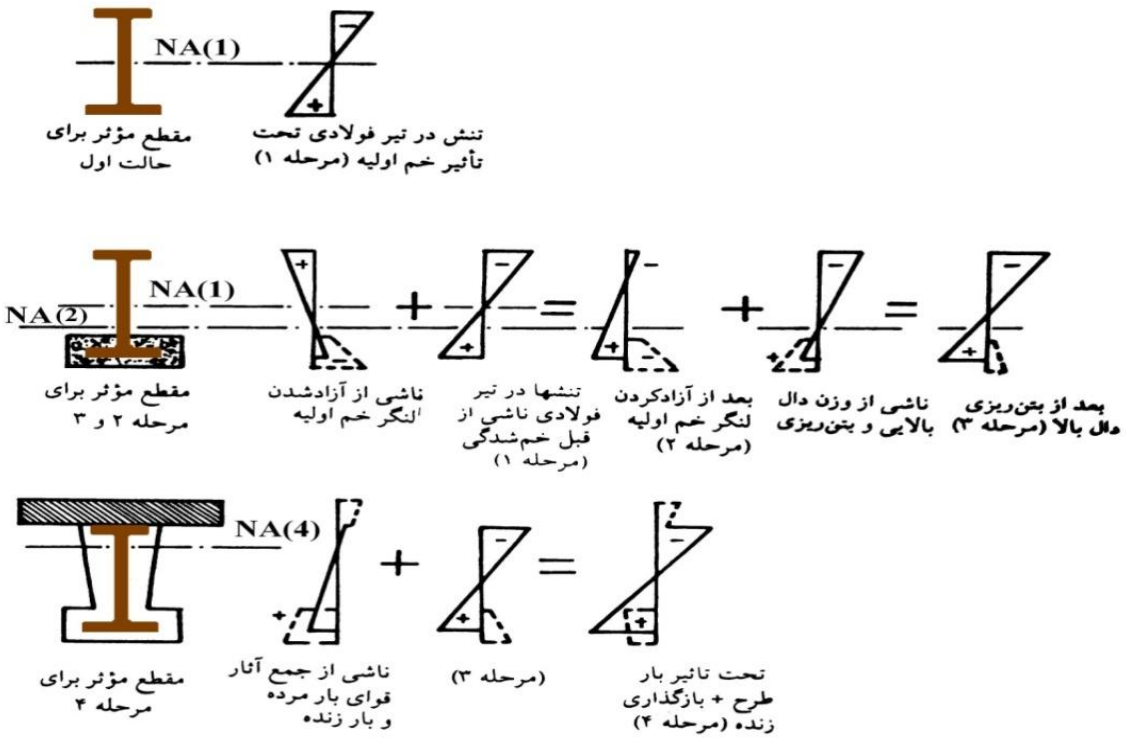
$$\sigma_t^1 = \frac{M_\circ}{S_\circ} - \frac{2\sigma_\circ^1 S_\circ}{S_w} - \frac{M_L}{S_w} \tag{19}$$

$$\sigma_b^1 = -\frac{M_\circ}{S_\circ} + \frac{2\sigma_\circ^1 S_\circ}{S_w} + \frac{M_L}{S_w} \tag{20}$$

همچنین ممکن است با پیش خمیدگی تیرهای نورد شده، به منظور پیش تنیدگی تیرهای مرکب، ورق های فولادی با مقاومت بالا را به بال های تیر جوش دهند. پیش تنیده کردن با تغییر شکل تیر به سمت بالا در یک مقدار معین، و جوش دادن ورق های پوششی با مقاومت بالا انجام می شود سپس با رهاسازی و حذف بارها، در بال فوقانی کشش و در بال تحتانی فشار به وجود می آید. پس از آنکه عضو در سازه قرار گرفت، تنش های پس مانده هستند که در جهت خلاف تنش های ناشی از بارهای زنده و مرده عمل می کنند [۴].

## ۴.۲ روش ایجاد خیز از قبل (پیش خیز)

روش ایجاد خیز از قبل، در سال ۱۹۴۹ به وسیله لیپسکی توسعه یافت. که به عنوان تیر از قبل خم شده معروف می باشد. این روش، استفاده از تیرهای فولادی با پوشش بتنی را برای حالت هایی که خیز یا ترک بتن و یا هر دو زیاد باشد، مقدور می سازد. از این سیستم معمولاً هنگام نیاز به تیری با ارتفاع کوتاه استفاده می شود [۱۰].
در مراحل ساخت، در صورت لزوم یک تیر نورد شده دارای یک ورق پوششی یا یک قطعه سازه فولادی جوش داده شده با مقاومت بالا در جهت بارهای طراحی، خم می شود. با تحت تنش نگه داشتن قطعه به صورت خم دار، بال کششی در پوشش بتن مسلح با مقاومت بالا قرار می گیرد. پس از بتن ریزی در اطراف بال کششی و زمانی که بتن مقاومت لازم خود را به دست می آورد، تغییر شکل پیشین آزاد می شود. این عمل پوشش بال کششی را تحت پیش تنیدگی قرار می دهد. تنش های خمشی و خصوصیات مقطع عرضی در چهار مرحله جداگانه ساختن یا بنا نهادن در شکل ۱۲ نشان داده شده است.




**شکل ۱۲ - خصوصیات مقاطع و تنش اعضا در مراحل مختلف بارگذاری تیر قوس دار**

مرحله اول: تیر فولادی تحت تاثیر نیروهای جک قرار می گیرد.

مرحله دوم: پس از اعمال نیروی جک در جهت بارهای سرویس، بتن ریزی در بال پایینی صورت می گیرد و ممکن است میلگرد به بتن اضافه شود .

مرحله سوم: تنش هایی پس از بتن ریزی دالی، که بال بالایی تیر را تشکیل می دهد، به اضافه بتن پوششی جان پدید می آید. البته شایان ذکر است مقداری افت پیش تنیدگی ناشی از افتادگی و جمع شدگی بتن، در فاصله زمانی بین آزاد کردن و بتن ریزی دال بالایی به وجود خواهد آمد .

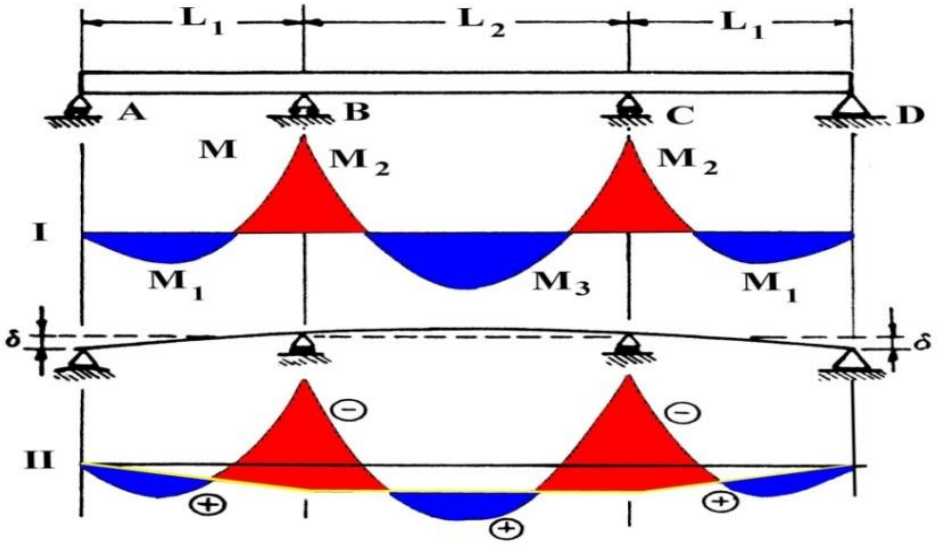
مرحله چهارم: در این مرحله بر اساس اعمال بار مرده و بار زنده و با استفاده از نسبت مدولی مناسب، اعمال محاسبات جداگانه برای هر دو نوع این بارگذاری ها صورت می پذیرد. برخی نکات مثبت حاصله از خم دار کردن یک تیر فولادی را می توان به شرح زیر خلاصه نمود.

- ایجاد یک افزایش در سختی که منتج به کاهش خیز در محدوده بار اسمی می شود.
- پوشش ماندنی بر روی تیر فولادی به وسیله بتن با مقاومت بالا، که در این صورت ترک کمتری در بار اسمی نسبت به تیر مشابه هم اندازه به وجود می آید .
- ایجاد یک افزایش در نسبت دهانه به ارتفاع در مقایسه به تیر مرکب بدون پوشش بتنی که در جای خود می تواند از اهمیت ویژه ای برخوردار باشد .

## ۵.۲ بازپخش لنگرهای خمشی

با تغییر ارتفاع تکیه گاه شاهتیرهای پیوسته، می توان لنگرهای خمشی و در نتیجه تنش ها را در مقاطع عرضی شاهتیر بازپخش نمود. با اعمال نیروهای اضافی و عوض کردن ارتفاع تکیه گاه، امکان دستیابی به حجم گسترده ای از بازپخش نیروها در اعضای اصلی یک پل یا بازپخش تنش هایشان در مقاطع عرضی مورد نظر وجود دارد. این روش ابتکاری در خصوص ایجاد باربری مناسب در یک شاهتیر، می تواند تحت عنوان قوانین تنش ها نامگذاری شود. قوانین تنش ها ممکن است از چند روش، که همگی دارای یک اصل می باشند، به دست آید.

یکی از روشها به صورت عوض کردن ارتفاع تکیه گاه ها برای ایجاد لنگرهای خمشی مصنوعی اضافی که با لنگرهای داده شده در مقطع جمع جبری می شود است. عوض کردن لنگرهای خمشی ممکن است با پایین آوردن یا بالا بردن ارتفاع تکیه گاه ها به صورت مصنوعی در سازه های نامعین استاتیکی به عنوان شاهتیرهای پیوسته و قاب ها اعمال شود. به عنوان مثال، طبق شکل ۱۳، وقتی تکیه گاه های A ، B ، C و D در یک تراز بوده و تحت تاثیر بار مرده گسترده یکنواخت قرارگیرند نمودار لنگر I، حاصل می شود. در این حالت با پایین آوردن ارتفاع تکیه گاه های A و D تغییر مقادیر لنگر خمشی پدید می آید. با پایین آمدن هر کدام از تکیه گاه های A و D به مقدار $\delta$ ، روی تکیه گاه های B و C، لنگرهای منفی $M_B$ و $M_C$ به وجود می آید و پس از اضافه کردن آنها به لنگرهای خمشی ناشی از بار مرده، نموداری نظیر نمودار لنگر II حاصل می گردد.




**شکل ۱۳ - بازپخش لنگر خمشی در شاهتیر سه دهانه پیوسته به وسیله پایین آوردن تکیه گاه ها**

در این روش با ایجاد بازپخش لنگرها، می توان مقادیر $M_1$ و $M_3$ را به طورمساوی به دست آورد. هر چند توجه به این نکته ضروری است که به تساوی رسیدن لنگر های خمشی این دهانه ها با پایین آوردن تکیه گاه ها، باعث افزایش لنگرهای تکیه گاهی می شود. با افزایش ارتفاع بر روی تکیه گاه ها، در ارتفاع شاهتیر نیز در دهانه وسط کاهش حاصل خواهد شد و لازمه این مساله یک شاهتیر با ارتفاع متغیر است. ممکن است مدول مقطع یک شاهتیر I شکل به صورت ذیل در نظر گرفته شود.

$$S = \frac{Ah}{2} - \frac{A_W h}{3} \tag{16}$$

$$S = \frac{Ah}{6}(3 - 2m) \tag{17}$$

$A$ و $h$ به ترتیب سطح مقطع و ارتفاع شاهتیر وهمچنین $m = \frac{A_w}{A}$ نسبت سطح مقطع یک جان به سطح مقطع کل شاهتیر می باشد. با جایگزین کردن $S = \frac{M}{f}$، رابطه (۱۸) حاصل خواهد شد.

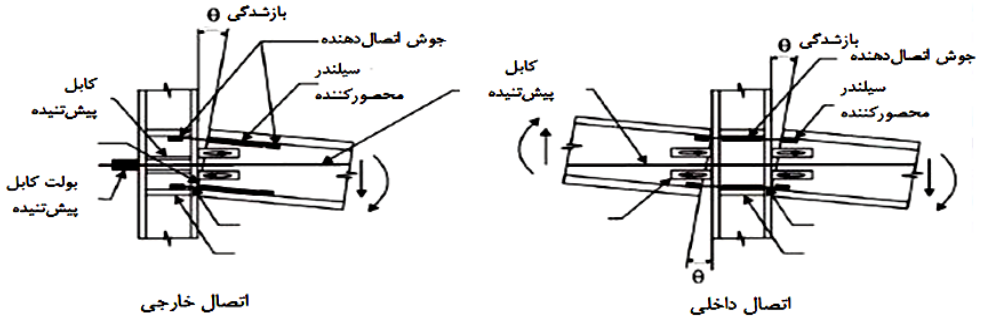
$$\frac{A}{M} = \frac{6}{f\,h\,(3 - 2m)} \tag{18}$$

این عبارت نشان دهنده یک سطح مقطع مشخص در شاهتیر یا سطح هر لنگر خمشی واحد شاهتیر است. معادله ( ۱۸) بیانگر آن است که سطح مقطع مشخص شاهتیر با ارتفاع آن نسبت معکوس دارد. بنابراین، با قبول $m$ به عنوان یک مقدار ثابت، می توان نتیجه گرفت که عمل لنگر انتقالی روی ارتفاع بزرگتر شاهتیر به سمت تکیه گاه هایش برتری دارد.

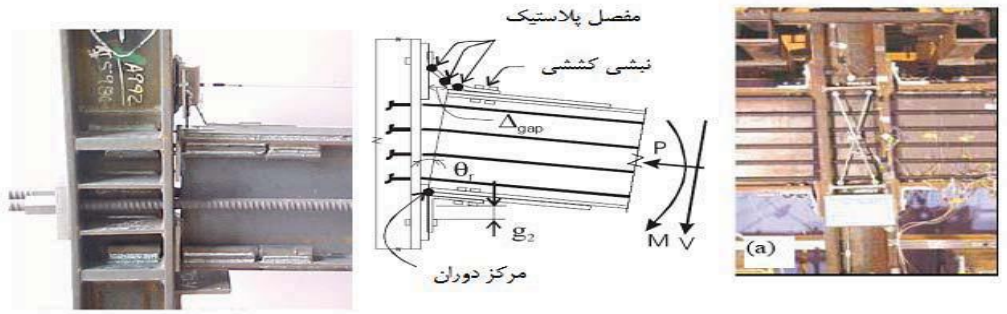
به هر صورت توجه به این نکته ضروری است که استفاده از شاهتیرهایی با ارتفاع متغیر، ضمن مشکل کردن مراحل مربوط به روش ساخت آنها، هزینه نهایی را افزایش خواهد داد. به همین سبب، برتری اعمال این روش در خصوص قوانین لنگرها، ممکن است فقط برای پل هایی با دهانه بزرگ قابل قبول و توجیه پذیر باشد. می بایست اقتصادی بودن فولاد به دست آمده ناشی از روش قوانین لنگر بر هزینه ناشی از دشواری تولید برتری پیدا کند. در خصوص پل هایی با دهانه های متوسط، استفاده از شاهتیرهای پیوسته با بال های موازی برتری بیشتری خواهد داشت. بنابراین در حالتی که اختلاف زیادی بین مقادیر واقعی در حالت تراز تکیه گاه ها، لنگرهای دهانه و تکیه گاهی وجود داشته باشد، این راه حل عملی نیست [۴].

## ۶.۲ مقاوم سازی اتصال با پیش تنیدگی خارجی بوسیله کابل کششی

این روش یکی از نوین ترین روشهای بهسازی لرزه ای است که در سالهای اخیر توسعه یافته است. در این شیوه اتصالات آسیب دیده و یا اتصالاتی که نیاز به افزایش مقاومت دارند را با پیش تنیدگی بواسطه کابل ها یا میلگردها تقویت می کنند. کابل با مقاومت بالا معمولاً درقسمت میانی تیر تعبیه می گردد. این روش را با چهار کابل نیز می توان اجرا نمود (اشکال (۱۴) و (۱۵)). حسن استفاده از چهار کابل این است که با از بین رفتن یک کابل، عملکرد اتصال مختل نمی گردد. مقاومت برشی اتصال توسط دو نبشی که در قسمت فوقانی و تحتانی قرار دارد و نیروی اصطکاکی بین تیر وستون که به علت پیش تنیدگی کابل نیز افزایش یافته، تامین می گردد [۳].




**شکل ١٤ - اتصالات آسیب دیده**




**شکل ١٥ - مقاوم سازی اتصال با پیش تنیدگی خارجی بوسیله کابل کششی**

برخی از محاسن این روش به صورت مختصر در زیر آمده است:

- یکسان سازی عملکرد غیر خطی اجزای سازه ای ودر نتیجه محدود نمودن نیروهای لرزه ای بوجود آمده و فراهم نمودن میرایی اضافه برای سازه .
- برگشت سیستم به حالت اولیه بعد از ایجاد تغییر شکلهای بوجود آمده در اثر بارهای لرزه ای .
- کاهش یا حذف خسارت های شدید به المانهای سازه های اصلی.

## ۳. بحث و نتیجه گیری

همانطور که از بررسی اجمالی کلیه روشها برمی آید پیش تنیدگی در فولاد می تواند با طیف وسیعی مورد استفاده قرار گیرد. یکی از اهداف پیش تنیدگی در بتن افزایش مقاومت آن در مقابل ترک خوردگی است واکثر نیروی پیش تنیدگی به خاطر خاصیت الاستیک کم بتن صرف جلوگیری از ایجاد ترک می گردد. درحالیکه در فولاد این موضوع به خاطر خاصیت الاستیسیته بالا اصلاً وجود ندارد و در واقع کل نیروی پیش تنیدگی که غالباً در خلاف جهت بارهای سرویس به سازه اعمال می گردد صرف افزایش چشمگیر دامنه الاستیک عضو شده در نتیجه افزایش ظرفیت باربری بسیار بالایی حاصل خواهد شد. به عبارت دیگر با توجه به مندرجات فوق تأثیرات سودمند پیش تنیدگی در فولاد را حتی می توان بیش از پیش تنیدگی در بتن دانست. افزایش طول دهانه ها، کاهش ابعاد اعضای سازه، کاهش وزن کلی سازه،کاهش فولاد مصرفی، اجرای نسبتاً ساده، افزایش چشمگیر ظرفیت های باربری و...، همگی باعث بوجودآمدن توجیه فنی و اقتصادی هرچه بیشتر مقاوم سازی سازه های فولادی با روش پیش تنیدگی گردیده است واین شیوه روز به روز در دنیا مورد استقبال بیشتری قرار می گیرد. البته در ساخت و نگهداری سازه های فولادی پیش تنیده می بایست الزاماتی به شرح زیر مورد توجه قرار گیرد.

- محافظت فولاد های پیش تنیدگی در برابر زنگ زدگی و عوامل جوی بسیار حائز اهمیت بوده و باید بوسیله یک پوشش محافظ روغن جلا با ورقهای پلاستیک یا روی یا با روشهای دیگر مثل مالیدن مواد قیری یا گریس بر روی آن از زنگ زدگی محافظت شوند.
- هنگام جایگیری کابلها در قسمت پوشش دار تیرها یا خرپاها قسمتهای پوششی باید بوسیله ملات سیمان یاقیر پر شوند تا تغییر شکلهای طولی کابلها وقسمت سخت فولادی عضو به صورت مستقل و همزمان انجام شود.
- با توجه به خوردگی محتمل، کاربرد سازه های فولادی پیش تنیده در سطوحی با رطوبت خیلی زیاد و مناطق جغرافیایی با خاصیت خورندگی زیاد جایز نیست.
- کابلها در اعضای سخت سازه ها با کمک گوه فشاری، غلاف کردن (جعبه) یا مهاربندهای دیگر استفاده شده در مدت ساخت سازه های پیش تنیده، در جای خود محکم می شوند.
- برای رسیدن به یک طرح بهینه از لحاظ مقدار مصالح ، وزن و هزینه ، باید طراحی و اجرا به گونه ای انجام شود که پیش تنیدگی کامل حاصل گردد و بتوان از کل مقطع در فشار بهره جست. کنترل نیروی کشش کابل ها باید توسط جکهای کالیبره شده دقیق انجام شود.
- توجه به مسئله افت دراعضای پیش تنیده بسیار حائز اهمیت بوده و محاسبه و پیش بینی مقدار افت ناشی از مواردی همچون نیروی پس کشیدگی به جهت اصطکاک بین کابل و غلاف، افت به دلیل لغزش مهار انتهایی و فرو رفتن گوه گیرداری در ابتدا و انتهای کابل و نیز افت به جهت شل شدگی فولاد باید موردتوجه قرار گیرد.
- تخریب این سیستم به دلیل وجود تارهای پیش تنیده بسیارپر خطر بوده و باید با روش های خاص توسط تیم فنی آموزش دیده، صورت گیرد.
- استفاده از سیستم پیش تنیده، دردهانه های بلند توجیه اقتصادی دارد.

به هر حال ایجاد سازه های فولادی پیش تنیده در تمام کشورهایی که در آنها چنین سازه هایی ساخته شده است، با توجه به میزان فولاد مصرفی و قیمت تمام شده از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بوده است. بر طبق اطلاعات داده شده به وسیله کلوبوکوسکی، مزایای اقتصادی سازه های پیش تنیده در مقایسه با سازه های غیر پیش تنیده در جدول (۱) درج شده است [۷].

**جدول ۱ - مزایای اقتصادی سازه های فولادی پیش تنیده**

| سازه ها | صرفه جویی در فولاد(درصد) | صرفه جویی در هزینه(درصد) |
|---|---|---|
| شاهتیرها | ۱۰-۱۲ | ۸-۱۲ |
| خرپاهای با دهانه ۱۰۰ فوت | ۵-۱۰ | ۲-۵ |
| خرپاهای بام با دهانه ۱۰۰ تا ۱۳۰ فوت | ۱۰-۲۰ | ۵-۱۰ |
| خرپاهای بام با دهانه ۱۳۰ تا ۲۰۰ فوت | ۱۰-۴۵ | ۷-۲۰ |
| قاب ها و خرپاهای با دهانه ۱۰۰ تا ۲۰۰ فوت | ۲۰-۵۰ | ۱۰-۳۰ |

مقادیر موجود در جدول (۱) برای سازه های فولادی پیش تنیده بدون در نظر گرفتن موارد اختلاف مربوط به مهارت فنی و خوردگی به دست آمده است . همچنین این موارد مربوط به پیش تنیدگی در یک مرحله می باشد اگر سازه در چند مرحله تحت تنش قرار گیرد، در اثر بارهای وارد شده، ظرفیت باربری آن در اعضای کششی می تواند از سه تا پنج برابر افزایش یابد.

انتخاب شیوه پیش تنیدگی می بایست بر اساس امکانات موجود، شرایط محیط وجغرافیای محل، الزامات و محدودیت ها انجام پذیرد. به عنوان مثال استفاده از صفحات CFRP در مناطقی که احتمال خوردگی می رود شیوه مناسبی می باشد.

## ۴. مراجع

1. Ferjencik,P. and Tochacek,M.,(1966), "*Prestressed Metal Structures*," Bratislava, SVTL.
2. Francis,A. J, (1980), "*Introducing Structures*," Pergamon Press, New York.
3. اصغری، ج.، (۱۳۸۶)،" روش های مختلف ترمیم ومقاوم سازی سازه ها،" سایت سازه ۸۰۸.
4. ترویتسکی ، ام اس.، (۱۳۷۹)،"*نظریه وتحلیل پلهای پیش تنیده فولادی* ،" عربزاده، چاپ اول، دانشگاه تربیت مدرس.
5. Björklund, A. and Höglind, J., (2005), "*Strengthening of steel structures with bonded prestressed laminates*," Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
6. Szilard, R., (1955), "Strengthening Steel Structures by Means of Prestressing," The Engineering Journal, pp 1379-1381.
7. Park, S., Kim, T., Kim, K., and Hong, S., (2010) "*Flexural behavior of steel I-beam prestressed with externally unbounded tendons*," Department of Construction and Environment System Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea.
8. Masullo, A. and Nunziata, V., (2006) "*Prestressed steel structures: historical and technological analysis*," Studio Nunziata, Palma Campania, Napoli, Italy.
9. Nunziata, V., (1999) "*Prestressed steel structures*," Studio Tecnico di Ingegneria Civile, Palma Campania (NA).
10. Johnson, P.P., and Buckby, R. J., (1979), "Composite Structures of Steel and Concrete," Granada, London, **2**, pp 284-289.