

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران و معماری

گروه عمران

تیرهای مرکب فولادی بتنی پیش تنیده شده توسط تاندون‌های خارجی

دانشجو:

بهروز زارعی شرق

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر فرشید علایی

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن‌ماه ۹۴

تقدیم به:

پدرم؛

دلم پر است از جای خالی تو، می نویسم از تو برای تو. دیروز که قلم به دست گرفتم، دوست داشتم تا دکنارم باشی، اما نمی توانستی. کفتم پس امروز من قلم را بر زمین می گذارم تا من دکنارت باشم، اما دیگر نبودى... در این بین سهم من از تو شد، توانستن دیروز و نبودن امروز. اما اکنون یقین دارم که از همیشه خوشحال تری. پس همین برایم کافی است و می نویسم؛ دوستت دارم از همیشه تا همیشه...

مادرم؛

قلم را توبه دستم دادی، خواستن و بودن را تو برایم صرف کردی، رفتن و تترسیدن را توبه من آموختی، پس بگذار امروز که قلم را بر زمین می گذارم دو چیز را به پای تو بریزم؛ هستی و نیستی ام را. دوستت دارم از همیشه تا همیشه...

خواهرم، برادرم؛

مهربان خواهرم، نازنین برادرم، نوای دل انگیز محبت را شاد قلب من سرودید. دوستان دارم از همیشه تا همیشه...

قدردانی

حال که به لطف لایزال حضرت حق، این پیام نامه را به اتمام رساندم، بر خود لازم می‌دانم از عزیزانی قدردانی نمایم که

اگر لطف آن‌ها شامل حال نمی‌شدیسمودن این راه برایم غیر ممکن بود.

در آغاز بر خود لازم می‌دانم که از جناب آقای دکتر فریدعلایی که راهنمایی این پیام نامه را بر عهده داشتند، کمال تشکر و

قدردانی را داشته باشم. در کنار ایشان بودن برایم افتخاری بزرگ و مایه مباهات و دلگرمی بود، چرا که در تک تک مراحل

این پیام نامه با صبوری هرچه تمام تر و با حسن خلقی مثال زدنی مرا یاری نمودند.

از تمامی دوستان و عزیزانم به ویژه دوست گران‌قدرم مهندس ایمان باباخانی که کمک شایانی در تدوین این پیام نامه نمود،

سپاسگزارم.

تعهد نامه

این جانب بهروز زارعی شرف دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران (سازه) دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تیرهای مرکب فولادی بتنی پیش‌تنیده شده توسط تاندون‌های خارجی تحت راهنمایی دکتر فرشید علایی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۹۴/۱۱/۲۶

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

یک ایده طراحی ابتکاری که می‌تواند برای مقاوم‌سازی پل‌های موجود و همچنین طراحی پل‌های جدید مورد استفاده قرار گیرد، به‌کارگیری پیش‌تنیدگی در تیرهای مرکب فولادی-بتنی است. پیش‌تنیده کردن فولاد در یک تیر مرکب فولادی-بتنی باری را که در آن تیر فولادی جاری می‌شود را افزایش می‌دهد و همچنین مقاومت نهایی مقطع مرکب نیز افزایش پیدا می‌نماید. ضمناً پیش‌فشرده کردن بال کششی، مقاومت خستگی را بهبود می‌بخشد.

در این پایان‌نامه سعی شده است تا با بهره‌گیری از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، عملکرد تیرهای مرکب پیش‌تنیده تحت لنگر خمشی مثبت مورد ارزیابی قرار گیرد.

برای این منظور ابتدا مدل عددی یک تیر تحت لنگر خمشی مثبت که با میلگردهایی زیر بال کششی پیش‌تنیده شده بود (نمونه آزمایشگاهی سعادت منش و همکاران، ۱۹۸۶) شبیه‌سازی شد. با توجه به هماهنگی خوب نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی با نتایج حاصل از نمونه آزمایشگاهی، صحت مدل‌سازی مورد تأیید قرار گرفت. در ادامه با استفاده از تحلیل اجزا محدود، اثر پارامترهایی همچون برون محوریت تاندون، سطح مقطع بیشتر تاندون و نیروی پیش‌تنیدگی بزرگ‌تر بر رفتار تیرهای مرکب پیش‌تنیده مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد که پیش‌تنیده کردن یک تیر مرکب معمولی به طرز قابل توجهی باری را که در آن جاری‌شدگی اتفاق می‌افتد و ظرفیت نهایی تیر مرکب را افزایش می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: تیر مرکب پیش‌تنیده، تاندون، آباکوس، ظرفیت نهایی.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- مزایای استفاده از تیرهای مرکب	۳
۳-۱- معایب تیرهای مرکب	۴
۴-۱- دستیابی به عملکرد مرکب با استفاده از اتصالات برشی	۴
۱-۴-۱- انواع برش گیرها	۵
۵-۱- تیرهای مرکب مدفون در بتن	۵
فصل دوم: پیش تنیدگی تیرهای مرکب	۷
۱-۲- مقدمه	۸
۲-۲- تیر مرکب پیش تنیده و نحوه اعمال پیش تنیدگی	۸
۳-۲- تحلیل غیرخطی تیر مرکب پیش تنیده	۹
۱-۳-۲- مفروضات تحلیل	۹
۲-۳-۲- توزیع تنش	۱۰
۳-۳-۲- منحنی تنش کرنش ایده آل بتن	۱۲
۴-۳-۲- محاسبه کرنش ها و تنش ها	۱۳
۱-۴-۳-۲- کرنش ها	۱۳
۲-۴-۳-۲- تنش ها	۱۸
۳-۴-۳-۲- نیروها	۱۸
۴-۴-۳-۲- تار خنثی	۱۸
۵-۴-۳-۲- لنگر داخلی	۱۹
۶-۴-۳-۲- بار اعمالی	۱۹

۲۱	فصل سوم: مروری بر مطالعات گذشته
۲۲	۱-۳- مقدمه
۲۳	۲-۳- مطالعات تحلیلی گذشته
۲۴	۳-۳- مطالعات آزمایشگاهی بروی تیرهای مرکب پیش‌تنیده
۲۵	۴-۳- مطالعه پارامتریک تیرهای مرکب پیش‌تنیده
۲۶	۵-۳- نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات:
۲۹	فصل چهارم: قوانین و روابط مربوط به مدل سازی
۳۰	۱-۴- مقدمه
۳۱	۲-۴- حل عددی معادلات دیفرانسیل
۳۱	۳-۴- کلیات روش اجزا محدود
۳۲	۴-۴- روش حل استاندارد در آباکوس به‌وسیله المان‌های تیر و اجسام صلب
۳۲	۱-۴-۴- المان‌های تیر
۳۳	۲-۴-۴- اجسام صلب
۳۳	۵-۴- مدل‌سازی رفتار مصالح در آباکوس
۳۳	۱-۵-۴- بتن
۳۳	۱-۱-۵-۴- آسیب‌دیدگی بتن در آباکوس
۳۴	۲-۱-۵-۴- پارامتر (f)
۳۴	۳-۱-۵-۴- زاویه اتساع (Ψ)
۳۴	۴-۱-۵-۴- پارامتر (γ)
۳۵	۵-۱-۵-۴- پارامتر ویسکوزیته (η)
۳۵	۶-۱-۵-۴- خروج از مرکزیت (E)
۳۶	۲-۵-۴- فولاد
۳۶	۶-۴- روش طراحی و تحلیل تیرهای مرکب پیش‌تنیده بر اساس تنش مجاز

۳۶	..... ۱-۶-۴- روند طراحی
۳۶	..... ۱-۱-۶-۴- طراحی مقدماتی
۳۹	..... ۲-۶-۴- تحلیل
۴۰	..... ۱-۲-۶-۴- تاندون
۴۰	..... ۲-۲-۶-۴- تیر فولادی
۴۰	..... ۳-۲-۶-۴- دال بتنی
۴۰	..... ۷-۴- مطالعه تحلیلی تیرهای مرکب پیش‌تنیده
۴۱	..... ۱-۷-۴- تیر مرکب تحت لنگر خمشی مثبت
۴۲	..... ۱-۱-۷-۴- کرنش‌ها
۴۳	..... ۸-۴- شناسه المان‌ها در آباکوس
۴۴	..... ۱-۸-۴- خانواده
۴۵	..... ۲-۸-۴- درجات آزادی
۴۵	..... ۳-۸-۴- تعداد گره‌ها و مرتبه درون‌یابی
۴۵	..... ۴-۸-۴- فرمول‌بندی
۴۷	..... فصل پنجم: بررسی صحت مدل سازی
۴۸	..... ۱-۵- مقدمه
۴۸	..... ۲-۵- محیط گرافیکی Abaqus/cae
۴۸	..... ۱-۲-۵- انواع محیط در Abaqus/cae
۴۹	..... ۳-۵- ابعاد و جزئیات تیر مرکب پیش‌تنیده شده
۵۰	..... ۱-۳-۵- مشخصات مکانیکی مصالح
۵۰	..... ۱-۱-۳-۵- بتن
۵۰	..... ۲-۱-۳-۵- تیر فولادی
۵۱	..... ۳-۱-۳-۵- تاندون‌ها و نحوه اعمال پیش‌تنیدگی

- ۵۱-۳-۱-۴-۵- موقعیت تکیه‌گاهی و محل اعمال بارگذاری ۵۱
- ۵۲-۴-۵- مدل‌سازی رفتار مصالح ۵۲
- ۵۲-۴-۱-۵- بتن ۵۲
- ۵۴-۴-۱-۱-۵- مدل‌سازی رفتار بتن ۵۴
- ۵۴-۴-۱-۲-۵- رفتار خطی بتن ۵۴
- ۵۴-۴-۱-۳-۵- رفتار غیرخطی بتن ۵۴
- ۵۶-۴-۲-۵- فولاد ۵۶
- ۵۸-۴-۲-۱-۵- صفحات بارگذاری، باکس باز و سخت‌کننده‌ها ۵۸
- ۵۸-۴-۳-۵- المان‌های مورد استفاده ۵۸
- ۵۸-۴-۳-۱-۵- بتن ۵۸
- ۵۹-۴-۳-۲-۵- فولاد ۵۹
- ۵۹-۴-۳-۳-۵- تیر فولادی ۵۹
- ۵۹-۴-۳-۴-۵- آرماتورهای انقباضی و حرارتی ۵۹
- ۵۹-۴-۳-۵-۵- تاندون‌ها ۵۹
- ۵۹-۴-۳-۶-۵- صفحات انتهایی، باکس باز و صفحات بارگذاری و سخت‌کننده‌ها ۵۹
- ۵۹-۴-۴-۵- شبکه‌بندی ۵۹
- ۶۱-۴-۵-۵- اندرکنش بین مصالح مدل ۶۱
- ۶۱-۴-۵-۱- قید ناحیه مدفون ۶۱
- ۶۲-۴-۵-۲- تماس مقید ۶۲
- ۶۲-۴-۵-۳- اندرکنش تماس ۶۲
- ۶۲-۴-۵-۶- بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی ۶۲
- ۶۳-۴-۵-۷- مدل‌سازی پیش‌تنیدگی در تاندون‌ها ۶۳
- ۶۵-۵-۵- مقایسه نتایج عددی با مدل آزمایشگاهی ۶۵

۶۵	..... ۱-۵-۵- منحنی بار به تغییر مکان
۶۶	..... ۲-۵-۵- منحنی بار به کرنش بتن
۶۷	..... ۳-۵-۵- منحنی بار به کرنش بال کششی
۶۸	..... ۴-۵-۵- منحنی بار به کرنش تاندون ها
۷۱	فصل ششم: بررسی پارامترهای موثر بر رفتار تیرهای مرکب پیش تنیده شده توسط تاندون های خارجی
۷۲	..... ۱-۶- مقدمه
۷۳	..... ۲-۶- اثر موقعیت تاندون در رفتار تیر مرکب پیش تنیده شده
۷۵	..... ۳-۶- اثر افزایش قطر تاندون در رفتار تیر مرکب پیش تنیده شده
۷۸	..... ۴-۶- اثر افزایش نیروی پیش تنیدگی در رفتار تیر مرکب
۸۱	..... فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۲	..... ۱-۷- مقدمه
۸۲	..... ۲-۷- نتیجه گیری
۸۴	..... ۳-۷- پیشنهادات
۸۵	..... فهرست مراجع

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲- تیر مرکب پیش‌تنیده تحت لنگر مثبت ۸
- شکل ۲-۲- توزیع تنش در ناحیه لنگر مثبت ناشی از پیش‌تنیدگی ۱۰
- شکل ۳-۲- توزیع تنش در ناحیه لنگر مثبت ناشی از بار مرده غیر مرکب ۱۰
- شکل ۴-۲- توزیع تنش در ناحیه لنگر مثبت ناشی از بار مرده اضافی ۱۱
- شکل ۵-۲- توزیع تنش در ناحیه لنگر مثبت ناشی از بار زنده و ضربه ۱۱
- شکل ۶-۲- منحنی تنش کرنش ایده آل بتن ۱۲
- شکل ۷-۲- کرنش‌ها و تنش‌ها در مقطع تیر مرکب پیش‌تنیده ۱۳
- شکل ۸-۲- نمودار لنگر و کرنش در محدوده الاستیک ۱۵
- شکل ۹-۲- نمودارهای لنگر و کرنش در محدوده غیر الاستیک ۱۷
- شکل ۱-۴- نمودار بار تغییر مکان ۴۱
- شکل ۲-۴- نمودار بار کرنش بال کششی و فشاری ۴۲
- شکل ۳-۴- نمودار بار کرنش دال بتنی ۴۳
- شکل ۴-۴- خانواده المان‌ها ۴۴
- شکل ۵-۴- المان‌های خطی و غیر خطی ۴۵
- شکل ۱-۵- تیر مرکب پیش‌تنیده ۵۰
- شکل ۲-۵- باکس باز ۵۱
- شکل ۳-۵- وضعیت بارگذاری ۵۲
- شکل ۴-۵- منحنی هاگنستاد اصلاح‌شده ۵۳
- شکل ۵-۵- منحنی بتن غیر مسلح در کشش تک‌محوری ۵۳
- شکل ۶-۵- منحنی تنش-کرنش فشاری بتن ۵۵
- شکل ۷-۵- منحنی تنش-کرنش کششی بتن ۵۶
- شکل ۸-۵- نمودار آزمایشگاهی تنش-کرنش تیر فولادی و تاندون ۵۶

- شکل ۵-۹- نمودار تنش- کرنش تیر فولاد ۵۷
- شکل ۵-۱۰- نمودار تنش- کرنش تاندون ۵۸
- شکل ۵-۱۱- شبکه‌بندی دال بتنی ۶۰
- شکل ۵-۱۲- شبکه‌بندی تیر فولادی ۶۰
- شکل ۵-۱۳- شبکه‌بندی تیر مرکب پیش‌تنیده ۶۱
- شکل ۵-۱۴- نحوه بارگذاری با استفاده از صفحات بارگذاری ۶۳
- شکل ۵-۱۵- شرایط تکیه گاهی ۶۳
- شکل ۵-۱۶- ایجاد خیز منفی توسط تاندون‌ها ۶۴
- شکل ۵-۱۷- نمودار کرنش نرمالیزه-نیرو مربوط به بالای دال بتنی در مرحله پیش‌تنیدگی ۶۴
- شکل ۵-۱۸- ناحیه مدنظر برای محاسبه خیز ۶۶
- شکل ۵-۱۹- منحنی بار-تغییر مکان تیر در وسط دهانه و مدل عددی ۶۶
- شکل ۵-۲۰- ناحیه مدنظر برای محاسبه کرنش دال ۶۷
- شکل ۵-۲۱- منحنی بار-کرنش بتن و مدل عددی ۶۷
- شکل ۵-۲۲- ناحیه مدنظر برای محاسبه کرنش بال کششی ۶۸
- شکل ۵-۲۳- منحنی بار-کرنش بال کششی تیر فولادی و مدل عددی ۶۸
- شکل ۵-۲۴- ناحیه مدنظر برای محاسبه کرنش تاندون ۶۹
- شکل ۵-۲۵- منحنی بار-کرنش در وسط تاندون و مدل عددی ۶۹
- شکل ۶-۱- تیر الف ۷۳
- شکل ۶-۲- تیر ب ۷۳
- شکل ۶-۳- تیر ج ۷۳
- شکل ۶-۴- نمودار بار به کرنش دال بتنی ۷۴
- شکل ۶-۵- منحنی بار به تغییر مکان در میانه تیر فولادی ۷۴
- شکل ۶-۶- افزایش قطر تاندون‌ها ۷۵

- شکل ۶-۷- نمودار بار-کرنش دال بتنی ۷۶
- شکل ۶-۸- نمودار بار-کرنش بال کششی ۷۷
- شکل ۶-۹- نمودار بار- تغییر مکان ۷۷
- شکل ۶-۱۰- نمودار بار-کرنش دال بتنی ۷۸
- شکل ۶-۱۱- نمودار بار- تغییر مکان ۷۹
- شکل ۷-۱- درصد تأثیر برون محوریت در مقاومت ۸۳
- شکل ۷-۲- درصد تأثیر قطر تاندون در مقاومت ۸۳
- شکل ۷-۳- درصد تأثیر افزایش نیرو در مقاومت ۸۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۴- عبارات مربوط به نیرو و لنگر جهت محاسبه تنش در تیر مرکب پیش‌تنیده ۳۹
- جدول ۱-۵- پارامترهای الاستیک بتن ۵۴
- جدول ۲-۵- پارامترهای آسیب‌دیدگی پلاستیک بتن ۵۴
- جدول ۳-۵- پارامترهای رفتار فشاری بتن ۵۵
- جدول ۴-۵- پارامترهای رفتار کششی بتن ۵۵
- جدول ۵-۵- پارامترهای الاستیک فولاد ۵۷
- جدول ۶-۵- رفتار پلاستیک تیر فولادی ۵۷
- جدول ۷-۵- رفتار پلاستیک تاندون‌ها ۵۸
- جدول ۱-۶- شناسه و مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده ۷۳
- جدول ۲-۶- مقایسه بار نهایی نمونه‌ها با تغییر برون محوریت تاندون ۷۵
- جدول ۳-۶- شناسه و مشخصات مدل‌های مورد آزمایش ۷۶
- جدول ۴-۶- مقایسه بار نهایی نمونه‌ها با افزایش قطر تاندون ۷۷
- جدول ۵-۶- شناسه و مشخصات مدل‌های مورد آزمایش ۷۸
- جدول ۶-۶- مقایسه بار نهایی نمونه‌ها با افزایش نیروی تاندون ۷۹

فصل اول:

کلمات

۱-۱- مقدمه

مهندسين همواره با مسائلی که شامل ساخت فولاد و بتن بوده است درگیر بوده‌اند. این مورد از آنجا نشأت می‌گیرد که هرکدام از این ماده‌ها خواص منحصر به فرد خود را دارا می‌باشند. به عنوان مثال اعضای سازه‌های فولادی به طور کلی از مؤلفه‌هایی شامل المان‌های ورقه نازک تهیه و ساخت می‌شوند، در نتیجه به همان اندازه که مستعد پدیده خستگی می‌باشند، مستعد کمناش جانبی و مرکزی نیز می‌باشند. به همین خاطر استانداردهای فولادی عمدتاً معطوف به جلوگیری از گسیختگی توسط کمناش و ناپایداری می‌گردند. به طور معکوس، اعضای سازه بتنی به طور کل ضخیم می‌باشند و پدیده کمناش در آن‌ها به نسبت غیرمحمتمل به نظر می‌رسد.

با این وجود بتن در کشش بسیار ضعیف عمل می‌کند و با گذر زمان بسیار مستعد خزش و انقباض می‌باشد. بدین منظور یکی از راه‌های غلبه بر مقاومت کششی ضعیف بتن، تلاش مجددانه‌ای برای قرار دادن فولاد به عنوان یک جایگزین برای بتن کششی ضعیف می‌باشد. سازه‌های مرکب همچنین خواص منحصر به فرد دیگری را نیز دارا می‌باشند. به عنوان مثال یک تیر منشوری فولادی را می‌توان در نظر گرفت که مقاومت خمشی یکسانی در هر مقطع از تیر را دارا می‌باشد، بنابراین به هنگام طراحی این اطمینان می‌تواند ایجاد شود که مقاومت خمشی از لنگر اعمالی ماکزیمم بیشتر می‌باشد. اعضای سازه‌های مرکب فولادی و بتنی را می‌توان این‌گونه تعریف کرد که یک مقطع فولادی مثل مقطع I شکل به یک مقطع بتنی مثل دال بتنی مسلح چسبانده می‌شود. در نتیجه این دو مؤلفه اکنون به صورت یکپارچه باهم عمل می‌کنند. ورق‌های فولادی در اعضای فولادی می‌توانند کمناش موضعی در هر دو جهت خلاف صفحه‌ی ورق داشته باشند. با این وجود در اعضای مرکب، یک ورق فولادی که به المان بتنی چسبیده باشد فقط می‌تواند کمناشی به دور از المان بتنی داشته باشد و از طرف دیگر این ورق‌ها نسبت به اعضای فولادی تنها به مراتب کمتر مستعد به کمناش می‌باشند. در سازه‌های مرکب مرسوم دال‌های بتنی بر روی تیرهای فولادی قرار می‌گیرند به گونه‌ای که تیرهای فولادی نقش یک تکیه‌گاه را برای آن‌ها ایفا می‌کنند. تحت بارگذاری این دو مؤلفه کاملاً به صورت مستقل از هم

عمل می‌نمایند و اگر در سطح تماس هیچ اتصالی بین آن‌ها نباشد، شاهد لغزش نسبی بین تیر فولادی و دال بتنی خواهیم بود. البته به کمک یک اتصال مناسب و سنجیده بین تیر فولادی و دال بتنی می‌توان لغزش بین آن دو را از میان برداشت. در این صورت تیر فولادی و دال بتنی به صورت یک تیر مرکب عمل خواهند کرد و عملکرد آن‌ها شبیه به یک تیر T شکل یکپارچه خواهد بود. هرچند فولاد و بتن ماده‌های مرسوم مورد استفاده در تیرهای مرکب هستند، ماده‌های دیگری همچون بتن پیش‌تنیده و الوار چوبی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. با عملکرد مرکب بین دال بتنی و تیر فولادی می‌توان از مزایای مربوط به هر کدام تا سر حد لزوم بهره جست.

۱-۲- مزایای استفاده از تیرهای مرکب

به‌طور کلی در تیرهای مرکب فولادی - بتنی، تیرهای فولادی به صورت یکپارچه به یک دال بتنی از پیش ساخته شده یا در محل به عمل‌آوری شده متصل می‌شوند. مزایای بسیار زیادی را از سازه‌های مرکب فولادی - بتنی می‌توان برشمرد. چند مورد از آن‌ها در زیر آورده شده است [۱].

- بیشترین بهره‌وری از فولاد و بتن به عمل آورده می‌شود.
- دهانه و بارگذاری بدون تغییر باقی می‌ماند؛ یک مقطع فولادی در سازه مرکب در قیاس با سازه‌های غیر مرکب مرسوم به مراتب اقتصادی‌تر (به لحاظ عمق و وزن) خواهد بود.
- هرچقدر که عمق تیر کاهش پیدا می‌کند، عمق سازه نیز کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه منجر به دست یافتن به ارتفاع سقف بیشتر خواهد شد.
- به خاطر اینکه در تیر مرکب سختی افزایش می‌یابد. در نتیجه خیز آن نسبت به تیر فولادی نیز کمتر می‌شود.
- سازه مرکب آرایش مناسب‌تری را فراهم می‌کند تا بتوان از فضای آزاد ستون‌ها استفاده بهتری را برد.

- مقاطع تیر فولادی روکش دار مقاومت در برابر خوردگی و آتش سوزی را بهبود می بخشد.
- آزمایش های تجربی نشان داده است که رفتار تیرهای مرکب در تحمل بارهای اضافی و اتفاقی از تیرهای غیر مرکب بیشتر است.
- دال بتنی علاوه بر تحمل بارهای زنده نقش مهمی نیز در باربری کل تیر ایفا می کند. به طور مشخص هنگامی که دال بتنی کاملاً در فشار قرار می گیرد به علت بالا بودن مقاومت فشاری بتن، از دال بتنی به صورت بهینه استفاده می شود. در این حال تیر فولادی در کشش قرار می گیرد که این خود نیز به دلیل مقاومت کششی بالای فولاد و عدم وقوع ناپایداری، یک مزیت محسوب می شود.

۱-۳- معایب تیرهای مرکب

موارد زیر را می توان از معایب تیرهای مرکب برشمرد:

- عملکرد غیر مرکب تیر فولادی و دال بتنی و در نتیجه عدم کارایی بتن در ناحیه لنگر خمشی منفی
- پدیده ی خزش در بتن در ناحیه فشاری، موجب تغییر شکل های درازمدت در تیر مرکب می شود که بایستی به نحو مناسب در محاسبات تغییر مکان تیر مرکب آن را در نظر داشت.
- استفاده از تیرهای مرکب برای دهانه های کوتاه و تحت بارگذاری سبک، مقرون به صرفه نیست.

۱-۴- دستیابی به عملکرد مرکب با استفاده از اتصالات برشی

برای دستیابی به عملکرد مرکب در تیرهای ساخته شده از فولاد و بتن، لازم است جریان یا نیروی برشی توسعه یافته در محل اتصال دو ماده به نحو مناسبی توسط قطعات اتصالی موسوم به برش گیر

تحمل شود. با توسعه فن جوشکاری، امروزه از قطعات اتصالی مختلفی که دارای عملکرد مناسبی در تحمل برش هستند در تیرهای مرکب استفاده می‌شود.

هرچند تعبیه برش گیرها در تیر فولادی در محل کارخانه از جنبه‌ی اقتصادی و اطمینان از نحوه‌ی اتصال مناسب‌تر است، لیکن به دلیل آسیب‌دیدگی در حمل‌ونقل تیر و نیز مشکلات تردد در بال فوقانی تیر، اجرای آن در محل کارگاه ترجیح داده می‌شود. برش گیرها علاوه بر انتقال برش موجود بین تیر فولادی و دال بتنی، نقش مهمی در حفظ یکپارچگی و نیز ممانعت از بلند شدن دال بتنی از روی تیر فولادی ایفا می‌کنند. بدین منظور و برای تحصیل عملکرد کامل در تیر مرکب لازم است برش گیرها صلبیت کافی نیز برای جلوگیری از لغزش در محل اتصال را داشته باشند.

۱-۴-۱- انواع برش گیرها

انواع برش گیرهای (اتصالات برشی) متداول در تیرهای مرکب عبارت‌اند از؛

- گل‌میخ با سر پهن یا قلاب شده

- ناودانی یا نبشی

- میلگردهای مارپیچ

گل‌میخ‌های سر پهن از رایج‌ترین برش گیرها در ساخت تیرهای مرکب هستند که یا به‌وسیله یک تفنگ مخصوص یا به‌وسیله جوش به بال تیرآهن متصل می‌شوند. در صورت عدم دسترسی به گل‌میخ، استفاده از ناودانی به‌عنوان برش گیر نیز در ساخت تیرهای مرکب متداول است [۱].

۱-۵- تیرهای مرکب مدفون در بتن

یکی از راه‌های دستیابی به عملکرد مرکب فولاد بتن استفاده از تیرآهن به‌صورت محصور و مدفون در بتن است. چنانچه حداقل پوشش بتن در محل تیرهای فولادی تأمین شود، می‌توان از عملکرد توأم تیر فولادی و بتن و عدم وقوع لغزش ناشی از برش تیرآهن مدفون در بتن اطمینان حاصل نمود.

پوشش موجود در تیرهای فولادی مدفون در بتن علاوه بر تأمین مقاومت لازم در مقابل برش، از خوردگی، هوازدگی و آتش‌سوزی در تیر فولادی نیز جلوگیری می‌کند. امروزه هرچند از تیرهای مدفون در بتن در ساختمان‌ها و سازه‌های پل کمتر استفاده می‌شود، لیکن در ایران اکثر تیرهای حامل زنبوری شده به‌صورت مدفون در بتن اجرا می‌شوند [۱].

فصل دوم:

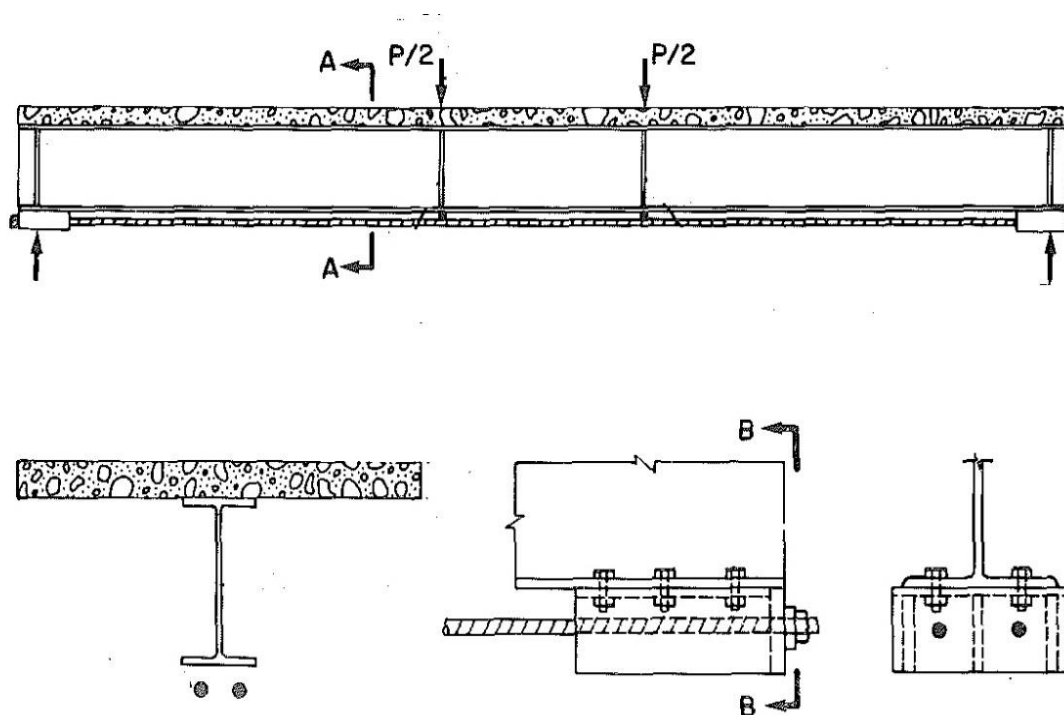
پیش تنیدیکی تیرهای مرکب

۲-۱- مقدمه

در این فصل رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده تحت لنگر مثبت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس یک مدل تحلیلی ارائه خواهد شد که قادر خواهد بود تا تنش‌ها و کرنش‌ها را در یک تیر مرکب پیش‌تنیده تحت لنگر مثبت از مرحله شروع بارگذاری تا گسیختگی پیش‌بینی نماید.

۲-۲- تیر مرکب پیش‌تنیده و نحوه اعمال پیش‌تنیدگی

شکل ۱-۲ نمای جانبی یک تیر مرکب پیش‌تنیده که تحت لنگر مثبت قرار گرفته است را نشان می‌دهد [۲]. دو میلگرد به بال تحتانی تیر فولادی یا بال کششی توسط باکس^۱ متصل می‌شوند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است باکس به بال تحتانی پیچ می‌شود. هر میلگرد به اندازه ۵۰ درصد مقاومت کششی‌اش توسط جک‌های مخصوص کشیده می‌شود.



شکل ۱-۲- تیر مرکب پیش‌تنیده تحت لنگر مثبت [۲]

¹ Open Box

۲-۳- تحلیل غیرخطی تیر مرکب پیش‌تنیده

رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده تحت لنگر خمشی مثبت از طریق یک روش تحلیلی که شامل معادلات

تعداد و سازگاری می‌باشد پیش‌بینی می‌شود [۲].

۲-۳-۱- مفروضات تحلیل

فرض‌های زیر در تحلیل تیر مرکب پیش‌تنیده در نظر گرفته می‌شود؛

- توزیع تنش در تمامی عمق تیر مرکب، خطی خواهد بود.
- اندرکنش بین عرشه بتنی و تیر فولادی کاملاً بدون لغزش در نظر گرفته می‌شود.
- تغییر شکل‌ها^۱ کوچک فرض می‌شود.
- تنش پسماند^۲ در تیر فولادی وجود ندارد.
- تیر فولادی فشرده^۳ خواهد بود.
- فاصله بین میلگردها و تیر فولادی ثابت خواهد بود.
- سازه بدون شمع بندی^۴ خواهد بود.
- تغییر شکل برشی وجود نخواهد داشت.

¹ Deformation

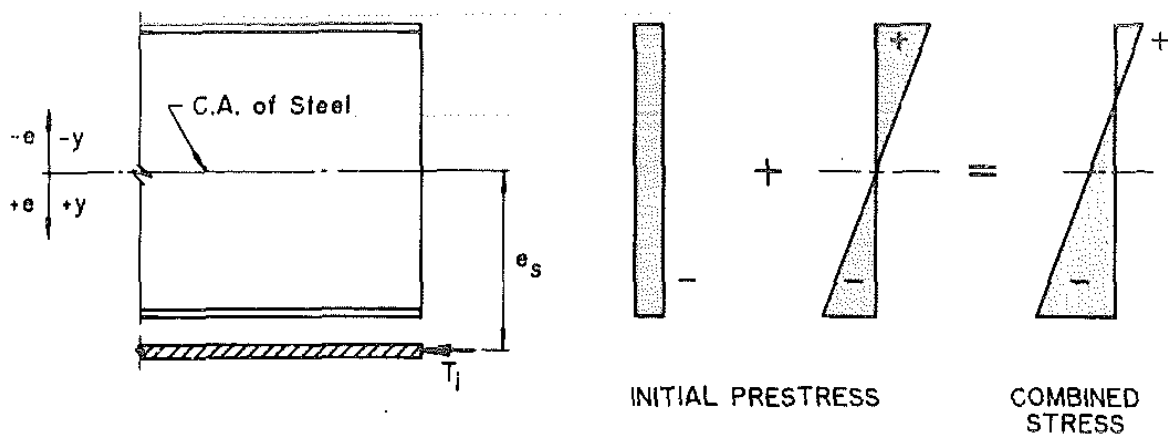
² Residual

³ Compact

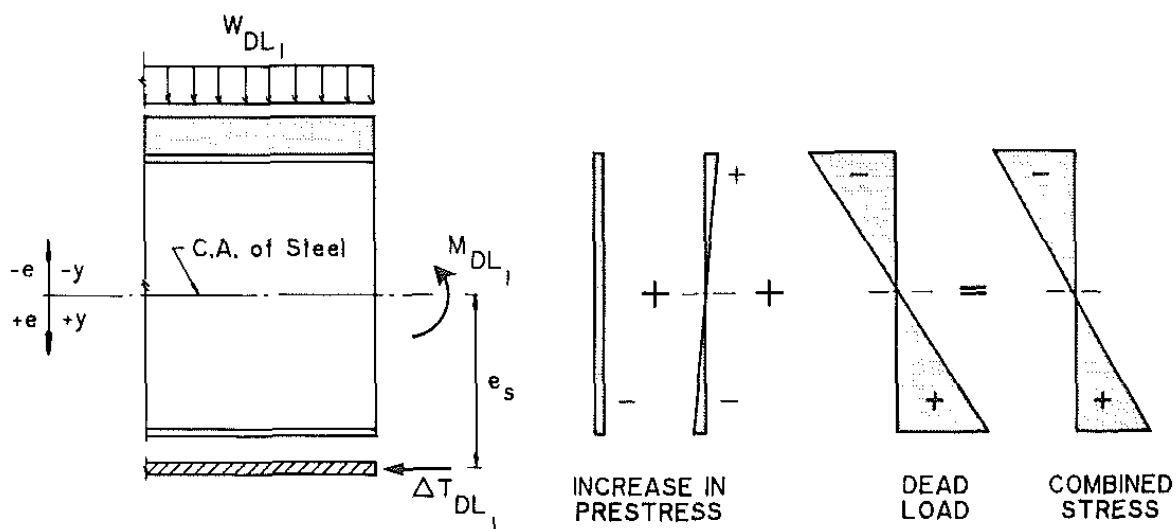
⁴ Shored

۲-۳-۲- توزیع تنش

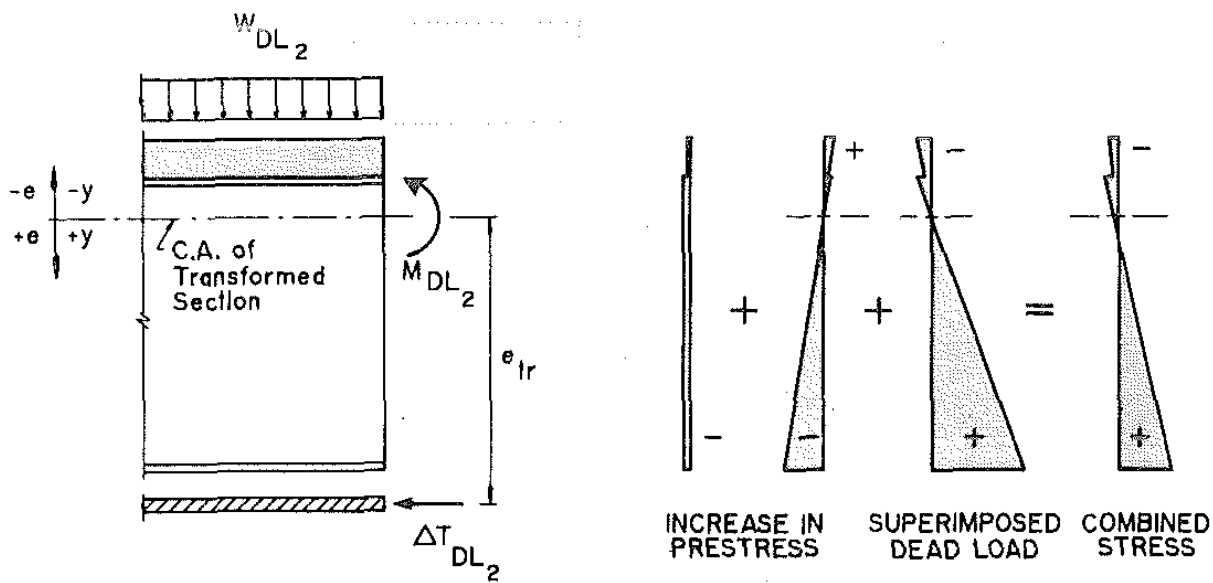
شکل‌های ۲-۲ تا ۵-۲ توزیع تنش را به صورت مجزا در تیر مرکب پیش‌تنیده نشان می‌دهند [۳].



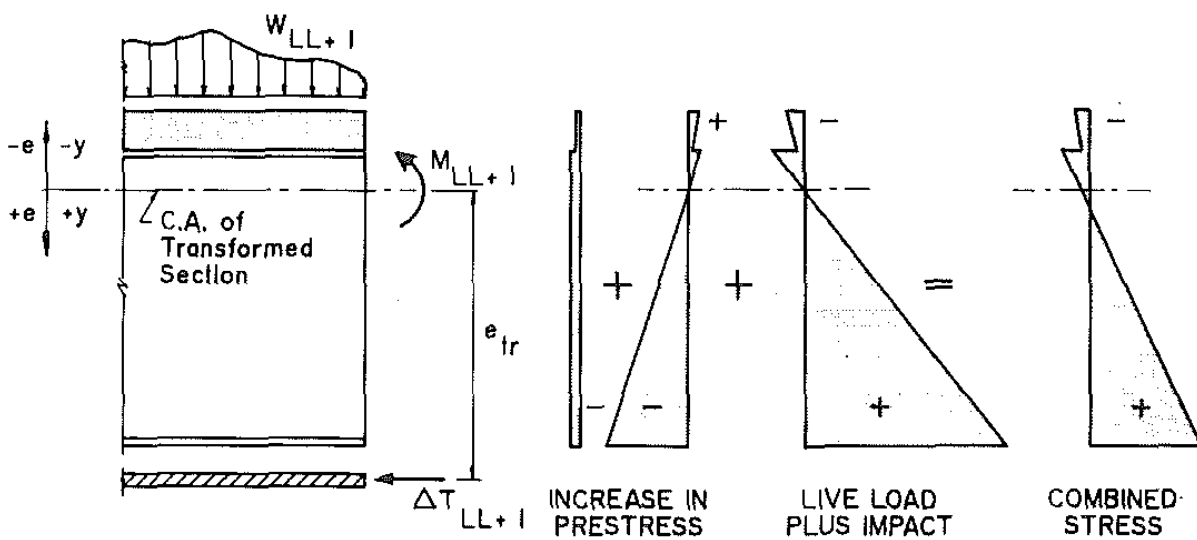
شکل ۲-۲- توزیع تنش در ناحیه لنگر مثبت ناشی از پیش‌تنیدگی [۳]



شکل ۳-۲- توزیع تنش در ناحیه لنگر مثبت ناشی از بار مرده غیر مرکب [۳]



شکل ۲-۴- توزیع تنش در ناحیه لنگر مثبت ناشی از بار مرده اضافی [۳]



شکل ۲-۵- توزیع تنش در ناحیه لنگر مثبت ناشی از بار زنده و ضربه [۳]

با بهره‌گیری از اصل برهم‌نهی^۱ می‌توان توزیع تنش در یک تیر مرکب پیش‌تنیده را به دست آورد

که در بخش بعدی بیشتر به آن خواهیم پرداخت.

^۱ Superposition

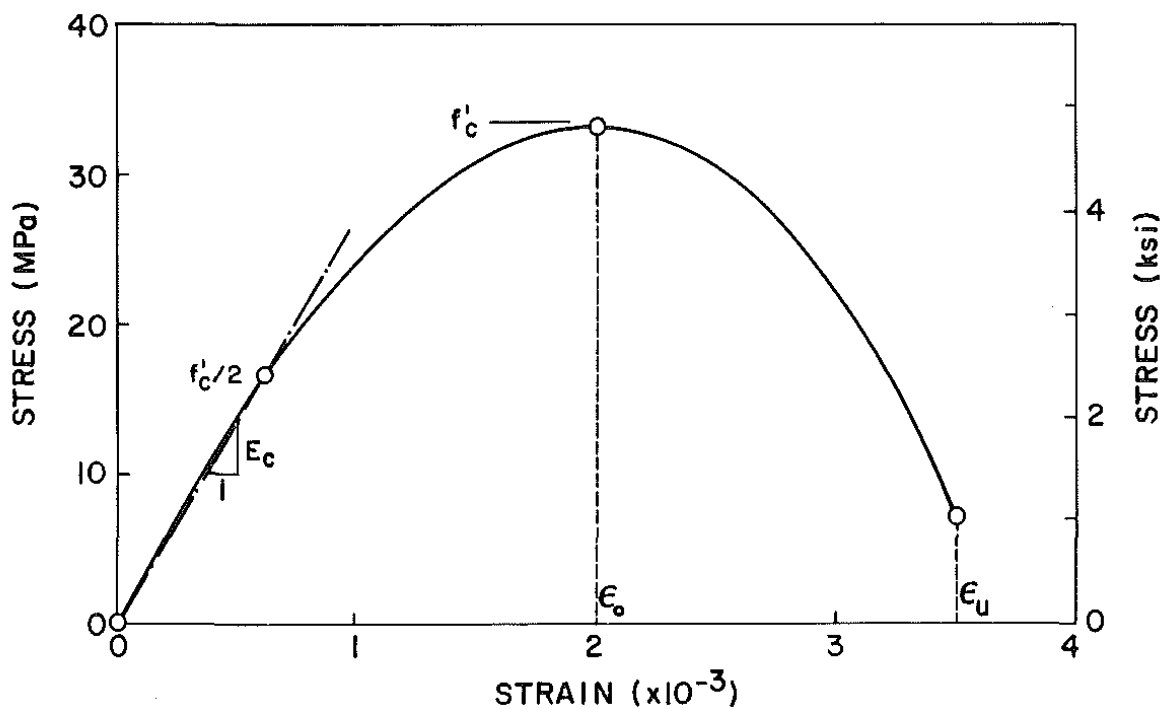
۲-۳-۳- منحنی تنش کرنش ایده آل بتن

منحنی تنش کرنش ایده آل بتن توسط چندجمله‌ای مکعب زیر به دست می‌آید.

$$f_c = a\epsilon_c^3 + b\epsilon_c^2 + c\epsilon_c + d \quad (1-2)$$

f_c تنش در هر نقطه، ϵ_c کرنش در هر نقطه، a و b و c و d ضرایب چندجمله‌ای خواهند

بود.



شکل ۲-۶- منحنی تنش کرنش ایده آل بتن [۲]

ضرایب چندجمله‌ای از طریق قرار دادن مختصات مبدأ، یک نقطه روی خط مدول سکانتی^۱ در ۵۰

درصد مقاومت فشاری، یک نقطه منطبق بر مقاومت فشاری و کرنش متناظر ۰.۰۰۲ و مشتق متناظر

با $d f_c / d \epsilon_c = 0$ در نقطه $\epsilon_0 = 0.002$ در رابطه (۱-۲) به دست خواهند آمد.

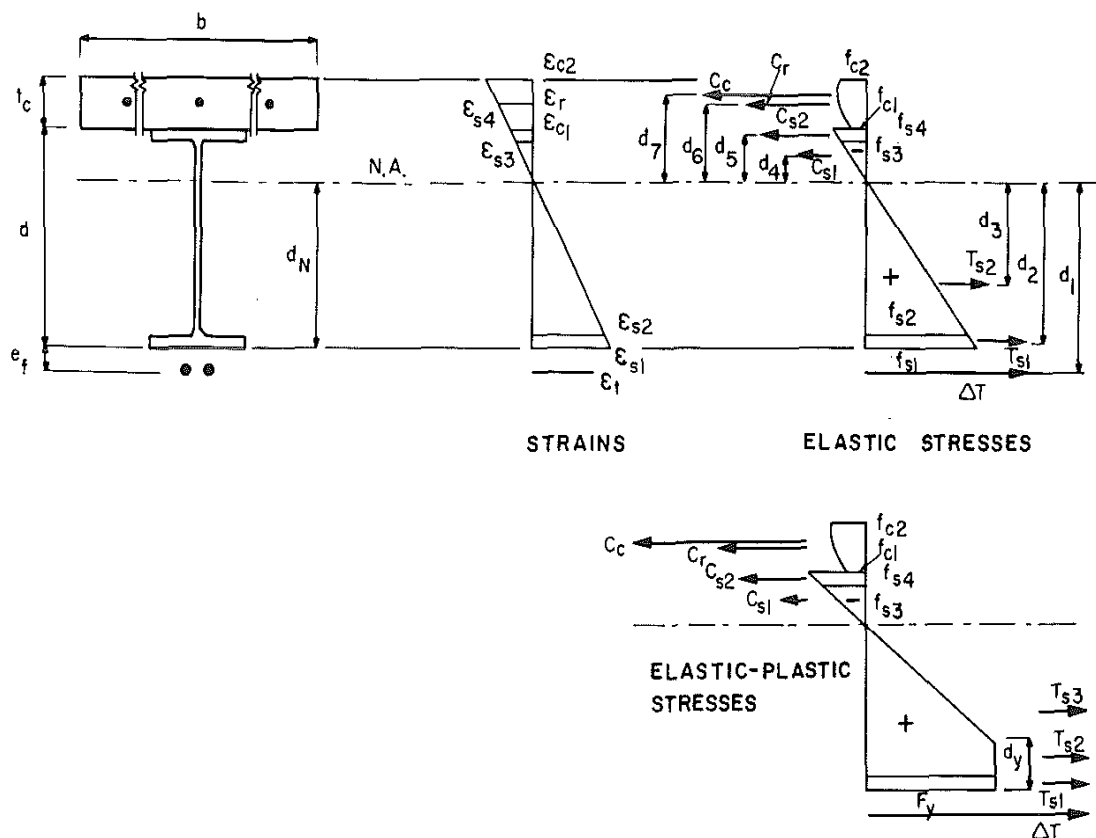
¹ Secant Modulus

۴-۳-۲- محاسبه کرنش‌ها و تنش‌ها

۴-۳-۲-۱- کرنش‌ها

شکل ۷-۲ تنش‌ها و کرنش‌های الاستیک و غیر الاستیک را در مقطع تیر مرکب پیش‌تنیده نشان

می‌دهد.



شکل ۷-۲- کرنش‌ها و تنش‌ها در مقطع تیر مرکب پیش‌تنیده [۲]

برای سادگی محاسبات، کرنش در بال کششی تیر، ϵ_{s1} بجای بار افزایش پیدا می‌کند و کرنش در

هر نقطه‌ی دیگر از مقطع برحسب ϵ_{s1} نوشته می‌شود. موقعیت تار خنثی، d_N نیز فرض می‌شود.

ϵ_{s1} فرض می‌گردد و سپس در هر گام مشخص افزایش می‌یابد.

$$\epsilon_{s2} = - \frac{d_N - t_f}{d_N} \epsilon_{s1} \quad (۲-۲)$$

$$\epsilon_{s3} = - \frac{d - d_N - t_f}{d_N} \epsilon_{s1} \quad (۳-۲)$$

$$\epsilon_{s4} = -\frac{d-d_N}{d_N} \epsilon_{s1} \quad (4-2)$$

$$\epsilon_{c1} = \gamma \epsilon_{s4} \quad (5-2)$$

$$\epsilon_r = -\frac{d+\frac{t_c}{2}-d_N}{d_N} \epsilon_{s1} \quad (6-2)$$

$$\epsilon_{c2} = -\gamma \frac{d+t_c-d_N}{d_N} \epsilon_{s1} \quad (7-2)$$

ϵ_{s1} تا ϵ_{s4} کرنش در تیر فولادی

ϵ_{c1} و ϵ_{c2} کرنش در پایین و بالای دال بتنی

ϵ_r کرنش آرماتورهای دال بتنی

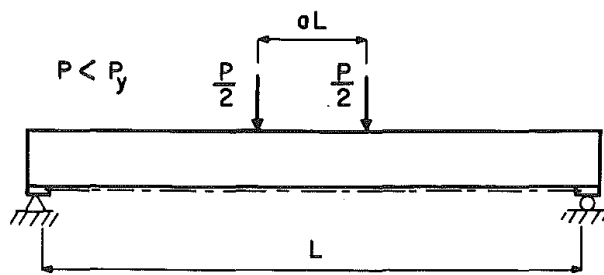
d_N فاصله تار فولادی پایین تا محور خنثی

t_f ضخامت بال ها

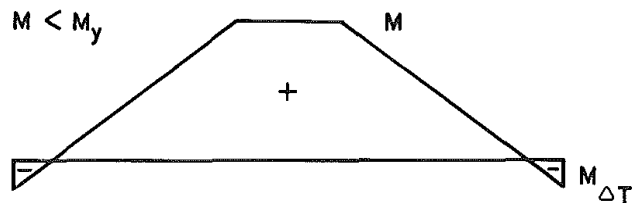
t_c ضخامت عرشه بتنی و $\gamma = +1$ برای بتن ترک نخورده و $\gamma = 0$ برای بتن ترک خورده در نظر گرفته می شود.

تاندون فقط در نقاط انتهایی به تیر اصلی متصل می شود. در نتیجه هیچ گونه نیروی برشی در طول تاندون و تیر فولادی منتقل نمی شود. این بدین معنا است که کرنش در طول تاندون ثابت^۱ باقی می ماند در حالی که با تغییر دیاگرام لنگر خمشی، کرنش در تیر تغییر پیدا می کند. شکل ۸-۲ دیاگرام های لنگر و کرنش در محدوده الاستیک را نشان می دهد.

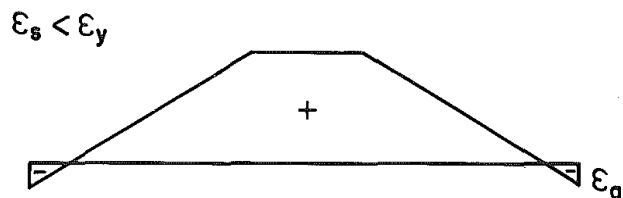
¹ Constant



(a) Beam With Applied Loads



(b) Bending Moment Diagram



(c) Strain Diagram of Beam Fiber at Level of Tendon

شکل ۸-۲- نمودار لنگر و کرنش در محدوده الاستیک [۲]

کرنش در تاندون (ϵ_t) می‌تواند با نوشتن معادله سازگاری برای تغییر طول تاندون و تار پایینی تیر که در تراز تاندون است برحسب ϵ_s به دست آید.

$$\delta_s = \delta_t \quad (۸-۲)$$

که δ_s ازدیاد طول تیر در تراز تاندون و δ_t افزایش طول تاندون است.

چون تاندون زیر بال کششی قرار گرفته است، به‌منظور تحلیل می‌توان یک تیر فرضی در تراز تاندون متصور شد. افزایش طول تیر را می‌توان با انتگرال‌گیری از کرنش آن در بین نقاط تکیه‌گاهی به دست آورد.

$$\delta_s = \int_0^L \epsilon_s dx \quad (9-2)$$

که ϵ_s کرنش در تیر در تراز تاندون و L طول تاندون می باشد.

کرنش در تیر را می توان با استفاده از تشابه مثلثات بر حسب ϵ_{s1} نیز نوشت.

$$\epsilon_s = \epsilon_{s1} \frac{d_N + e_f}{d_N} \quad (10-2)$$

از دیاد طول تاندون (δ_t) با انتگرال گیری از کرنش آن در طولش به دست می آید. به خاطر اینکه

تاندون فقط تحت نیروی محوری می باشد، کرنش در تاندون ثابت باقی می ماند.

$$\delta_t = \int_0^L \epsilon_t dx = \epsilon_t L \quad (11-2)$$

که ϵ_t کرنش در تاندون به خاطر بار اعمالی می باشد.

در محدوده الاستیک δ_s با استفاده از رابطه (9-2) برابر با سطح زیر نمودار کرنش نشان داده شده

در شکل 2-8 ج خواهد بود، که در آن ϵ_a کرنش در تیر در نقاط تکیه گاهی ناشی از افزایش نیرو در

تاندون خواهد بود. برابر قرار دادن از دیاد طول تاندون با افزایش طول الاستیک تیر، نتیجه ی زیر را در

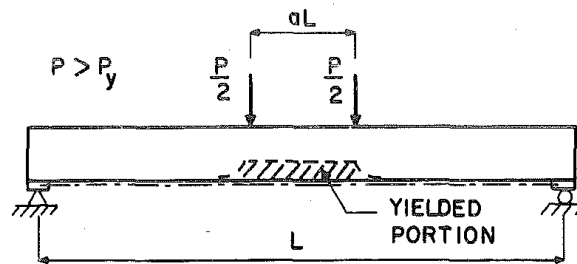
بر خواهد داشت؛

$$\epsilon_t = \left[\frac{1}{2} (1 + a) (\epsilon_s - \epsilon_a) - \epsilon_a \right] \quad (12-2)$$

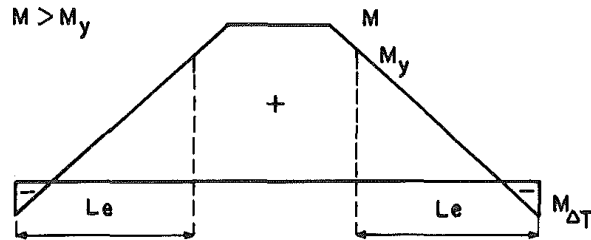
که برای بارگذاری دو بار متقارن، a برابر با نسبت طول تیر بین نقاط بارگذاری، به کل طول تیر

خواهد بود.

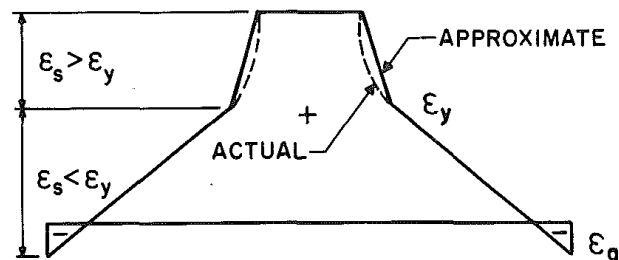
شکل 2-9 دیاگرام های کرنش و لنگر در محدوده ی غیر الاستیک را نشان می دهد.



(a) Beam With Applied Loads



(b) Bending Moment Diagram



(c) Strain Diagram of Beam Fiber at Level of Tendon

شکل ۹-۲- نمودارهای لنگر و کرنش در محدوده غیر الاستیک [۲]

در ناحیه الاستیک- پلاستیک برای اینکه بتوان اثر جاری شدگی در سمت کششی تیر فولادی را مورد بررسی قرارداد، نمودار کرنش برای تیر مورد اصلاح قرار می گیرد (شکل ۹-۲- ج). در این مورد افزایش طول تاندون برابر با سطح زیر نمودار کرنش در شکل ۹-۲- ج خواهد بود. برابر قرار دادن افزایش طول تاندون با افزایش طول الاستیک پلاستیک تیر نتیجه زیر را در بر خواهد داشت؛

$$\epsilon_t = \frac{1}{L} \left[(L - L_e)(\epsilon_y + \epsilon_a) + \frac{1}{2}(L + aL - 2L_e)(\epsilon_s - \epsilon_y) - \epsilon_a L \right] \quad (۱۳-۲)$$

که ϵ_y کرنش تسلیم تیر فولادی خواهد بود.

طول ناحیه الاستیک تیر فولادی (L_e) از طریق تشابه مثلثات به دست می آید.

$$L_e = \frac{L(1-a)(M_{\Delta T} + M_y)}{2(M + M_{\Delta T})} \quad (14-2)$$

که M_y لنگر تسلیم، $M_{\Delta T}$ لنگر ناشی از افزایش نیرو در تاندون و M لنگر خارجی ماکزیمم به وجود آمده ناشی از بار اعمالی خواهد بود.

۲-۳-۴-۲- تنش‌ها

بعد از هر افزایش کرنش ϵ_{s1} تنش‌ها در تیر فولادی، عرشه بتنی و تاندون‌ها با استفاده از دیاگرام‌های تنش و کرنش منحصر به هر ماده، محاسبه می‌شوند.

۲-۳-۴-۳- نیروها

با توجه به شکل ۷-۲ مؤلفه‌های نیرویی که بر مقاطع فولادی وارد می‌شود با استفاده از ضرب تنش‌ها در ناحیه‌های متناظر به دست می‌آیند. مؤلفه‌های نیرو در دال بتنی با انتگرال‌گیری از تنش بتن بر روی سطح مقطع عرشه محاسبه می‌شود.

۲-۳-۴-۴- تار خنثی

موقعیت تار خنثی، d_N با نوشتن معادله تعادل نیروهایی که بر سطح مقطع وارد می‌شوند به دست می‌آید.

$$\Delta T + T_{s1} + T_{s2} - C_{s1} - C_{s2} - C_r - C_c = 0 \quad (15-2)$$

که در آن ΔT افزایش در نیروی تاندون ناشی از بار خارجی است. T_{s1} نیروی کششی در بال تحتانی تیر، T_{s2} نیروی کششی در جان، C_{s1} نیروی فشاری در جان، C_{s2} نیروی فشاری در بال فوقانی، C_r نیروی فشاری در آرماتورها و C_c نیروی فشاری در دال بتنی خواهد بود.
رابطه (۱۵-۲) به‌طور متناوب برای d_N حل می‌شود تا اینکه معادله تعادل ارضا شود.

۲-۳-۴-۵- لنگر داخلی

لنگر داخلی از جمع کردن لنگرهای ناشی از همهی نیروهای داخلی حول تار خنثی به دست می‌آید.

$$M_{int} = \Delta T d_1 + T_{s1} d_2 + T_{s2} d_3 + C_{s1} d_4 + C_{s2} d_5 + C_r d_6 + C_c d_7 \quad (۱۶-۲)$$

که d_1 تا d_7 بازوهای لنگر نشان داده شده در شکل ۲-۷ خواهند بود.

۲-۳-۴-۶- بار اعمالی

بار اعمالی P از برابر قرار دادن لنگرهای داخلی با لنگر خارجی به وجود آمده ناشی از بار اعمالی به دست می‌آید.

فصل سوم:

مروری بر مطالعات گذشته

۳-۱- مقدمه

هشتادمین گزارش سالیانه وزارت راه آمریکا به کنگره ایالات متحده آمریکا درباره‌ی جابجایی و مقاوم‌سازی پل گذرگاه‌های اصلی (HBRRP^۱) به‌طور مشخص به این نکته تأکید می‌کند که سیستم حمل‌ونقل عمومی به علت فرسودگی به‌شدت نیاز به چاره‌اندیشی و بازسازی دارد. بنا بر این گزارش نزدیک به ۴۰ درصد از ۵۷۵,۶۰۷ پل در ایالات متحده آمریکا امکان تأمین مالی برای بازسازی را دارا نمی‌باشند.

شرایط پل‌های کشور به اولویت اول اداره مرکزی بزرگراه‌ها (FHWA^۲) و سازمان‌های مرتبط تبدیل گردید. بنابراین اداره مرکزی بزرگراه‌ها پیشنهاد کرد که ایالت‌ها، در ارتقا پروژه‌های مربوط به پل‌ها، قبل از اینکه تصمیم به جابه‌جایی یک سازه بگیرند، گزینه‌ی مقاوم‌سازی را در اولویت اول خود قرار دهند.

یک ایده طراحی ابتکاری که می‌تواند برای مقاوم‌سازی پل‌ها و همچنین طراحی پل‌های جدید به کار گرفته شود، استفاده از پیش‌تنیدگی در پل‌های مرکب فولادی-بتنی است. فواید اصلی پیش‌تنیدگی که در ادامه بیشتر در مورد آن‌ها توضیح داده خواهد شد شامل موارد زیر است:

پیش‌تنیدگی موجب افزایش ظرفیت نهایی، بسط دادن رفتار الاستیک، بهبود مقاومت خستگی و کاهش وزن کلی سازه می‌شود.

در این فصل، مطالعات انجام‌گرفته بر روی تیرهای مرکب پیش‌تنیده به سه قسمت عمده تقسیم‌بندی می‌شود. بخش اول مربوط به مطالعات تحلیلی صورت گرفته خواهد بود. بخش دوم مربوط به مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته می‌باشد و بخش سوم نیز مربوط به مطالعات پارامتریک تیرهای مرکب پیش‌تنیده خواهد بود. در پایان به فواید تیرهای مرکب پیش‌تنیده اشاره خواهد شد.

^۱ Highway Bridge Replacement and Rehabilitation Program

^۲ Federal Highway Administration

۳-۲- مطالعات تحلیلی گذشته

ایده‌ی پیش‌تنیده کردن سازه‌های فولادی و اعضای مرکب فولادی بتنی به نسبت جدید می‌باشد و مطالعات تحلیلی اندکی تا به امروز بر روی آن‌ها صورت گرفته است.

به‌عنوان مثال اسزیلارد^۱ در سال ۱۹۵۹ [۴] معادله‌هایی را برای محاسبه‌ی تنش‌ها در یک تیر مرکب با شرایط تکیه‌گاهی ساده که توسط کابل‌های مقاومت بالا به‌طور آویزان پیش‌تنیده شده بودند را بسط داد. همچنین در محاسباتش اتلاف پیش‌تنیدگی به خاطر خزش و انقباض عرشه بتنی و وادادگی سیم‌ها را نیز لحاظ کرد. هادلی^۲ در سال ۱۹۶۳ [۵] تنش‌ها در تیر فولادی و عرشه بتنی یک تیر مرکب پیش‌تنیده شده را محاسبه کرد و یک عبارت برای افزایش نیرو در تاندون‌ها با بارهای اعمال‌شده با استفاده از روش انرژی کرنشی و فرض رفتار الاستیک استخراج کرد. او همچنین مقادیر بالا و پایین مقاومت نهایی را بر پایه‌ی به ترتیب ابتدا تسلیم تیر فولادی و گسیختگی کششی تاندون تخمین زد. ریگان و کراهال^۳ در سال ۱۹۶۷ [۶] تغییر مکان‌ها، کرنش‌ها در تیر فولادی و عرشه بتنی و همچنین تغییر در نیروی تاندون پیش‌تنیده شده را در محدوده‌ی بارگذاری الاستیک و غیر الاستیک محاسبه کردند. روش تحلیلی افزایشی آن‌ها شامل قطعه‌بندی تیر تحت یک سری از المان‌های خطی، فرض کرنش در بال تحتانی تیر فولادی، فرض نیرو در تاندون، نوشتن معادله‌های تعادل نیروها و لنگرها در محل اتصال گره و حل عددی سیستم معادله‌های مشابه غیرخطی بود. روند در هر نمو کرنش تکرار شد تا معادله‌ی تعادل ارضا شود و نیروی تاندون فرض شده برابر با مقدار اندازه‌گیری شده شود. ریگان و کراهال باید در هر تکرار یک نیروی تاندون فرض می‌کردند به خاطر اینکه آن‌ها معادله سازگاری بین کرنش‌ها در تاندون و تیر فولادی را نداشتند. توچاک و مهاتا^۴ در سال ۱۹۷۲ [۷] ابعاد بهینه یک تیر اصلی که با تاندون‌های مقاومت بالا به‌صورت مستقیم نزدیک به

¹ Szilard

² Hoadley

³ Reagan & Krahl

⁴ Tochacek & Mehta

بال کششی قرار داشتند را مورد مطالعه قراردادند. تحلیل حالت حدی نشان داد که اضافه کردن تاندون‌ها وزن تیر اصلی را تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهد. تا سال ۱۹۸۹ هیچ مطالعه‌ای بر روی تیرهای مرکب پیش‌تنیده تحت لنگر خمشی منفی صورت نپذیرفته بود و تمامی مطالعات گذشته شامل یک فرم بسته از شرایط سازگاری کرنش‌ها در ناحیه‌ی غیر الاستیک بود.

حمید سعادت منش و همکاران در سال ۱۹۸۹ [۲] به‌طور خاص در یک تیر مرکب پیش‌تنیده شده، کرنش‌ها و تغییر مکان در تیر فولادی، عرشه بتنی و تاندون‌ها را در ناحیه‌ی لنگر مثبت و منفی تحت بارگذاری تا گسیختگی دال بتنی را با استفاده از یک مدل تحلیلی غیرخطی محاسبه کردند.

۳-۳- مطالعات آزمایشگاهی بروی تیرهای مرکب پیش‌تنیده

تاجیبانا^۱ و همکاران در سال ۱۹۶۴ [۸] سه تیر مرکب پیش‌تنیده شده را که همچون پل مدل شده بودند را آزمایش کردند. پل الف دارای شرایط تکیه‌گاهی ساده و پل ب و ج دو دهانه پیوسته بودند. همه‌ی تیرها در ناحیه‌ی لنگر مثبت پیش‌تنیده شدند با این تفاوت که تیر الف و ج قبل از اینکه بتن ریخته شود پیش‌تنیده گردیدند و تیر ب بعد از اینکه بتن ریخته شد پیش‌تنیده گردید. خیز الاستیک و تغییر در نیروی تاندون محاسبه‌شده با مقادیر آزمایشگاهی مطابقت داشتند. عرشه بتنی تیر ج، به‌مراتب در بار پایین‌تری نسبت به عرشه بتنی تیر ب ترک برداشت. در نتیجه محققین نتیجه گرفتند که ناحیه‌ی لنگر منفی باید بعد از اینکه عرشه بتنی ریخته شد پیش‌تنیده گردد. استراس^۲ در سال ۱۹۶۴ [۹] سه تیر مرکب پیش‌تنیده شده با تکیه‌گاه‌های ساده تحت لنگر خمشی مثبت را مورد آزمایش قرارداد. کرنش‌های اندازه‌گیری شده در دال بتنی تیر فولادی و کابل به‌طور معقولی با مقادیر اندازه‌گیری شده همخوانی داشتند. مورکوسکی^۳ در سال ۱۹۷۴ [۱۰] یک خرپای پیش‌تنیده شده که برای نگهداری سقف‌های ساختمان صنعتی مناسب بودند را مورد آزمایش قرارداد. مورکوسکی به این نتیجه رسید که پیش‌تنیدگی ظرفیت باربری نهایی الاستیک و مقاومت کمانشی یال فوقانی خرپا را

¹ Tachibana

² Stras

³ Murkowski

افزایش می‌دهد. باین‌حال مطالعات بیشتری نیاز می‌باشد تا اجرای این نوع از خریاها در مسائل مهندسی عملیاتی شود.

فرجنسیک و توچانک^۱ در سال ۱۹۸۰ [۱۱] بال کششی شش تیر نورد شده را با وایرهای مقاومت بالا تحت پیش تنیدگی قراردادند. مقدار نیروی پیش تنیدگی به اندازه ای انتخاب شد تا از تسلیم بال تحتانی جلوگیری به عمل آید. کرنش الاستیک اندازه‌گیری شده در تمام ارتفاع تیر با کرنش‌های پیش‌بینی‌شده مطابقت داشتند. باین‌وجود مقادیر اندازه‌گیری شده در نیروی تاندون از مقادیر محاسبه‌شده کوچک‌تر بود. کلایر^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۳ [۱۲] چهار تیر فولادی مرکب پیش‌تنیده را مورد آزمایش قرارداد. متغیرهای آزمایش اضافه کردن برش گیرها و سطح نیروی پیش تنیدگی بود. دو عدد از تیرها با برش گیرهای اضافه‌شده لغزش کمتری را نشان دادند و درنهایت پس از خرد شدن برش گیرها گسیخته شدند. تیر سوم در محل برش گیرها گسیخته شد و تیر چهارم به خاطر نرسیدن به بار نهایی نیمه‌تمام ماند. سعادت منش و همکاران در سال ۱۹۸۹ [۱۳] دو تیر مرکب پیش‌تنیده شده را تحت لنگر مثبت مورد آزمایش قراردادند و به این نتیجه رسیدند که هرچقدر تاندون‌ها نسبت به تار خنثی دورتر باشند بار جاری‌شدگی و بار نهایی افزایش پیدا می‌کند.

۳-۴- مطالعه پارامتریک تیرهای مرکب پیش‌تنیده

اسزیلارد در سال ۱۹۵۹ با استفاده از روش کار مجازی تنش‌ها را در یک تیر مرکب پیش‌تنیده محاسبه کرد. او تأثیر خزش و انقباض بتن و وادادگی تنش در تاندون‌ها را موردبررسی قرارداد. ریگان و کراهال در سال ۱۹۶۷ یک سری از تیرهای مرکب پیش‌تنیده را مورد آزمایش قراردادند که تحلیل عددی آن‌ها مبتنی بر تعادل نیروها و سازگاری کرنش‌ها بود. آن‌ها تحلیل عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از استراس مقایسه کردند که درنتیجه‌ی آن مطابقت خوبی را با نتایج آزمایشگاهی حاصل کردند. کلایر و همکاران در سال ۱۹۸۲ امکان استفاده از پس کشیدگی برای

¹ Ferjencik & Tochacek

² Klaiber

افزایش مقاومت تیرهای مرکب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای بررسی رفتار تیرهای مرکب پس کشیده از تئوری صفحه‌ی ارتوتروپیک بهره جستند. تریوسکی^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۹ [۱۴] یک روش تحلیل استاتیکی تیرهای مرکب پیش‌تنیده را معرفی کردند. تحلیل آن‌ها مبتنی بر روش نرمی بود. به این صورت که با در نظر گرفتن فرض‌هایی سازه نامعین را به سازه معین تبدیل می‌کردند و ضرایب تغییر مکان با استفاده از روش کار مجازی به دست می‌آمد. سعادت منس و همکاران در سال ۱۹۸۹ یک مدل تحلیلی را که بر پایه‌ی تنش مجاز و مقاومت نهایی بود را پایه‌ریزی کردند. همچنین ایوب^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۰ [۱۵] رفتار تیرهای مرکب را با استفاده از تغییر پارامترهایی چون شکل قرارگیری تاندون و نوع تاندون اعم از میلگرد یا کابل مورد بررسی قرار دادند و نتیجه‌ای که به دست آوردند این بود که تاندون‌های مستقیم و دارای مقطع عرضی کابل به مراتب عملکرد مطلوب‌تری دارند.

۳-۵- نتایج به دست آمده از تحقیقات:

به‌طور کلی می‌توان فواید زیر را برای تیرهای مرکب پیش‌تنیده برشمرد:

۱- گسترده کردن محدوده رفتار الاستیک؛

اولین فایده که از مقدمه می‌توان نتیجه گرفت ایجاد یک لنگر کوپل داخلی که در خلاف جهت لنگر ناشی از اعمال بارهای خارجی می‌باشد. به‌عنوان مثال، پیش‌تنیده کردن یک عضو کششی بار تسلیم را افزایش می‌دهد، زیرا برای رسیدن به تسلیم، تنش در عضو باید از تنش فشاری اولیه تا تنش تسلیم در کشش تغییر نماید.

۲- افزایش ظرفیت نهایی؛

در درجه دوم، اضافه کردن تاندون‌ها به یک عضو فولادی ظرفیت نهایی را افزایش می‌دهد.

با این حال پیش‌تنیده کردن تاندون‌ها هیچ تأثیری بر روی ظرفیت نهایی ندارد.

¹ Troitsky

² Ayyub

۳- کاهش وزن سازه فلزی؛

سومین نتیجه‌ای که از جایگزین کردن تاندون‌های فولادی با مقاومت بالا با فولاد مقاومت پایین به دست می‌آید، کاهش دادن وزن سازه فلزی می‌باشد.

۴- بهبود بخشیدن به خستگی^۱ و مقاومت گسیختگی^۲؛

چهارم اینکه، پیش فشرده کردن بال کششی، باعث کاهش دادن قسمت کششی سیکل‌های محدوده تنش می‌شود و ممکن است که مقاومت خستگی را افزایش دهد. پیش تنیدگی به‌اندازه کافی حتی می‌تواند بال کششی را تا درجه‌ای فشرده نماید که منجر به تعویق انداختن یا جلوگیری از آغاز و رشد ترک خستگی نیز شود. همچنین پایین آوردن تنش کششی ماکزیمم در این روش به‌احتمال زیاد گسیختگی ترد^۳ را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ایجاد مسیرهای باربری متعدد با اضافه کردن تاندون‌ها در طول بال کششی، نامعینی^۴ را افزایش می‌دهد و بحران گسیختگی را کاهش می‌دهد. به‌عنوان مثال از منافع پیش‌تنیده کردن باهدف مقاومت خستگی، اضافه کردن تاندون‌ها به یک تیر سراسری مرکب است که بسیار ارجح‌تر از جوش دادن ورق تقویت به بال‌هاست، چراکه تاندون‌ها مقاومت خستگی بسیار بالاتری از ورق‌های تقویتی انتهایی دارند.

¹ Fatigue

² Fracture

³ Brittle

⁴ Redundancy

فصل چهارم:

قوانین و روابط مربوط به مدل سازی

روش‌های عددی متنوعی برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم به سیستم‌ها ایجاد و امروزه به طرز وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بسته به نوع روش عددی مورد استفاده و نوع المان بندی، روش‌های مختلفی نظیر حجم محدود، اجزاء محدود، تفاضل محدود و ... حاصل شده است. هر کدام از روش‌های فوق‌الذکر، در قالب نرم‌افزارهای متنوع به کاربران عرضه می‌شوند. روشی که در اغلب مسائل مکانیک جامدات مورد استفاده قرار می‌گیرد روش اجزاء محدود است که در قالب نرم‌افزارهایی چون Ansys، Abaqus، Nastran و ... قابل استفاده است.

آباکوس یک مجموعه از برنامه‌های مدل‌سازی بسیار توانمند می‌باشد که مبتنی بر روش اجزاء محدود، قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان به صورت مجازی توسط این المان‌ها مدل کرد. همچنین دارای مدل‌های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن تقویت‌شده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ به کار برده می‌شود. در این پایان‌نامه برای مدل‌سازی عددی نمونه آزمایشگاهی از نسخه ۱-۱۰-۶ آباکوس استفاده شده است. در این فصل به آشنایی با روش عددی، مدل‌سازی رفتار مصالح، طراحی و بررسی تیرهای مرکب و شناخت المان‌ها در آباکوس پرداخته می‌شود.

۲-۴- حل عددی معادلات دیفرانسیل

معمولاً مهندسان و فیزیکدان‌ها یک پدیده فیزیکی را به وسیله دستگاهی از معادلات دیفرانسیل معمولی که شرایط مرزی و آغازین مناسبی را تأمین می‌کند توصیف می‌کنند. در واقع یک معادله دیفرانسیل با شرایط مرزی و اولیه مورد نیاز خود یک مدل ریاضی کامل از یک پدیده است. برای یافتن توزیع متغیرهای مورد نظر که ارتباط آن‌ها در فرم دیفرانسیلی توسط معادله حاکم بیان می‌گردد، می‌بایست معادله مذکور حل گردد تا بتوان مقادیر عددی هر کمیت مرتبط را در نقاط دلخواه به دست آورد. اما با توجه به اینکه تنها می‌توان اشکال بسیار ساده این معادلات آن‌هم در ناحیه‌های هندسی بسیار ساده را با روش‌های تحلیلی حل نمود، در حل اغلب معادلات حاکم به روش تحلیلی با مشکل بزرگی مواجه هستیم. برای مقابله با چنین مشکلاتی و نیز جهت استفاده از قدرتمندترین وسیله موجود در قرن حاضر یعنی کامپیوتر، ضروری است که مسئله مورد نظر در یک قالب کاملاً جبری ریخته شود تا حل آن‌ها تنها نیازمند عملیات جبری باشد. برای دستیابی به چنین هدفی می‌توان از انواع مختلف روش‌های گسسته سازی یک مسئله پیوسته تعریف شده به وسیله معادلات دیفرانسیل استفاده نمود. در این روش‌ها تابع و یا توابع مجهول که می‌توان آن‌ها را با مجموعه‌ای نامتناهی از اعداد نشان داد، به وسیله تعداد متناهی از پارامترهای مجهول جایگزین می‌گردند که طبیعتاً در حالت کلی نوعی تقریب را در بردارد.

۳-۴- کلیات روش اجزا محدود

روش اجزاء محدود یک دستورالعمل عددی جهت حل مسائل فیزیکی می‌باشد که توسط معادله دیفرانسیل توصیف می‌شوند. این روش دارای دو ویژگی است که آن را از سایر روش‌های عددی متمایز می‌سازد:

- در این روش از یک فرمول‌بندی انتگرالی جهت ایجاد یک دستگاه معادلات جبری استفاده می‌شود.

• در این روش از توابع هموار به طور قطعه‌ای پیوسته جهت تقریب کمیات مجهول استفاده می‌شود.

روش اجزاء محدود را می‌توان به پنج مرحله اصلی تقسیم کرد:

۱- تقسیم ناحیه مورد بحث به تعداد زیادی زیر ناحیه کوچک موسوم به المان که نقاط اتصال المان‌ها به یکدیگر، گره نامیده می‌شود.

۲- تعیین تقریب اولیه برای حل به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول که معمولاً یا خطی و یا مرتبه دوم است. پس از تعیین شدن مرتبه تقریب اولیه، معادله حاکم در هر گره نوشته می‌شود.

۳- استخراج دستگاه معادلات جبری. با انتگرال‌گیری، برای هر گره یک معادله جبری ایجاد می‌گردد که پس از استخراج معادلات همه گره‌ها، دستگاه معادلات به وجود می‌آید.

۴- حل دستگاه معادلات ایجاد شده.

۵- محاسبه سایر کمیات از روی مقادیر گره‌ی.

۴-۴- روش حل استاندارد در آباکوس به وسیله المان‌های تیر و اجسام صلب

۴-۴-۱- المان‌های تیر

المان‌های تیر وقتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که یک بعد سازه مورد نظر (طول آن) به طور قابل توجهی از دو بعد دیگر بیشتر و تنش‌های طولی مهم‌ترین متغیر درخواستی باشد. تئوری تیر بر پایه این فرض است که تغییر شکل سازه را می‌توان تنها با استفاده از متغیرهایی که تابع محل مورد نظر در طول سازه است، به دست آورد. برای اینکه تئوری تیر جواب‌های قابل قبولی ارائه کند لازم است که ابعاد سطح مقطع سازه از ۱. طول آن کوچک‌تر باشد. در المان‌های تیر آباکوس فرض بر این است که صفحات عمود بر محور تیر پس از تغییر شکل به صورت صفحه باقی می‌ماند. در بکارگیری المان‌های تیر ابعاد سطح مقطع المان لزوماً نباید کمتر از ۱. طول آن المان باشد. در یک مش بندی خیلی ریز ممکن است ابعاد سطح مقطع یک المان حتی از طول آن بیشتر باشد، هر چند که این مورد به طور عمومی توصیه نمی‌شود و بهتر است در این حالت از المان‌های سه‌بعدی استفاده نمود.

۴-۲-۴- اجسام صلب

المان‌های محدود و اجسام صلب مؤلفه‌های اساسی یک مدل آباکوس هستند. المان‌های محدود، شکل‌پذیر هستند درحالی‌که اجسام صلب بدون تغییر شکل در فضا حرکت می‌کنند. برای افزایش بازده محاسباتی، برنامه آباکوس توانایی‌های عمومی در مورد مدل‌سازی اجسام صلب دارد. هر جسم یا بخشی از آن را می‌توان به صورت جسم صلب تعریف نمود. بیشتر انواع المان می‌تواند برای تعریف اجسام صلب مورد استفاده قرار گیرد. مزیت اجسام صلب نسبت به اجسام شکل‌پذیر این است که اجسام صلب تنها دارای شش درجه آزادی در یک گره مرجع که برای آن جسم صلب تعریف شده، هستند. برعکس، المان‌های شکل‌پذیر درجات آزادی متعددی دارند که برای محاسبه تغییر شکل آن‌ها محاسبات زیادی باید انجام شود. وقتی که این تغییر مکان‌ها قابل صرف‌نظر کردن باشند و یا برای کاربر مهم نباشند، مدل‌سازی جسم به صورت صلب به طور فراوانی از حجم محاسبات می‌کاهد بدون آنکه بر دقت نتایج خروجی تأثیری داشته باشد.

۴-۵- مدل‌سازی رفتار مصالح در آباکوس

در ادامه به اصول کلی مدل‌سازی مصالح که همان بتن و فولاد می‌باشند خواهیم پرداخت.

۴-۵-۱- بتن

۴-۵-۱-۱- آسیب‌دیدگی بتن در آباکوس

در نرم‌افزار آباکوس برای در نظر گرفتن خرابی مصالح سه نوع ترک‌خوردگی قابل مدل‌سازی است که باید در بخش خواص مصالح تعریف شود [۱۶].

- مدل‌سازی ترک‌خوردگی بتن با Smeared crack concrete model
- مدل‌سازی ترک‌خوردگی بتن با Brittle crack concrete model
- مدل‌سازی ترک‌خوردگی بتن با Concrete damage plasticity model

در این پایان‌نامه به منظور شبیه‌سازی رفتار بتن از مدل آسیب‌دیدگی پلاستیک بهره گرفته شده است.

۴-۵-۱-۲- پارامتر (f)

این پارامتر مشخصات تابع گسیختگی را بیان کرده و توسط f_{b0}/f_{c0} یا همان نسبت مقاومت فشاری دومحوره بتن به مقاومت فشاری تک‌محوره تعریف می‌شود. اغلب منابع مقدار ۱,۱۶ و ۱,۲۵ را وابسته به مقاومت بتن و درجه محصورشدگی معرفی کرده‌اند. در این پایان‌نامه از مقدار ۱,۱۷ برای نسبت f_{b0}/f_{c0} استفاده شده است.

۴-۵-۱-۳- زاویه اتساع (Ψ)

زاویه اتساع^۱ کرنش پلاستیک بر اثر برش را در فاز بعد از الاستیک تعریف می‌نماید. هنگامی که $\Psi=0$ باشد ماده هیچ‌گونه تغییر حجم کرنشی ندارد [۱۶]. با توجه به آزمایش‌ها، مشخص شده است که برای بتن مسلح زاویه اتساع بین ۲۰ تا ۴۰ درجه خواهد بود [۱۷]. هرچه مقدار این زاویه کوچک‌تر باشد رفتار مصالح ترد و هرچه این زاویه بزرگ‌تر باشد ماده از خود رفتاری مانند مواد شکل‌پذیر نشان می‌دهد [۱۸]. در این پایان‌نامه از زاویه اتساع ۳۰,۵ بهره گرفته شده است.

۴-۵-۱-۴- پارامتر (γ)

این پارامتر شکل صفحه تنش و همین‌طور زاویه محصورشدگی بتن را تعریف می‌کند. صفحه گسیختگی بتن در مختصات سه‌بعدی تنش اصلی، برای تنش‌های کم، یک سطح مقطع مثلثی دارد و در شرایط تنش هیدرو استاتیکی بالا به شکل دایروی می‌باشد [۱۹]. به عبارت دیگر هنگامی که صفحه انحراف^۲ به شکل مثلثی نزدیک باشد، درجه محصورشدگی کمتر و هنگامی دایره‌ای شکل باشد درجه محصورشدگی زیاد را در نظر می‌گیرند [۱۶]. این پارامتر از روابط زیر به دست می‌آید که در آن J_2

¹ Dilation Angle

² Deviatoric Plane

نامتغیر^۱ دوم تانسور تنش انحرافی برای کشش و فشار نصف‌النهاری^۲ می‌باشد. پارامتر γ رایین ۶۶۶ و
 ۱ تعریف کرده‌اند که در این تحقیق مقدار ۶۶۶ منظور شده است.

$$\gamma = \frac{3(1-\rho)}{2\rho+3} \quad (1-4)$$

$$\rho = \frac{(\sqrt{J_2})_{TM}}{(\sqrt{J_2})_{CM}} \quad (2-4)$$

۴-۵-۱-۵- پارامتر ویسکوزیته (η)

در نظر گرفتن پارامتر ویسکوزیته باعث می‌شود که حساسیت نسبت به سطح تسلیم^۳ کمتر شود و در نتیجه مشکلات همگرایی تا حدودی بهبود یابد. طبیعی است که این مقدار باید به حدی کوچک باشد که بتوان از تأثیرات آن بر پاسخ کلی سازه جلوگیری کرد. در این پایان‌نامه برای رسیدن به همگرایی مطلوب از ویسکوزیته ۰.۰۱ استفاده شده است.

۴-۵-۱-۶- خروج از مرکزیت (E)

در مدل خرابی پلاستیک بتن، سطح پتانسیل پلاستیک در صفحه نصف‌النهاری به فرم یک هذلولی می‌باشد. این شکل از طریق برون محوریت یا خروج از مرکزیت پتانسیل پلاستیک تنظیم می‌گردد. خروج از مرکزیت پتانسیل پلاستیک، در واقع نرخ نزدیک شدن هذلولی پتانسیل پلاستیک به مجانبش می‌باشد. به عبارت دیگر طول قطعه‌ای^۴ که رأس^۵ هذلولی و مجانب هذلولی را قطع می‌نماید پارامتر برون محوریت نام می‌گیرد. مدل خرابی پلاستیک در آباکوس، به طور پیش فرض مقدار ۱ را در نظر می‌گیرد [۲۰]. در این تحقیق نیز میزان برون محوریت همان ۱ در نظر گرفته شده است.

¹ Invariant

² Meridian

³ Yield Surface

⁴ Segment

⁵ Vertex

۴-۵-۲- فولاد

برای مدل‌سازی رفتار فولاد از مدل رفتار متوسط که مشخصه‌های رفتاری آن شامل ضریب پواسون، مدول الاستیسیته و تنش نهایی و کرنش پلاستیک است استفاده گردیده است.

۴-۶- روش طراحی و تحلیل تیرهای مرکب پیش‌تنیده بر اساس تنش مجاز

۴-۶-۱- روند طراحی

طراحی به روش تنش مجاز تیرهای مرکب پیش‌تنیده با شرایط تکیه‌گاهی ساده یا دهانه‌های پیوسته، شامل گام‌های اصلی زیر می‌گردد:

- ۱- در ابتدا یک تحلیل مقدماتی صورت می‌گیرد.
- ۲- یک طراحی مقدماتی بر اساس لنگر محاسبه‌شده در مرحله‌ی ۱ صورت می‌پذیرد و اندازه تاندون و مقطع عرضی تیر کامپوزیت انتخاب می‌گردد.
- ۳- برای هر نمونه از بار، نیروی محوری در تاندون و نیروی محوری و لنگر در تیر مرکب محاسبه می‌شود.
- ۴- تنش‌های نرمال در تاندون و تیر مرکب بررسی می‌گردد.
- ۵- برش گیرها طراحی می‌شوند.
- ۶- جنبه‌های دیگر طراحی همچون برش جان، خیز و ... بررسی می‌شوند.

۴-۶-۱-۱- طراحی مقدماتی

به‌منظور طراحی مقدماتی، لنگر خارجی به دو قسمت تقسیم‌بندی می‌شود. یکی که توسط تیر مرکب به‌تنهایی تحمل می‌شود و دیگری که در اثر نیروی مخالف و مساوی ناشی از تاندون در تیر مرکب تحمل می‌شود.

$$M_{\max} = M + T_{\max}e_{tr} \quad (۳-۴)$$

M_{max} ماکزیمم لنگر ناشی از بار مرده

M لنگری که توسط تیر مرکب تحمل می‌شود

T_{max} نیروی حداکثر تاندون

e_{tr} برون محوریت بین تاندون و مرکز مقطع مرکب

لنگر کوپلی که توسط تاندون تولید می‌شود می‌تواند به صورت مناسبی به عنوان کسری از لنگر ماکزیمم بیان شود.

$$T_{max}e_{tr} = \alpha M_{max} \quad (4-4)$$

α نسبت لنگر کوپل تولیدشده توسط تاندون و لنگر ماکزیمم می‌باشد.

بسته به سایز و برون محوریت تاندون، مقدار α می‌تواند به صورت خیلی تقریبی از ۲۰ تا ۵۰ درصد برای مقاطعی که تحت لنگر مثبت (برون محوریت زیاد) هستند و بین ۱۰ تا ۳۰ درصد برای مقاطعی که تحت لنگر منفی و برون محوریت کم هستند تغییر کند.

طراحی مقدماتی شامل گام‌های زیر هستند:

۱- مقدار دلخواهی از α انتخاب می‌شود.

۲- یک مقطع مرکب به منظور اینکه بتواند سهم لنگر ناشی از تیر مرکب را تحمل کند طراحی می‌شود. این لنگر M ، با جایگذاری T_{max} در رابطه (۴-۴) و حل آن برای M حاصل می‌شود.

$$M = (1 - \alpha)M_{max} \quad (5-4)$$

۳- نیروی ماکزیمم تاندون نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$T_{max} = \frac{\alpha M_{max}}{e_{tr}} \quad (6-4)$$

۴- یک مقطع از تاندون انتخاب می‌شود.

$$A_t = \frac{T_{\max}}{F_t} \quad (7-4)$$

A_t سطح مقطع تاندون

F_t تنش کششی مجاز در تاندون

۵- نیروی پیش تنیدگی موردنیاز تخمین زده می‌شود.

$$T_i = \beta T_{\max} \quad (8-4)$$

β نسبت نیروی تاندون اولیه به ماکزیمم است. مقدار β با خواص مقاطع عرضی و برون محوریت تاندون تغییر می‌کند و همیشه کمتر از ۱ انتخاب می‌گردد.

۶- مشخص کردن اینکه پیش تنیدگی قبل از اینکه بتن ریخته شود، تنش تیر فولادی را از حد معمول بالاتر نمی‌برد.

$$\frac{T_i}{F_a} + \frac{\frac{T_i e_s}{I_s} c_{mx}}{\left(1 - \frac{T_i}{F_{ex}}\right) F_{bx}} \leq 1.0 \quad (9-4)$$

A_s سطح مقطع تیر فولادی

I_s ممان اینرسی تیر فولادی

F_a تنش فشاری محوری مجاز در نبود خمش

c_{mx} ضریب لنگر

F_{bx} تنش خمشی فشاری مجاز در نبود نیروی محوری

۴-۶-۲- تحلیل

افزایش نیرو در تاندون به وسیله رابطه اثبات شده زیر توسط هادلی (۱۹۸۳) به دست می آید؛

$$\Delta T = \frac{e/L \int_0^L M_x dx}{e^2 + \frac{EI}{E_t A_t} + \frac{I}{A}} \quad (10-4)$$

که در آن M_x لنگر ناشی از اعمال بار، e برون محوریت تاندون، E مدول الاستیسیته تیر، E_t مدول الاستیسیته تاندون، L طول تاندون، I ممان اینرسی تاندون، A سطح مقطع تیر و A_t سطح مقطع تاندون خواهد بود.

در نتیجه نیروی کل در تاندون برابر با جمع نیروی پیش تنیدگی اولیه (T_i)، افزایش نیرو در تاندون ناشی از بار مرده (ΔT_{DL}) و افزایش نیرو در تاندون ناشی از بار زنده و ضربه (ΔT_{LL+I}) خواهد بود.

$$T = T_i + \Delta T_{DL} + \Delta T_{LL+I} \quad (11-4)$$

عبارات^۱ نیرو و لنگر جهت محاسبه تنش در تیر مرکب پیش تنیده در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱- عبارات مربوط به نیرو و لنگر جهت محاسبه تنش در تیر مرکب پیش تنیده

نمونه بار	نیروی محوری (N)	لنگر (M)
P	T_i	$-T_i e_s$
DL ₁	ΔT_{DL_1}	$M_{DL_1} - \Delta T_{DL_1} e_s$
DL ₂	ΔT_{DL_2}	$M_{DL_2} - \Delta T_{DL_2} e_{tr}$
LL + I	ΔT_{LL+I}	$M_{LL+I} - \Delta T_{LL+I} e_{tr}$

¹ Impact

² Expressions

حال می‌توان با استفاده از جدول ۱-۴ تنش‌های موجود در تاندون، تیر فولادی و دال بتنی را با تنش‌های مجاز آیین‌نامه‌ای مطابقت داد.

۴-۶-۲-۱- تاندون

جمع تنش‌های ناشی از پیش‌تنیدگی (P)، بارهای مرده (DL_1, DL_2) و بارهای زنده و ضربه ($LL + I$) نباید از تنش مجاز آیین‌نامه‌ی آشتوو^۱ (فصل ۹، بند ۱۵-۱) تجاوز نماید.

$$f_t(P + DL_1) + f_t(DL_2 + LL + I) \leq F_t \quad (۱۲-۴)$$

۴-۶-۲-۲- تیر فولادی

جمع تنش‌های ناشی از پیش‌تنیدگی (P)، بارهای مرده (DL_1, DL_2) و بارهای زنده و ضربه ($LL + I$) نباید از تنش مجاز آیین‌نامه‌ی آشتوو (فصل ۱۰، بند ۳۶) تجاوز نماید.

$$f_s(P + DL_1) + f_s(DL_2 + LL + I) \leq F_s \quad (۱۳-۴)$$

۴-۶-۲-۳- دال بتنی

جمع تنش‌های ناشی از بار مرده (DL_2) و بارهای زنده و ضربه ($LL + I$) نباید از تنش مجاز آیین‌نامه‌ی آشتوو (فصل ۸، بند ۱۵-۲) تجاوز نماید.

$$f_c(DL_2 + LL + I) \leq F_c \quad (۱۴-۴)$$

۴-۷- مطالعه تحلیلی تیرهای مرکب پیش‌تنیده

در این قسمت رفتار تیرهای پیش‌تنیده شده با تاندون‌های فولادی مقاومت بالا که به صورت مرکب به یک عرشه بتنی متصل شده‌اند را مورد بررسی قرار می‌دهیم. به‌ویژه خیز و کرنش‌ها در تیر فولادی، عرشه بتنی و تاندون در ناحیه‌ی لنگر مثبت مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

^۱ ASSHTO

سه نوع تیر مرکب پیش تنیده مورد توجه قرار می گیرد:

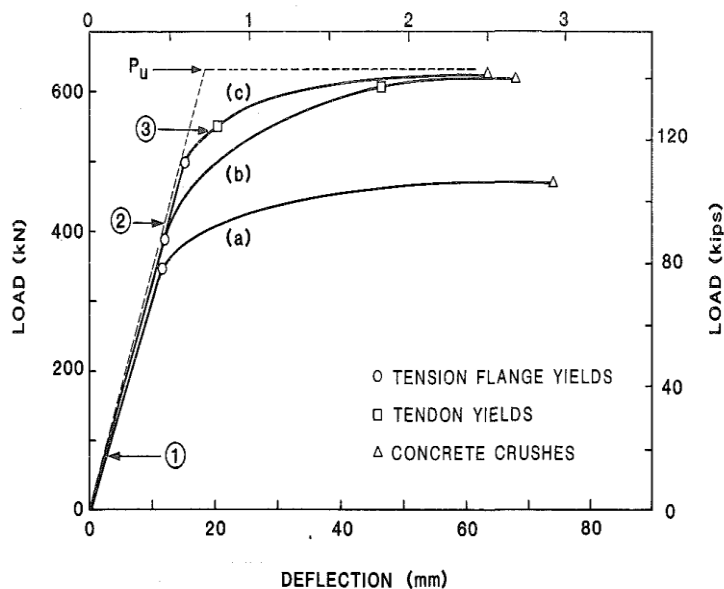
الف). تیر مرکب معمولی^۱

ب). تیر مرکب با وجود تاندون اما بدون اعمال پیش تنیدگی به تاندون

ج). تیر مرکب پیش تنیده شده با تاندون

۴-۷-۱- تیر مرکب تحت لنگر خمشی مثبت

شکل ۴-۱ منحنی‌های بار تغییر مکان را برای سه تیر مرکب تحت شرایط ذکر شده در بالا تا لحظه گسیختگی تیر نشان می‌دهد [۲]. فرض بر این است که گسیختگی زمانی اتفاق می‌افتد که بتن به کرنش نهایی ۰.۰۰۳۵ برسد. در هر مورد رفتار ابتدا خطی می‌باشد. بعد از جاری شدن بال کششی (نشان دایره) رفتار به مرور غیرخطی می‌شود تا اینکه جاری شدن تیر فولادی به داخل جان و بال بسط پیدا کند. تاندون‌ها در نقاطی که به وسیله‌ی نماد مربعی نشان داده شده‌اند جاری می‌شوند. منحنی‌ها زمانی که بتن به کرنش نهایی‌اش برسد خاتمه پیدا می‌کند (نمادهای مثلی).



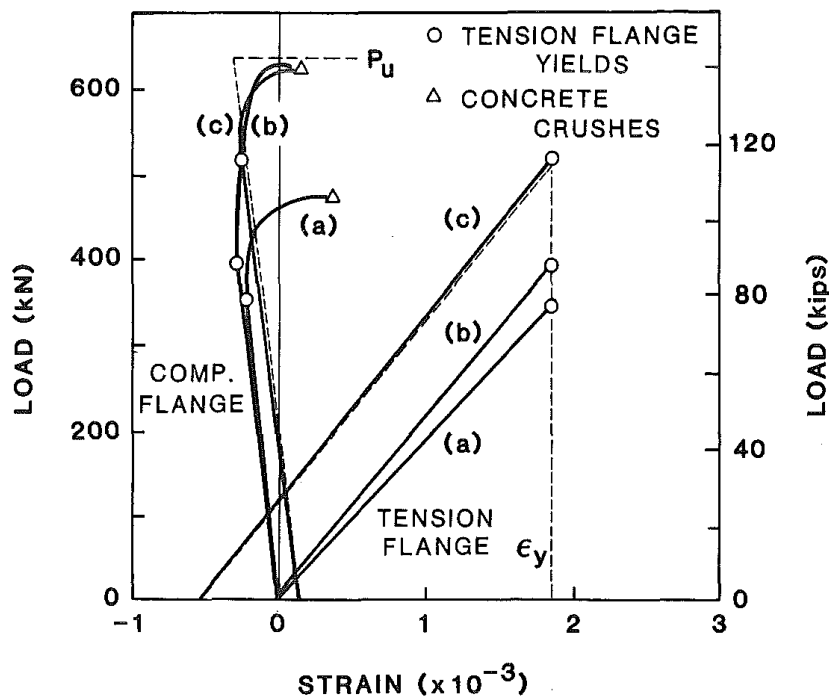
شکل ۴-۱- نمودار بار تغییر مکان [۲]

¹ Conventional

با مقایسه منحنی‌های بار- تغییر مکان برای موردهای الف و ب می‌توان به این نکته پی برد که اضافه کردن تاندون به مقطع مرکب اندکی بار جاری‌شدگی را افزایش می‌دهد و به‌طور قابل توجهی بار نهایی را افزایش می‌دهد. مقایسه‌ی نمونه‌های ب و ج نشان می‌دهد که پیش‌تنیده کردن به‌طور نسبتاً کمی بار جاری‌شدگی را افزایش می‌دهد اما تأثیری در بار نهایی ندارد.

۴-۷-۱-۱- کرنش‌ها

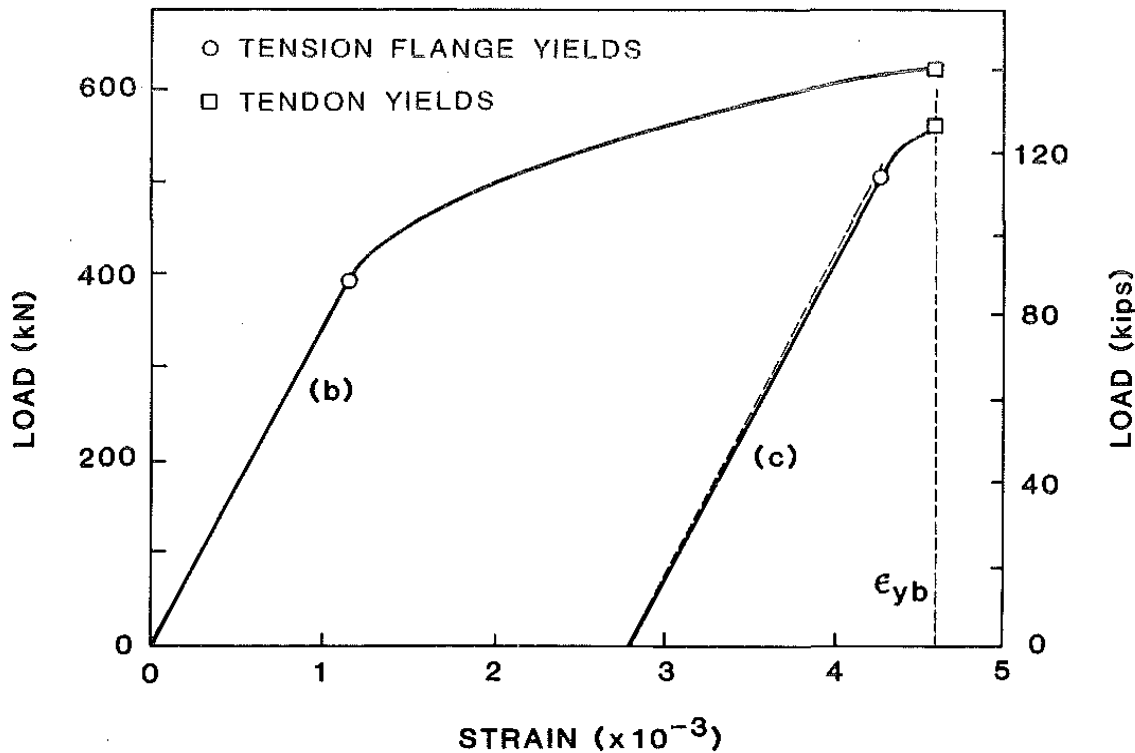
شکل ۲-۴ منحنی‌های بار- کرنش را در بال‌های فشاری و کششی تیر فولادی محدود به ناحیه الاستیک نشان می‌دهد [۲]. در تمام موارد منحنی‌های ج به‌وسیله‌ی کرنش‌های پیش‌تنیدگی ابتدایی، نسبت به مبدأ انحراف دارند. منحنی‌های بار-کرنش تا ابتدای جاری شدن بال کششی خطی هستند که توسط نمادهای دایروی مشخص‌شده‌اند و در این نقطه تار خنثی به سمت بالا میل پیدا می‌کند که در نتیجه منجر به کاهش کرنش در بال فشاری می‌شود.



شکل ۲-۴- نمودار بار کرنش بال کششی و فشاری [۲]

در نهایت، به محض اینکه بار نهایی اتفاق بیفتد تار خنثی به سمت عرشه بتنی میل پیدا می‌کند که این امر منجر می‌شود که کرنش در بال بالایی از فشار به کشش تغییر پیدا بکند. مقایسه منحنی‌های

بار- کرنش بال کششی برای نمونه‌های الف، ب و ج نتایج قبل را دوباره تأیید می‌کند که اضافه کردن تاندون به تیر مرکب فقط به‌طور مختصر بار جاری‌شدگی را افزایش می‌دهد، درحالی‌که اضافه کردن تاندون و پیش‌تنیدگی در آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی بار جاری‌شدگی را افزایش می‌دهد. شکل ۳-۴ منحنی‌های بار- کرنش در عرشه بتنی را نشان می‌دهد [۲]. همان‌طور که دیده می‌شود اضافه کردن تاندون‌ها به طرز قابل‌توجهی، باری که بتن در آن به کرنش نهایی می‌رسد را افزایش می‌دهد. پیش‌تنیده کردن تاندون‌ها ابتدا جاری‌شدگی بال کششی را به تعویق می‌اندازد و سپس منجر می‌شود که کرنش بتن برای بار داده‌شده کمتر شود.



شکل ۳-۴- نمودار بار کرنش دال بتنی [۲]

۴-۸- شناسه المان‌ها در آباکوس

طیف وسیعی از المان‌ها در آباکوس قابل‌استفاده است که از این جهت توانایی بسیار زیادی را به کاربر می‌دهد تا بتواند انواع مختلف مسائل را مدل کرده و تحلیل نماید.

در این بخش با چهار ویژگی یک المان که رفتار آن را معین می‌سازند آشنا می‌شویم.

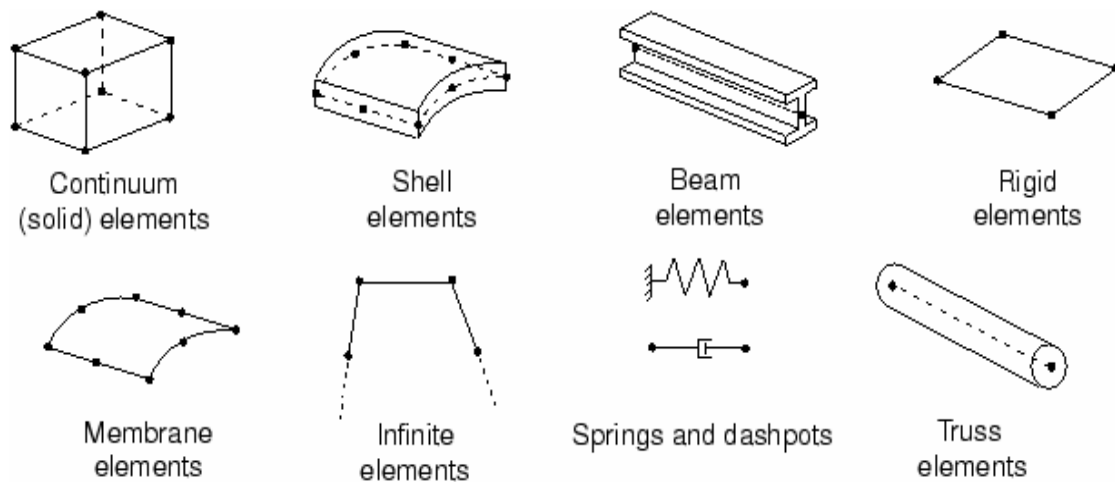
هر المان دارای چهار ویژگی زیر است:

- خانواده
- درجات آزادی
- تعداد گره‌ها
- روش فرمول‌بندی

۴-۸-۱- خانواده

در شکل زیر انواع خانواده‌های المان‌هایی که در مسائل تحلیل تنش کاربرد دارند را مشاهده

می‌کنید.



شکل ۴-۴- خانواده المان‌ها

اولین حرف یا حروفی که در نام یک المان مشاهده می‌شود بیانگر خانواده آن المان است. برای

مثال در المان S4R حرف S بیانگر این است که این المان از خانواده Shell می‌باشد و نیز در

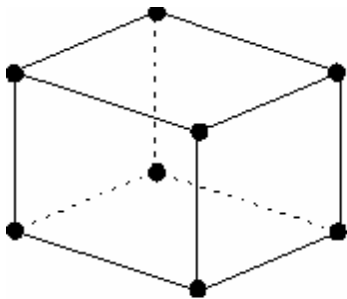
خصوص C3D8I حرف C بیانگر این است که این المان از خانواده Continuum می‌باشد.

۴-۸-۲- درجات آزادی

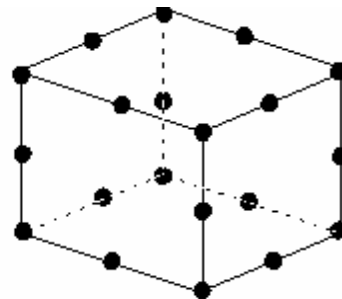
درجات آزادی درواقع متغیرهای اصلی می‌باشند که در هنگام تحلیل محاسبه می‌گردند. برای یک مدل‌سازی تنش-تغییر مکان، درجات آزادی اصلی تغییر مکان‌های گره‌ها می‌باشند.

۴-۸-۳- تعداد گره‌ها و مرتبه درون‌یابی

معمولاً مرتبه درون‌یابی از روی تعداد گره‌های یک المان تعیین می‌گردد. المان‌هایی که فقط در گوشه‌های خود دارای گره می‌باشند، مانند المان ۸ از درون‌یابی خطی در هر جهت استفاده می‌کنند و از این‌رو المان‌های خطی و یا مرتبه اول نامیده می‌شوند. المان‌هایی که دارای گره در وسط هر لبه خود می‌باشند، مانند المان نشان داده‌شده در شکل ۴-۵ از میان‌یابی سهموی ۱ (مرتبه دوم) استفاده می‌کنند و از این‌رو C3D20 المان‌های سهموی و یا مرتبه دوم نام‌گرفته‌اند.



(a) Linear element
(8-node brick, C3D8)



(b) Quadratic element
(20-node brick, C3D20)

شکل ۴-۵- المان‌های خطی و غیر خطی

۴-۸-۴- فرمول‌بندی

فرمول‌بندی یک المان به تئوری ریاضی تعیین رفتار المان بازمی‌گردد. همه المان‌های مورد استفاده در تحلیل‌های تنش-تغییر مکان از فرمول‌بندی لاگرانژی^۱ یا جرم کنترل استفاده می‌کنند. در این نوع فرمول‌بندی ماده داخل المان تا انتهای تحلیل داخل المان باقی می‌ماند و نمی‌تواند از مرز المان

¹ Lagrangian

خارج شود. در حالت مقابل فرمول بندی اویلری^۱ یا دیدگاه حجم کنترل وجود دارد که در آن المان در فضا ثابت است و ماده از داخل آن جریان پیدا می کند.

^۱ Eulerian

فصل پنجم:

بررسی صحت مدل سازی

۵-۱- مقدمه

در این فصل ضمن شناخت محیط مدل سازی آباکوس، به بیان فرضیات در نظر گرفته شده و نحوه مدل سازی یک عضو پرداخته خواهد شد. در ادامه پس از بررسی مدل سازی یک تیر مرکب پیش تنیده، به مقایسه آن مدل عددی با مدل آزمایشگاهی پرداخته می شود.

۵-۲- محیط گرافیکی Abaqus/cae

Abaqus/cae محیط گرافیکی و در واقع قسمتی از آباکوس است که کاربر با آن سروکار دارد. در این قسمت عملیات مدل سازی هندسی، تعریف و نسبت دادن خواص ماده به قطعه مورد نظر، مونتاژ قطعات در صورت لزوم، انتخاب نوع تحلیل، تعیین بارگذاری و شرایط مرزی و در نهایت المان بندی مدل انجام می گیرد. به محض آماده شدن مدل در Abaqus/cae می توان فرآیند حل مسئله را اجرا نمود و سپس دریکی از زیر محیط های CAE به مشاهده و ارزیابی نتایج پرداخت.

۵-۲-۱- انواع محیط در Abaqus/cae

Abaqus/cae به محیط های ده گانه ای تقسیم شده است. این محیط ها عبارت اند از:

Part: در این محیط کار مدل سازی هندسی قطعات انجام می گیرد.

Property: در این محیط کار تعریف خصوصیات مواد مورد تحلیل، تعریف پروفیل سطح مقطع تیر، نسبت دادن خواص تعریف شده به قطعات و ... انجام می گیرد.

Assembly: در این محیط کار مونتاژ قطعات مختلف در صورت وجود در یک تحلیل انجام می گیرد. در واقع موقعیت هندسی قطعات را کاربر تعیین می کند.

Step: در این محیط گام های حل مسئله انتخاب می شوند. در اینجا است که کاربر نوع حل گر را نیز مشخص می کند.

Interaction: در این محیط خاصیت فیزیکی تماس بین سطوح تعیین می شود.

محیط **Load**: در این محیط بارگذاری و شرایط مرزی تعیین می‌گردد.

محیط **Mesh**: در این محیط کار المان بندی مدل انجام می‌شود.

محیط **Job**: در این محیط با تعریف یک job، کاربر شروع حل مسئله را به پردازشگر اعلام می‌کند.

محیط **Visualization**: در این محیط کاربر نتایج حل را مشاهده می‌کند.

محیط **Sketch**: در این محیط کاربر می‌تواند ترسیمات مختلف دوبعدی را ایجاد کند تا در مدل‌سازی از آنها استفاده کند.

در ادامه به بررسی نحوه مدل‌سازی تیر مرکب پیش‌تنیده که توسط سعادت منش در سال (۱۹۸۹) مورد آزمایش تجربی قرار گرفت می‌پردازیم.

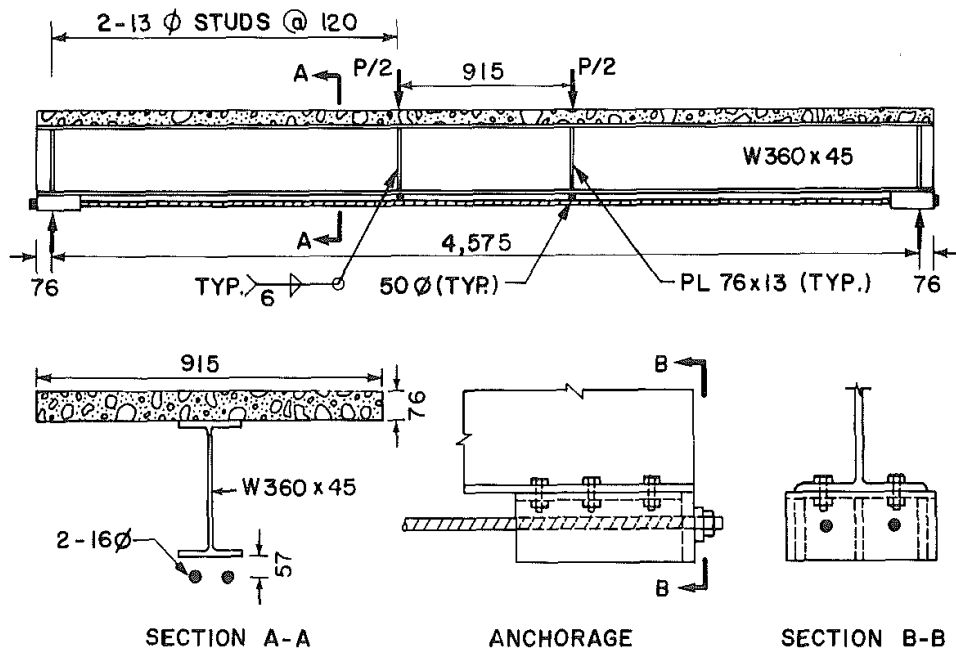
۵-۳- ابعاد و جزئیات تیر مرکب پیش‌تنیده شده

همان‌طور که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است تیر دارای طول ۴/۵۷ متر است. ۹۱۵ میلی‌متر عرض و ۷۶ میلی‌متر ضخامت دال بتنی است که به صورت مرکب، متصل به یک تیر نورد شده^۱ W ۳۶۰*۴۵ مطابق با آیین‌نامه ASTM A588 فولاد می‌باشد. دو جفت برش گیر با قطر ۱۳ میلی‌متر با طول ۵۱ میلی‌متر به بال فوقانی جوش داده شده بود، فاصله مرکز به مرکز آنها ۱۲۰ میلی‌متر بین نقطه اثر بار و تکیه‌گاه‌ها قرار می‌گیرد. آرماتورهای انقباضی^۲ و حرارتی^۳ شامل میلگردهای شکل‌پذیر با قطر ۱۰ میلی‌متر است که آرماتورهای انقباضی به صورت طولی به فاصله مرکز به مرکز ۲۲۹ میلی‌متر در سه ردیف و ۱۱ عدد آرماتور حرارتی به صورت عرضی به فاصله مرکز به مرکز ۴۵۵ میلی‌متر در روی دال قرار می‌گیرند. چهار جفت سخت‌کننده به مشخصات ۳۳۰*۱۳*۷۶ میلی‌متر به تیر فولادی در تکیه‌گاه‌ها و نقطه اثر بارها جوش داده می‌شود.

¹ Rolled

² Shrinkage

³ Thermal



شکل ۵-۱- تیر مرکب پیش تنیده

۵-۳-۱- مشخصات مکانیکی مصالح

۵-۳-۱-۱- بتن

مخلوط بتن برای دال برای مقاومت فشاری $27/6$ مگا پاسکال طراحی شده بود. مقاومت فشاری اندازه گیری شده ۳ نمونه استوانه‌ای به عمل آمده از یک نمونه بتن و قرار داده شده به مدت ۹۰ روز، $32/4$ مگا پاسکال بود. مقاومت کششی اندازه گیری شده از ۳ نمونه شکافت نمونه استوانه‌ای^۱ ۳ مگا پاسکال بود.

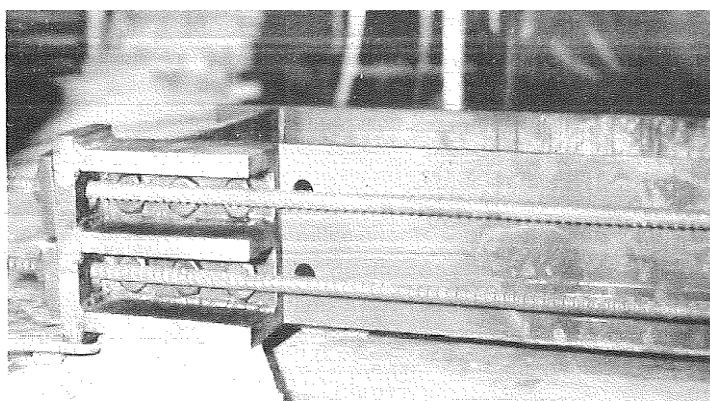
۵-۳-۱-۲- تیر فولادی

فولادی که برای مقطع $W 14 * 30$ تیر استفاده شده مطابق به ملزومات کششی و شیمیایی استاندارد ASTM A588 با مشخصات مقاومت بالا، فولاد کم آلیاژ با نقطه تسلیم ۳۴۵ مگا پاسکال است. خواص کششی متوسط توسط ۳ نمونه آزمایش، جدا شده از جان تیر ۳۶۷ مگا پاسکال تنش تسلیم، ۵۲۰ مگا پاسکال مقاومت کششی و ۲۴ درصد افزایش طول بود.

¹ Split-Cylinder

۵-۳-۱-۳- تاندون‌ها و نحوه اعمال پیش‌تنیدگی

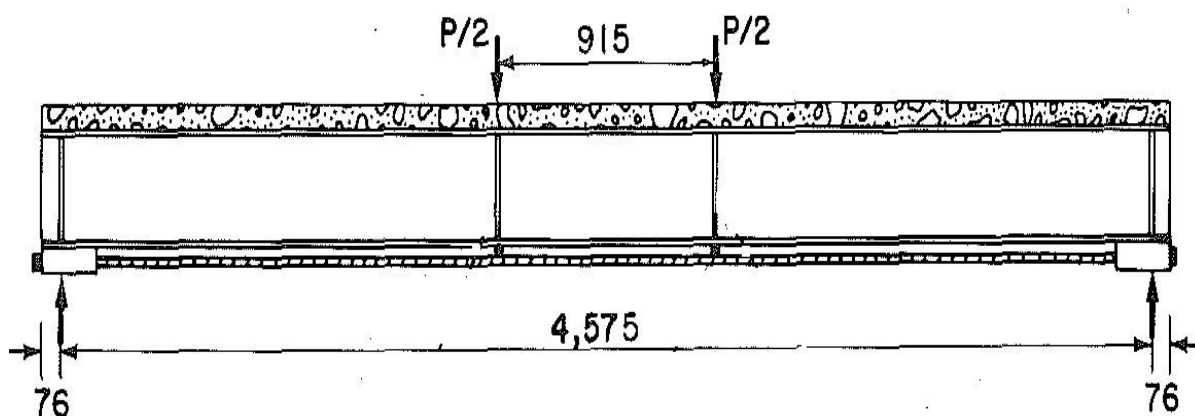
خواص کششی میلگردها اندازه‌گیری شده با ۳ نمونه، ۹۱۰ مگا پاسکال تنش تسلیم، ۱۰۹۰ مگا پاسکال مقاومت کششی و ۹/۷ درصد ازدیاد طول می‌باشد. تیر فولادی با دو میلگرد رزوه شده با گرید DYWIDAG150 در تمام طول تیر به فاصله ۵۷ میلی‌متر پایین بال کشی پیش‌تنیده می‌شود. میلگردهای پیش‌تنیده شده در نقاط انتهایی با یک باکس باز، جوش داده شده که شامل بال، ۳ جان و یک صفحه انتهایی که همان‌طور که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است مهار شده‌اند. باکس به بال تحتانی تیر پیچ می‌شود. هر میلگرد به اندازه ۵۰ درصد مقاومت کششی‌اش یا به عبارت دیگر ۹۸ کیلو نیوتن تنیده می‌شود. تیر فولادی قبل از اینکه دال بتنی ریخته شود پیش‌تنیده می‌شود تا از ترک خوردن بتن تحت کشش جلوگیری شود.



شکل ۵-۲- باکس باز

۵-۳-۱-۴- موقعیت تکیه‌گاهی و محل اعمال بارگذاری

همان‌طور که در شکل ۵-۳ نشان داده شده است بارها به فاصله ۹۱۵ میلی‌متر از هم اعمال می‌شوند. موقعیت‌های تکیه‌گاهی و محل اعمال بارگذاری نیز در شکل مشخص شده است.



شکل ۵-۳- وضعیت بارگذاری

۵-۴- مدل سازی رفتار مصالح

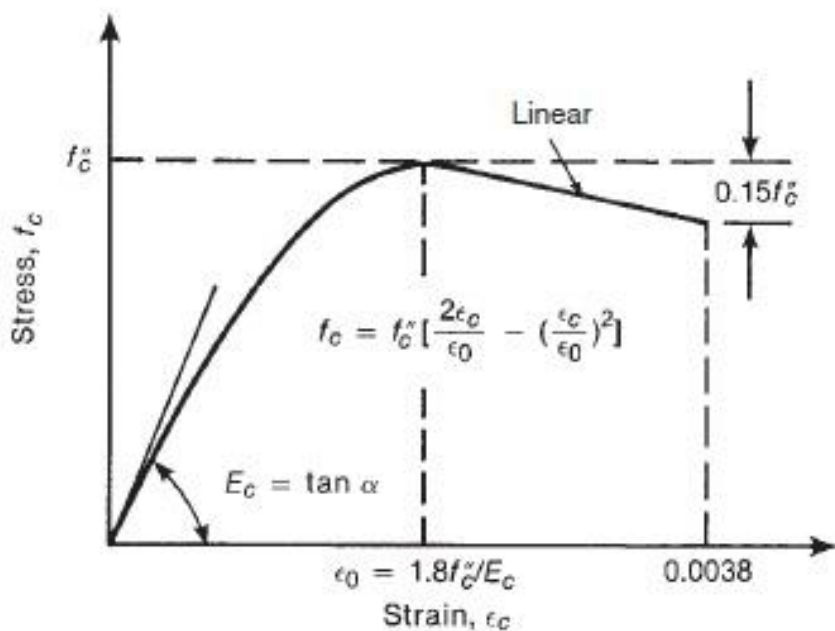
۵-۴-۱- بتن

در ادامه به نحوه تعریف منحنی تنش- کرنش بتن در این تحقیق می پردازیم.

• رفتار بتن در فشار

در این پایان نامه برای رفتار تک محوری فشاری بتن از روابط مربوط به نمودار هاگنستاد اصلاح شده^۱ [۲۱] مطابق شکل بهره گرفته شده است.

^۱ Modified Hognestad

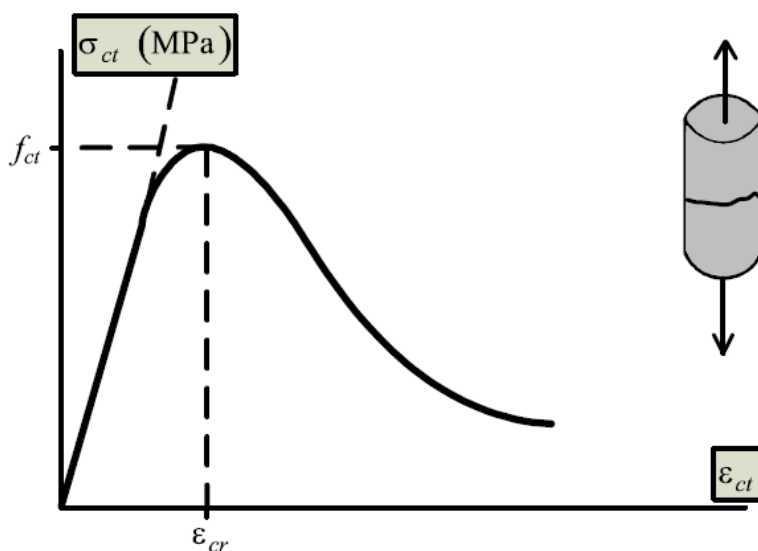


شکل ۴-۵- منحنی هاگنستاد اصلاح شده [۲۱]

• رفتار بتن در کشش

برای تعریف رفتار کششی بتن نیز از روابط ارائه شده توسط وکیوو^۱ [۲۲] مطابق با شکل ۵-۵

استفاده شده است.



شکل ۵-۵- منحنی بتن غیر مسلح در کشش تک محوری [۲۲]

¹ Vecchio

۵-۴-۱-۱- مدل سازی رفتار بتن

۵-۴-۱-۲- رفتار خطی بتن

به منظور مدل سازی رفتار خطی مطابق با جدول ۵-۱، بتن ماده‌ای همسانگرد با ضریب پواسون ۰.۲ و وزن مخصوص ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۵-۱- پارامترهای الاستیک بتن

وزن مخصوص (Kg/m^3)	مدول الاستیسیته $E_c(GPa)$	ضریب پواسون ν
۲۴۰۰	۲۸.۸	۰.۲

۵-۴-۱-۳- رفتار غیر خطی بتن

به منظور مدل سازی رفتار غیرخطی بتن، در قسمت رفتارهای غیر کشسان از مدل آسیب دیدگی پلاستیک که شامل پارامترهای پلاستیسیته^۱، رفتار فشاری و رفتار کششی می‌باشد، استفاده گردیده است. مقادیر مربوط به پارامترهای آسیب دیدگی پلاستیک بتن در جدول‌های زیر نشان داده شده است.

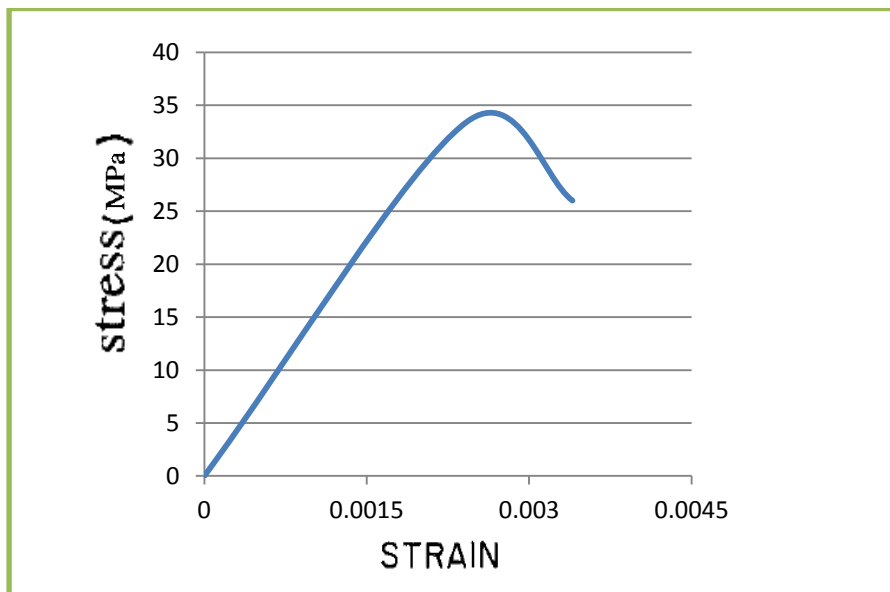
جدول ۵-۲- پارامترهای آسیب دیدگی پلاستیک بتن

زاویه اتساع Φ	خروج از محوریت	F_{b0}/F_{c0}	K	ویسکوزیته
۳۰.۵	۰.۱	۱.۱۶	۰.۶۶۶	۰.۰۱

¹ Plasticity

جدول ۳-۵- پارامترهای رفتار فشاری بتن

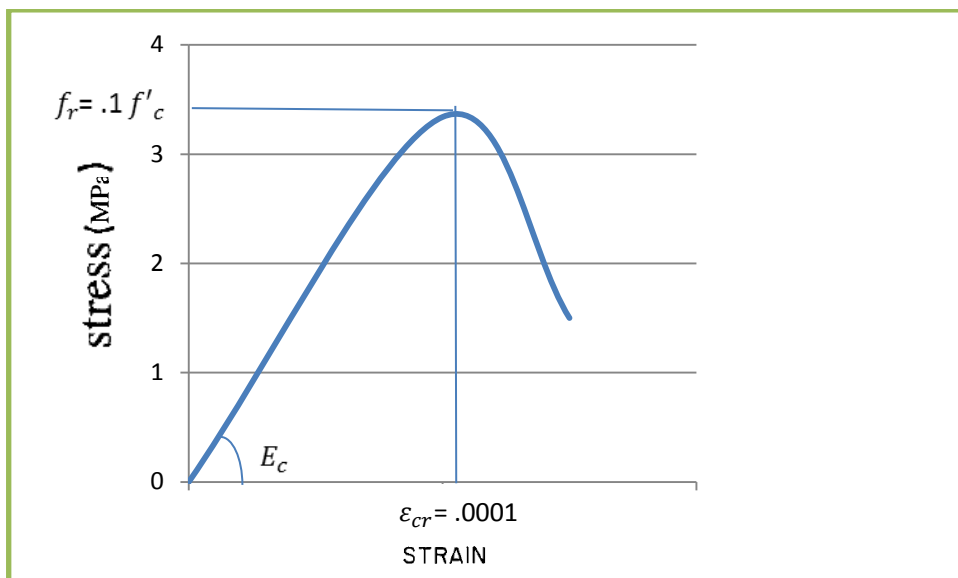
تنش (مگا پاسکال)	کرنش غیر الاستیک
۳۳,۴	۰
۲۷,۶	.۰۰۲



شکل ۶-۵- منحنی تنش-کرنش فشاری بتن

جدول ۴-۵- پارامترهای رفتار کششی بتن

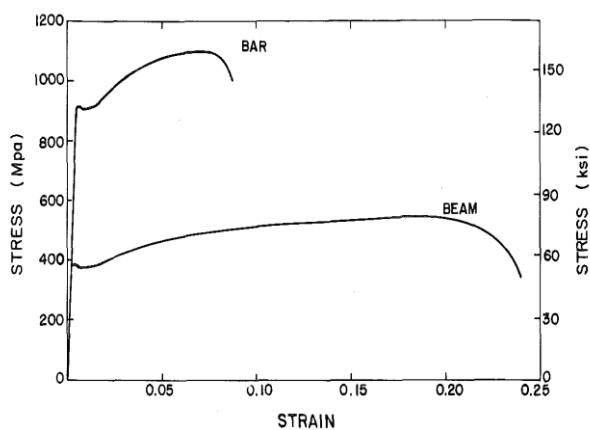
تنش (مگا پاسکال)	کرنش ترک
۳.۳	.۰۰۰۱



شکل ۵-۷- منحنی تنش-کرنش کششی بتن

۵-۴-۲- فولاد

به منظور شبیه‌سازی رفتار تیر فولادی و تاندون از مدل الاستیک - پلاستیک استفاده شده است. بدین صورت که فولاد تا رسیدن به تنش تسلیم الاستیک باقی می‌ماند و سپس تحت بار ثابت جاری می‌شود. مدل الاستیک - پلاستیک فولاد و تاندون به ترتیب در شکل‌های ۵-۹ و ۵-۱۰ نشان داده شده است. همچنین برای آرماتورهای انقباضی و حرارتی مطابق جدول ۵-۵ فقط مدل الاستیک تعریف شده است.



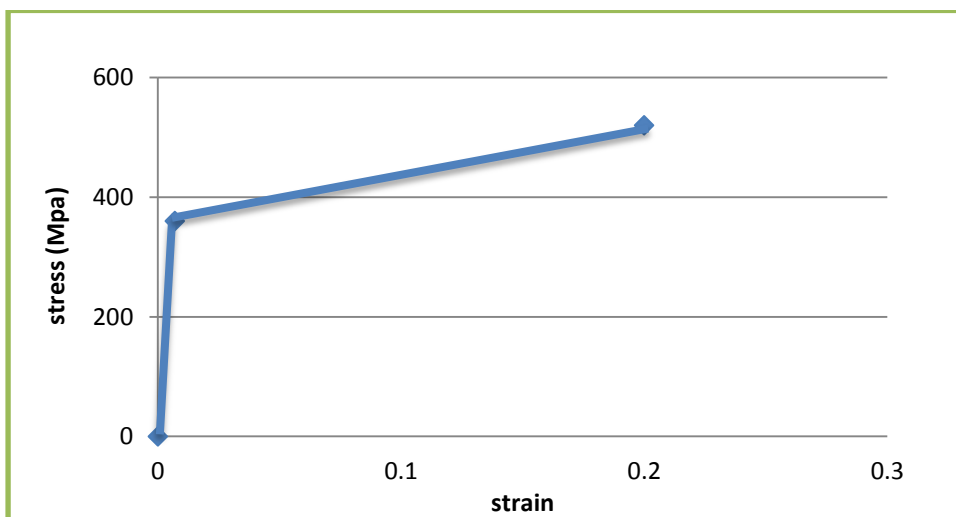
شکل ۵-۸- نمودار آزمایشگاهی تنش-کرنش تیر فولادی و تاندون

جدول ۵-۵- پارامترهای الاستیک فولاد

ضریب پواسون ν	مدول الاستیسیته $E_c (Gpa)$	وزن مخصوص (Kg/m^3)
۰.۳	۱۸۸	۷۸۵۰
۰.۳	۲۰۰	-
۰.۳	۱۸۸	-

جدول ۵-۶- رفتار پلاستیک تیر فولادی

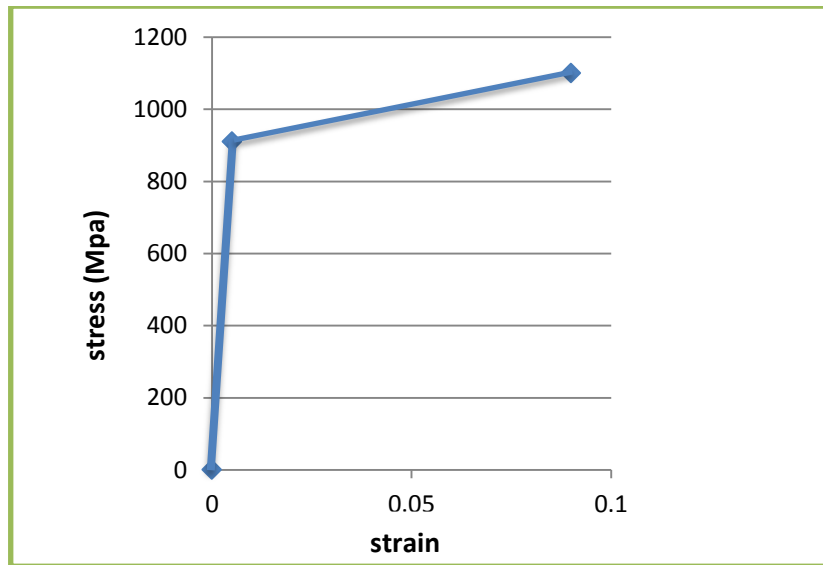
کرنش نهایی	تنش جاری شدگی (مگا پاسکال)
۰	۳۶۰
۰.۲	۵۲۰



شکل ۵-۹- نمودار تنش-کرنش تیر فولاد

جدول ۵-۷- رفتار پلاستیک تاندون‌ها

کرنش نهایی	تنش تسلیم (مگا پاسکال)
۰	۹۱۰
۰.۹	۱۰۹۰



شکل ۵-۱۰- نمودار تنش-کرنش تاندون

۵-۴-۲-۱- صفحات بارگذاری، باکس باز و سخت‌کننده‌ها

مدل رفتاری برای صفحات بارگذاری فوقانی و انتهایی^۱ باکس باز عیناً مانند تیر فولادی در نظر گرفته شده است.

۵-۴-۳- المان‌های مورد استفاده

۵-۴-۳-۱- بتن

در این تحقیق برای مدل کردن دال بتنی از المان C3D8R که از خانواده Solid می‌باشد، استفاده گردیده است. از مشخصات این المان می‌توان به ۸ گره ای بودن آن، دارای درون‌یابی خطی مرتبه اول و بهره‌گیری از نقاط انتگرال‌گیری کاهش‌یافته اشاره نمود.

¹ Bottom

۵-۴-۳-۲- فولاد

۵-۴-۳- تیر فولادی

در تیرهای فولادی همچون دال بتنی از المان C3D8R که از خانواده Solid می‌باشد استفاده شده است. این المان ۸ گره ای، دارای درون‌یابی خطی مرتبه اول و نقاط انتگرال‌گیری کاهش یافته می‌باشد.

۵-۴-۳- آرماتورهای انقباضی و حرارتی

به منظور مدل‌سازی میلگردهای فولادی از المان تیر دو گره ای B31 استفاده شده است. تابع درون‌یاب این المان از نوع خطی می‌باشد.

۵-۴-۳- تاندون‌ها

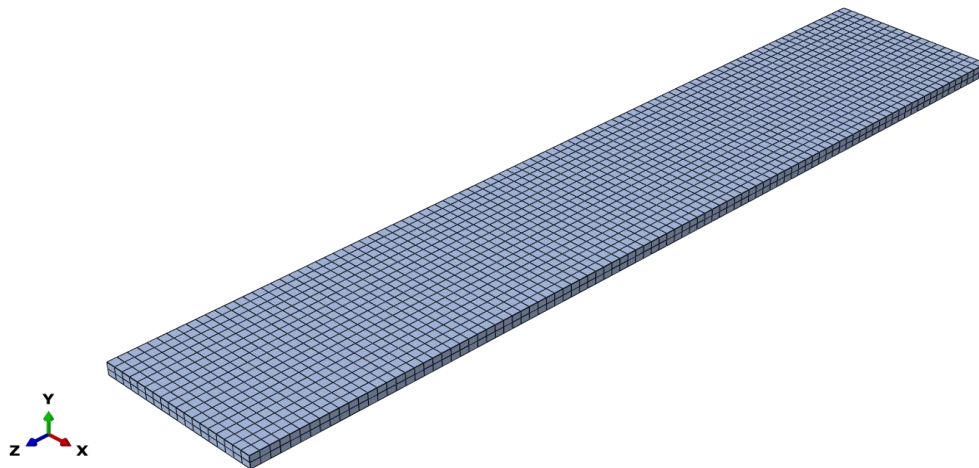
تاندون‌ها از خانواده Solid و دارای المان‌های C3D8R می‌باشند. یک المان آجری ۸ گره ای با درون‌یابی خطی مرتبه اول و نقاط انتگرال‌گیری کاهش یافته است.

۵-۴-۳- صفحات انتهایی، باکس باز و صفحات بارگذاری و سخت‌کننده‌ها

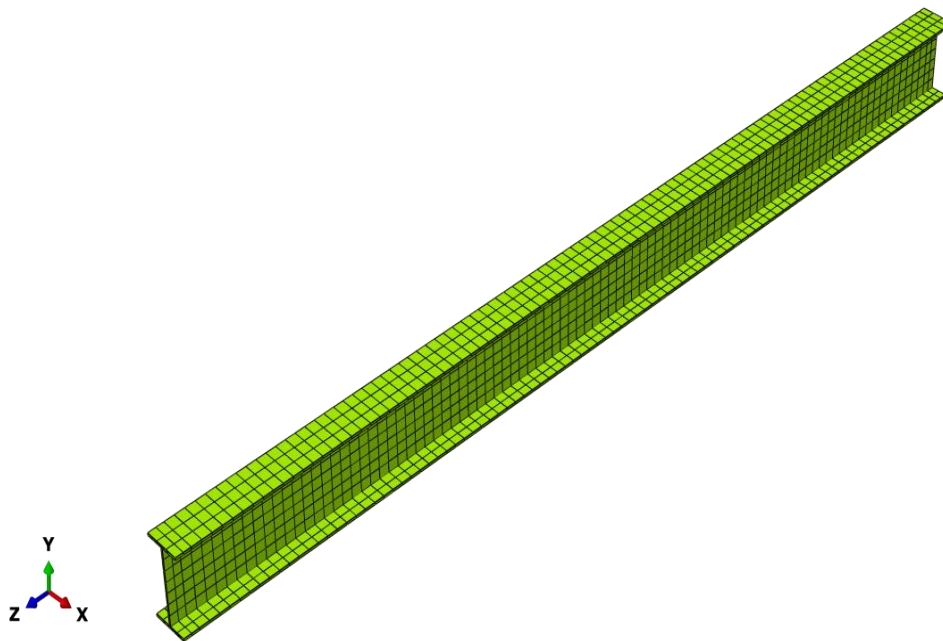
صفحات انتهایی و بارگذاری و همچنین باکس باز از خانواده Solid و دارای المان‌های C3D8R می‌باشند.

۵-۴-۴- شبکه بندی

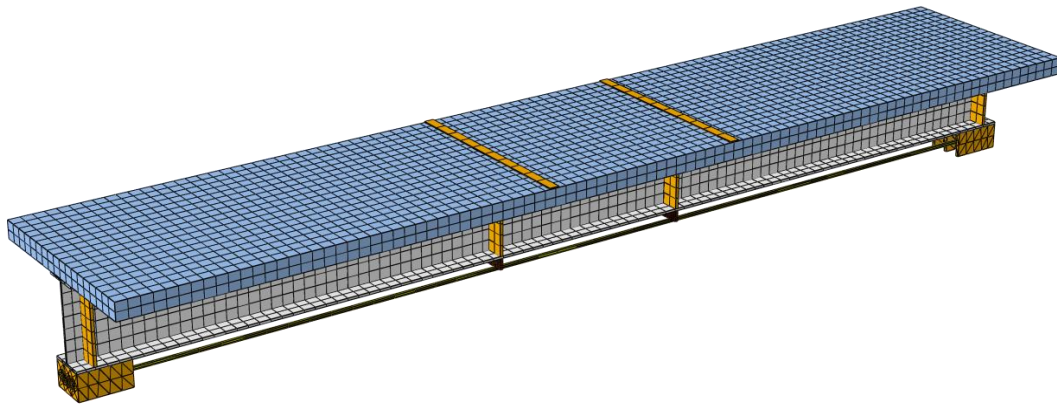
پس از بررسی و امتحان شبکه‌بندی‌های مختلف، شبکه‌های منتخب زیر با دقت قابل قبولی برای اجزای مختلف مدل انتخاب شدند.



شکل ۵-۱۱- شبکه بندی دال بتنی



شکل ۵-۱۲- شبکه بندی تیر فولادی



شکل ۵-۱۳- شبکه‌بندی تیر مرکب پیش‌تنیده

۵-۴-۵- اندرکنش بین مصالح مدل

در این تحقیق از سه نوع اندرکنش قید ناحیه مدفون^۱، تماس مقید^۲ و تماس صفحه به صفحه^۳ بهره گرفته شده است.

۵-۴-۵-۱- قید ناحیه مدفون

در قید ناحیه مدفون المان یا گروهی از المان‌ها در المان میزبان جاسازی می‌شود. اگر گره المان مدفون در داخل میزبان قرار داشته باشد، درجه‌ی آزادی انتقالی در آن گره حذف و گره تبدیل به گره مدفون می‌شود. درجات انتقالی گره مدفون مقید به مقدار حاصل از درون‌یابی درجات آزادی مربوطه در المان میزبان می‌شود. المان‌های مدفون اجازه داشتن درجات آزادی چرخشی را دارند. المان میزبان نیز فقط می‌تواند درجات آزادی انتقالی داشته باشد. تعداد درجات آزادی انتقالی در یک گره از المان مدفون باید برابر تعداد آن‌ها در یک گره از المان میزبان باشد. در این مدل‌سازی از لغزش بین بتن و آرماتور صرف‌نظر می‌گردد و تمام میلگردهای انقباضی و حرارتی با استفاده از قید ناحیه مدفون در المان میزبان که دال بتنی می‌باشد جای می‌گیرند.

¹ Embedded Region

² Tie Contact

³ Surface to Surface Contact

۵-۴-۲- تماس مقید

در اندرکنش تماس مقید امکان ترکیب کردن دو سطح که دارای شبکه‌بندی متفاوت می‌باشند وجود دارد. همچنین در تماس مقید این امکان وجود دارد که هریک از نقاط روی سطح شبکه‌بندی درشت‌تری داشته باشند. با فرض عدم لغزش دال بتنی بروی تیر فولادی برای تعریف اندرکنش بین آن‌ها از تماس مقید استفاده شده است. همچنین برای اتصال سخت‌کننده به تیر اصلی، اتصال صفحه‌های انتهایی به تیر اصلی، اتصال تاندون به باکس باز در سمت تکیه‌گاه مفصلی از تماس مقید بهره گرفته شده است.

۵-۴-۳- اندرکنش تماس

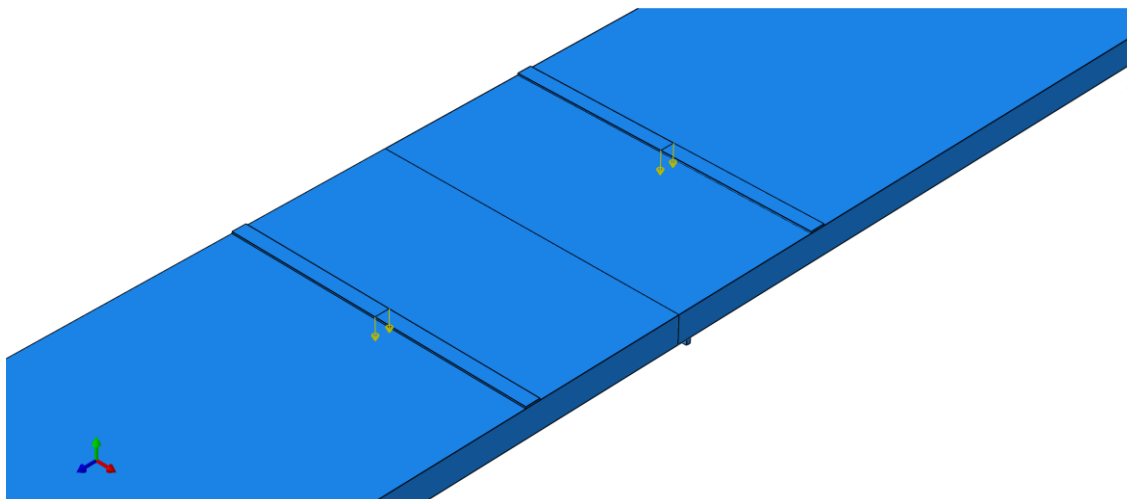
خاصیت اندرکنش تماس می‌تواند رفتار تماسی^۱ (اصطکاک و لغزش الاستیک) و رفتار نرمال^۲ (سخت، نرم، تماس با استهلاک و جداشدنی) را تعیین نماید. خاصیت اندرکنش تماس می‌تواند به صورت تماس عمومی، تماس سطح به سطح یا خود تماسی باشد. در تماس سطح به سطح تماس بین دو سطح تغییر شکل‌پذیر و یا بین یک سطح تغییر شکل‌پذیر و یک سطح صلب را تعریف کرد. در این تحقیق برای اتصال تاندون به صفحات پایینی تیر اصلی و همچنین اتصال تاندون به باکس باز در سمت تکیه‌گاه مفصلی از تماس سطح به سطح استفاده شده است.

۵-۴-۶- بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی

به منظور جلوگیری از تمرکز تنش در محل اثر بارها از صفحه‌های فولادی به ابعاد ۴,۷۵ * ۹۱۵ * ۴۳ میلی‌متر استفاده شده است. شکل ۵-۱۴ نحوه بارگذاری را نشان می‌دهد.

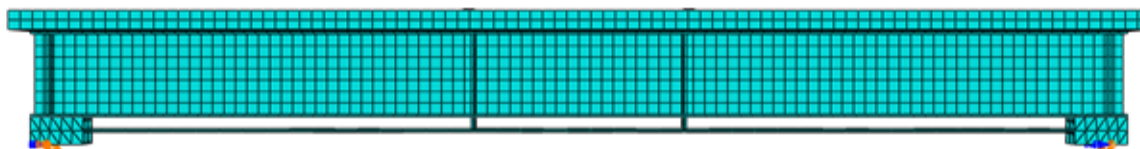
¹ Tangential Behavior

² Normal Behavior



شکل ۵-۱۴- نحوه بارگذاری با استفاده از صفحات بارگذاری

همچنین برای مدل‌سازی صحیح شرایط تکیه‌گاه با ایجاد حدفاصل در دو طرف تیر اصلی همانند شکل تکیه‌گاه غلتکی را در سمت چپ و تکیه‌گاه مفصلی را در سمت راست شبیه‌سازی می‌کنیم.

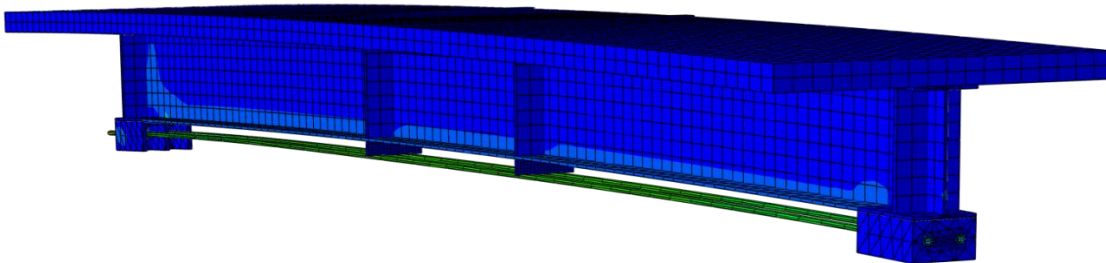


شکل ۵-۱۵- شرایط تکیه‌گاهی

۵-۴-۷- مدل‌سازی پیش‌تنیدگی در تاندون‌ها

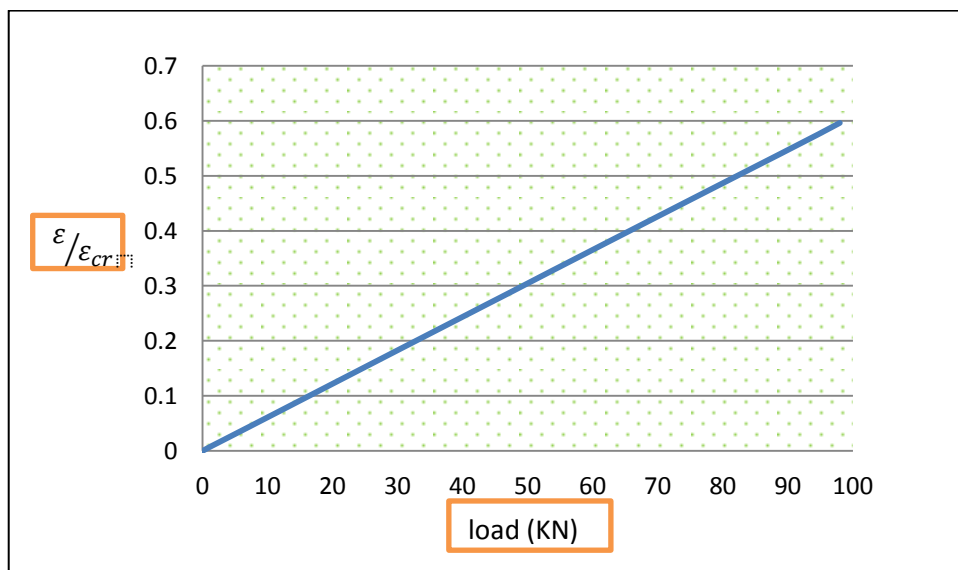
برای مدل‌سازی پیش‌تنیدگی در تاندون‌ها، درست در گام اول تنش کششی ۴۷۸ مگا پاسکال (معادل ۹۸ کیلو نیوتن) را در راستای طولی تاندون‌ها از سمت تکیه‌گاه مفصلی به آن‌ها اعمال می‌کنیم. با توجه به شکل خیز منفی^۱ یا محدب کاملاً مشهود می‌باشد. در گام دوم تنش پیش‌تنیدگی خارجی قطع می‌گردد و با استفاده از اندرکنش سطح به سطح، تاندون‌ها به تیر اصلی اتصال کامل پیدا می‌کنند. در همین حال بارگذاری خارجی شروع به اعمال شدن می‌گردد.

^۱ Camber



شکل ۵-۱۶- ایجاد خیز منفی توسط تاندون‌ها

در شکل زیر نمودار کرنش به کرنش ترک‌خوردگی بتن در مقابل بار، در گام اول در قسمت فوقانی دال بتنی نشان داده شده است. همان‌طور که می‌دانیم اعمال نیروی پیش‌تنیدگی باعث ایجاد کشش در دال بتنی می‌شود. با توجه به شکل حداکثر کرنشی کششی که در دال بتنی اتفاق می‌افتد نزدیک به ۰.۶ کرنش ترک‌خوردگی بتن می‌باشد. در نتیجه می‌توان از عدم ترک‌خوردگی در بتن به علت پیش‌تنیدگی در گام اول اطمینان حاصل کرد.



شکل ۵-۱۷- نمودار کرنش نرمالیزه-نیرو مربوط به بالای دال بتنی در مرحله پیش‌تنیدگی

۵-۵- مقایسه نتایج عددی با مدل آزمایشگاهی

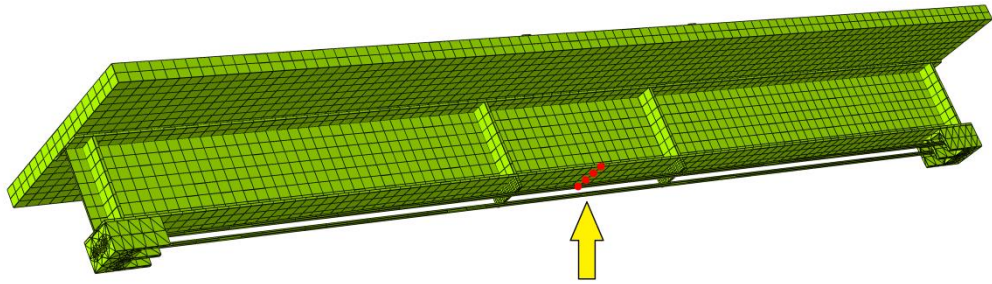
در این بخش نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدودی با نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرند. قبل از بررسی نمودارها نکات زیر حائز اهمیت می‌باشند:

- ۱- در مدل آزمایشگاهی قبل از اینکه تیر مرکب تحت پیش تنیدگی قرار بگیرد، درست بالای بال فشاری و پایین بال کششی و بروی تاندون‌ها کرنش‌سنج‌ها نصب می‌شوند.
- ۲- بعد از گیرش بتن نیز کرنش‌سنج‌ها^۱ بر روی سطح دال قرار می‌گیرند.
- ۳- در مدل عددی با میانگین گرفتن از کرنش و تغییر مکان گره‌های از پیش مشخص شده منحنی‌ها ترسیم گردیده‌اند.

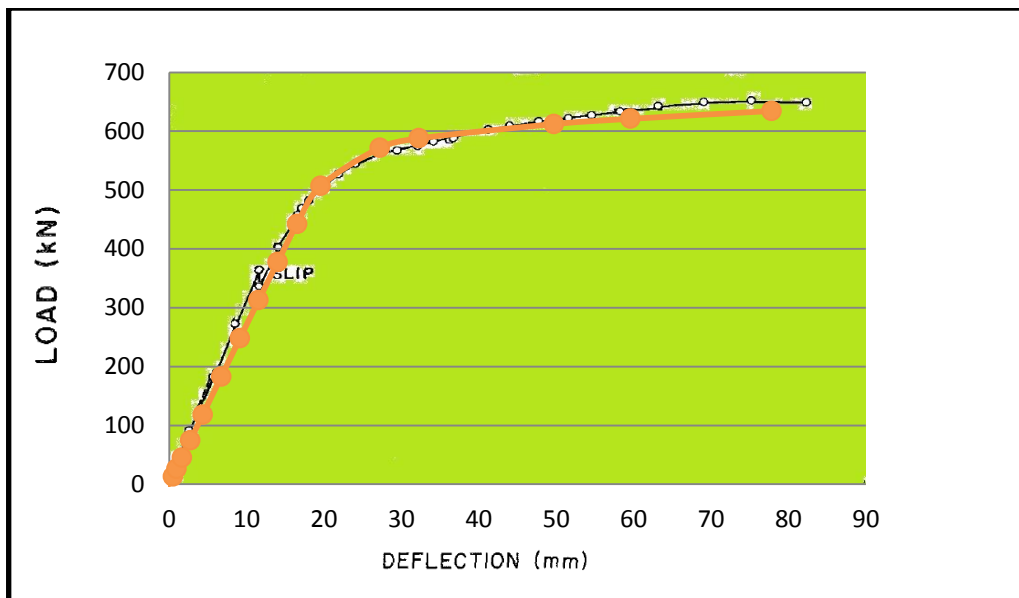
۵-۵-۱- منحنی بار به تغییر مکان

در شکل ۵-۱۹ منحنی بار- تغییر مکان در وسط دهانه نشان داده شده است. رفتار ابتدا الاستیک خطی می‌باشد. در مدل آزمایشگاهی در بار ۳۵۶ کیلو نیوتن چسبندگی بین بال فوقانی و دال بتنی از بین می‌رود و باعث می‌شود که دال بتنی بر روی بال فوقانی بلغزد. لغزش دال بتنی بر روی بال فوقانی تیر فولادی، بار را از ۳۵۶ کیلو نیوتن به ۳۲۹ کیلو نیوتن تنزل می‌دهد. چون در مدل عددی از لغزش بین دال بتنی و بال فوقانی صرف‌نظر شده است، در ناحیه الاستیک خطی شاهد تنزل نیرو نمی‌باشیم و یا به عبارت دیگر تیر مرکب از خود رفتاری یکپارچه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل پیداست در ناحیه الاستیک خطی رفتار مدل آزمایشگاهی با رفتار مدل عددی مطابقت مطلوبی دارند. بال کششی در بار حدوداً ۴۴۵ کیلو نیوتن جاری می‌شود که در نتیجه‌ی آن شاهد رفتار غیرخطی هستیم. با کاهش تدریجی سختی تیر و تسری جاری‌شدگی از بال کششی به داخل جان، این رفتار غیرخطی تشدید می‌گردد. همچنین جاری شدن تاندون‌ها باعث می‌شود که منحنی بار- تغییر مکان رفتار غیرخطی بیشتری را از خود بروز دهد.

¹ Strain Gages



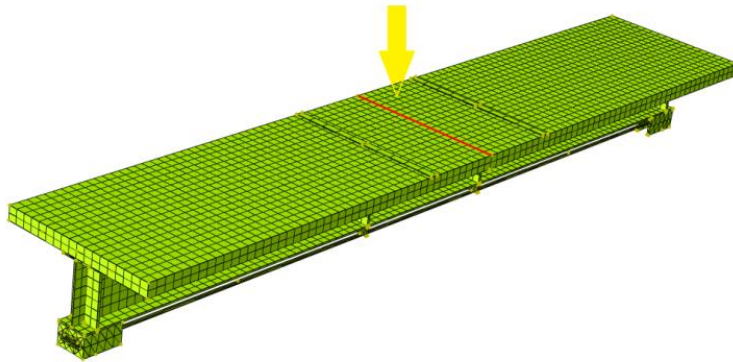
شکل ۵-۱۸- ناحیه مدنظر برای محاسبه خیز



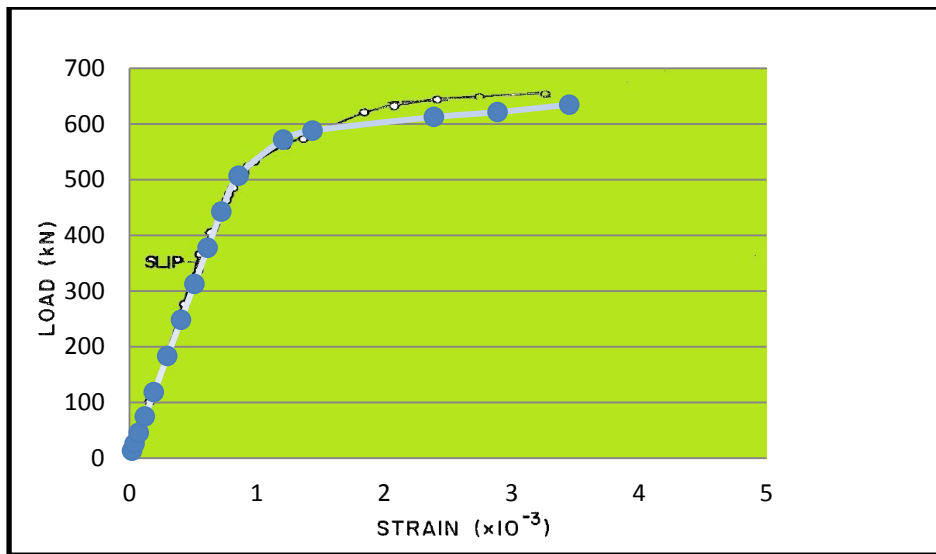
شکل ۵-۱۹- منحنی بار-تغییر مکان تیر در وسط دهانه و مدل عددی

۵-۲-۵- منحنی بار به کرنش بتن

در شکل ۵-۲۱ منحنی بار-کرنش برای دال بتنی به نمایش گذاشته شده است. منحنی ابتدا به صورت خطی می باشد. بار در هنگام لغزش بین دال بتنی و برش گیرها دچار یک افت می گردد اما بعد از این افت با افزایش بار، رفتار خطی باقی می ماند تا اینکه بال کششی جاری شود. با جاری شدن تیر فولادی و تاندون ها منحنی بار-کرنش بتن، غیرخطی می گردد تا اینکه در نهایت در کرنش 0.034 بتن خرد می گردد.



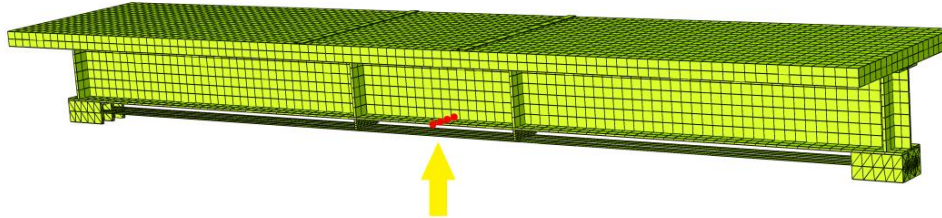
شکل ۵-۲۰- ناحیه مدنظر برای محاسبه کرنش دال



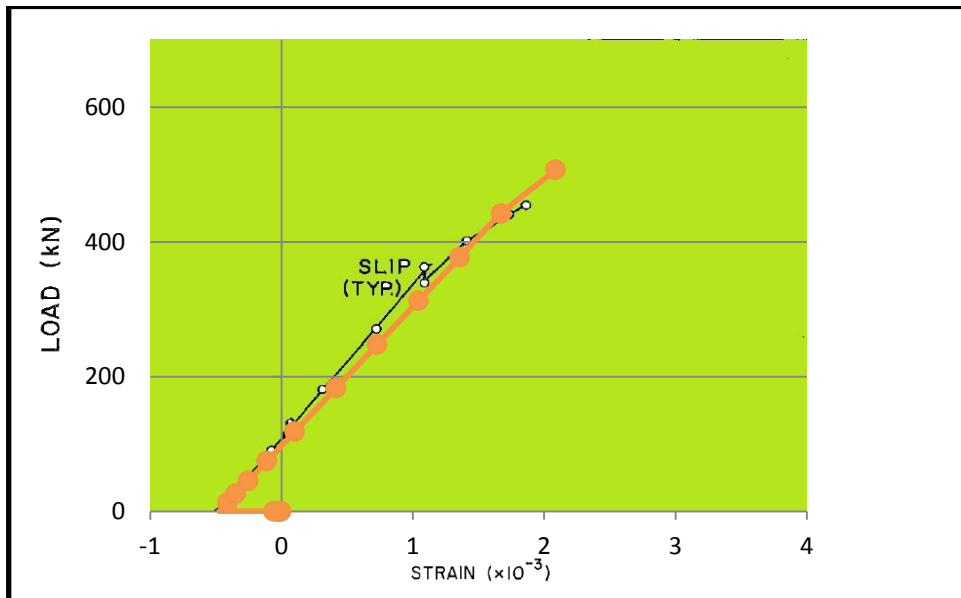
شکل ۵-۲۱- منحنی بار-کرنش بتن و مدل عددی

۵-۵-۳- منحنی بار به کرنش بال کششی

شکل ۵-۲۳ نمودار بار-کرنش بال کششی تیر فولادی را نشان داده است. منحنی در اثر کرنش ناشی از پیش تنیدگی نسبت به مرکز مختصات انحراف دارد. کرنش‌ها در بال کششی تا لحظه‌ی جاری‌شدگی نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود منحنی تا قبل از لغزش به صورت خطی خواهد بود اما بعد از لغزش با افزایش بار، منحنی به صورت تدریجی غیرخطی خواهد شد.



شکل ۵-۲۲- ناحیه مدنظر برای محاسبه کرنش بال کششی

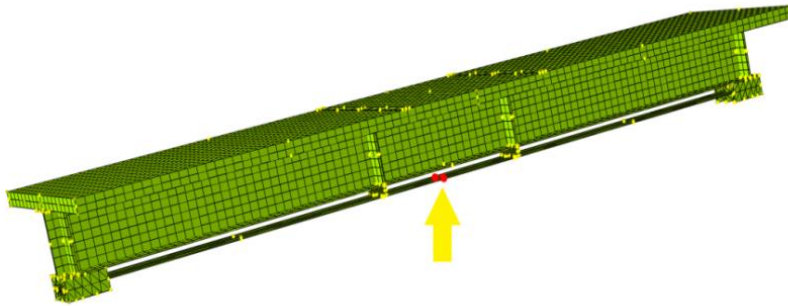


شکل ۵-۲۳- منحنی بار-کرنش بال کششی تیر فولادی و مدل عددی

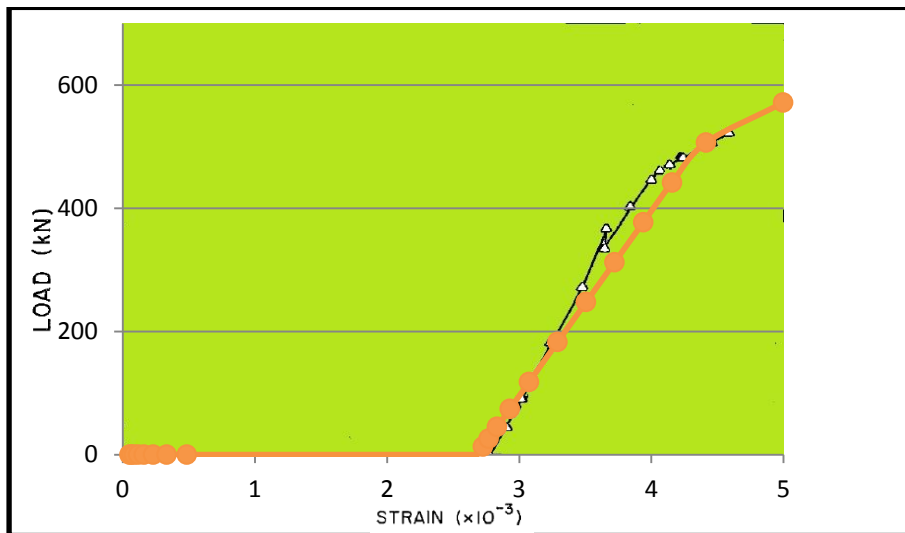
۵-۴-۵- منحنی بار به کرنش تاندون‌ها

شکل ۵-۲۵ نمودار بار-کرنش تاندون‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود منحنی در اثر کرنش ناشی از پیش تنیدگی نسبت به مرکز مختصات انحراف دارد. کرنش در تاندون تا لحظه‌ی جاری شدن، نشان داده شده است. منحنی بار-کرنش تا قبل از لغزش خطی خواهد بود. اما بعد از لغزش با افزایش بار، به صورت تدریجی غیرخطی خواهد شد. با مقایسه منحنی‌های بار-کرنش بال کششی و تاندون می‌توان به این نکته پی برد که بعد از اینکه بال کششی به کرنش جاری‌شدگی

می‌رسد، کرنش در تاندون‌ها به سرعت افزایش پیدا می‌کند. این بدان معناست که تاندون‌ها به تناسب شروع به تحمل سهم بیشتری از مؤلفه کششی لنگر کوپل داخلی می‌کنند.



شکل ۵-۲۴- ناحیه مدنظر برای محاسبه کرنش تاندون



شکل ۵-۲۵- منحنی بار-کرنش در وسط تاندون و مدل عددی

فصل هشتم:

بررسی پارامترهای مؤثر بر رفتار تیرهای مرکب پیش‌تئیده شده

توسط تاندون‌های خارجی

ایده طراحی ابتکاری که می‌تواند برای مقاوم‌سازی پل‌ها و همچنین طراحی پل‌های جدید به کار رود، استفاده از روش پیش‌تنیدگی در پل‌های مرکب بتنی فولادی است. اضافه کردن و پیش‌تنیده کردن یک تاندون در تیر مرکب باعث افزایش ظرفیت نهایی می‌گردد. همچنین پیش‌تنیدگی منجر به این می‌شود که تنش‌های فشاری ایجادشده در بال کششی، جاری شدن بال کششی را به تأخیر بیندازد و اینکه استفاده از کابل‌های مقاومت بالا بجای فولادهای سازه‌ای با مقاومت پایین باعث کاهش وزن کل سازه‌ی فلزی می‌شود.

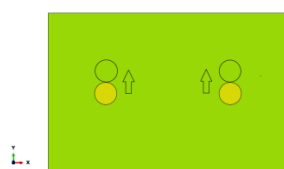
به‌منظور درک رفتار پدیده مورد مطالعه و دستیابی به روابطی ساده برای طراحی، تحلیل پارامتریک نقش به‌سزایی خواهد داشت. بدین منظور در این فصل با در نظر گرفتن ملزومات طراحی و کنترل تنش‌ها در تیر فولادی، تاندون و بتن به بررسی تأثیر عوامل مختلف بر رفتار تیرهای مرکب پیش‌تنیده خواهیم پرداخت. پارامترهایی که در این فصل مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت به ترتیب زیر خواهند بود؛

- اثر موقعیت تاندون در رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده شده
- اثر افزایش قطر تاندون در رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده شده
- اثر افزایش نیروی پیش‌تنیدگی در رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده شده

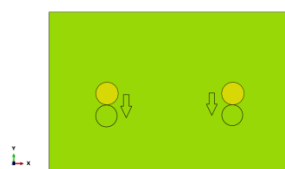
همان‌طور که در فصل قبل مدل عددی تیر مرکب پیش‌تنیده شده با نمونه آزمایشگاهی دکتر سعادت منش مطابقت خوبی داشتند، تأثیر پارامترهای فوق را با مدل عددی ذکرشده قیاس خواهیم کرد. مشخصات مکانیکی و همچنین مشخصاتی که برای مصالح در نمونه عددی در نظر گرفته شده، دقیقاً همان مشخصاتی است که در فصل ۵ ذکر شد. لازم به یادآوری می‌باشد که با فرض عدم لغزش بین عرشه بتنی و تیر فولادی از مدل‌سازی برش‌گیرها صرف‌نظر شده است و در تمامی موارد ملاک گسیختگی تیر مرکب پیش‌تنیده، خردشدگی دال بتنی می‌باشد.

۶-۲- اثر موقعیت تاندون در رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده شده

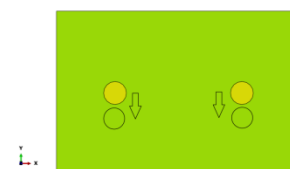
پس از بررسی ملزومات طراحی و کنترل تنش‌ها در تاندون‌ها با توجه به روابط فصل ۴، برون‌محوریت مجاز آیین‌نامه‌ای برای تاندون حداکثر ۷۶ میلی‌متر محاسبه گردید. با توجه به شکل‌های ۶-۱ تا ۶-۳ برای بررسی اثر موقعیت تاندون در رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده ابتدا تاندون به‌اندازه قطرش و نسبت به مرکزش ۱۶ میلی‌متر به سمت بالا (تیر الف) و پایین (تیر ب) جابجا می‌شود. سپس در مرحله آخر به‌اندازه ۱۹ میلی‌متر نسبت به مرکز تاندون به سمت پایین (تیر ج) جابجا می‌گردد. در هر سه مورد نیروی پیش‌تنیدگی همان ۹۸ کیلو نیوتن در نظر گرفته شده است. در جدول ۶-۱ شناسه و مشخصات تیرها بر اساس موقعیت تاندون نسبت به بال کششی آورده شده است.



شکل ۶-۱- تیر الف



شکل ۶-۲- تیر ب

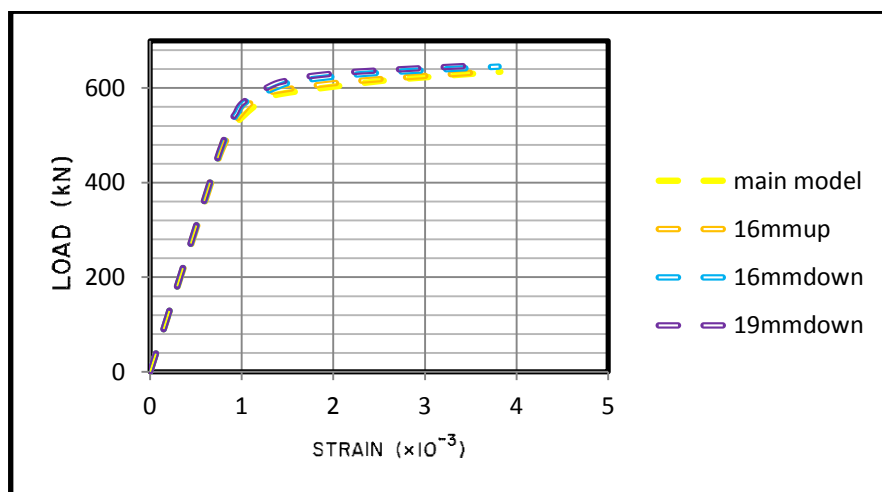


شکل ۶-۳- تیر ج

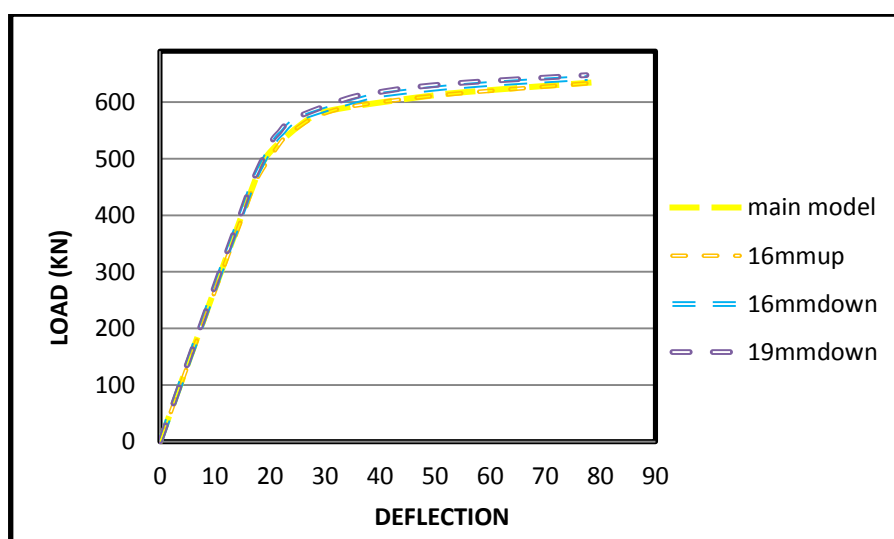
جدول ۶-۱- شناسه و مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده

نمونه مورد آزمایش	موقعیت تاندون نسبت به بال کششی (میلی‌متر)	نیروی پیش‌تنیدگی (کیلو نیوتن)
تیر اصلی	۵۷	۹۸
تیر الف	۴۱	۹۸
تیر ب	۷۳	۹۸
تیر ج	۷۶	۹۸

در شکل ۵-۶ منحنی بار- تغییر مکان در وسط دهانه برای تیر فولادی آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود رفتار الاستیک برای هر ۴ مورد یکسان می‌باشد اما رفتار غیرخطی بسته به میزان برون محوریت تاندون تغییر می‌کند. با توجه به شکل ۵-۶ و جدول ۲-۶ مشاهده می‌شود که هرچه قدر میزان برون محوریت بیشتر باشد، تیر در بار نهایی بزرگ‌تری گسیخته می‌شود. پس می‌توان نتیجه گرفت که هرچه قدر که تاندون‌ها نسبت به تار خنثی دورتر واقع شوند مقاومت بیشتری حاصل خواهد شد.



شکل ۴-۶- نمودار بار به کرنش دال بتنی



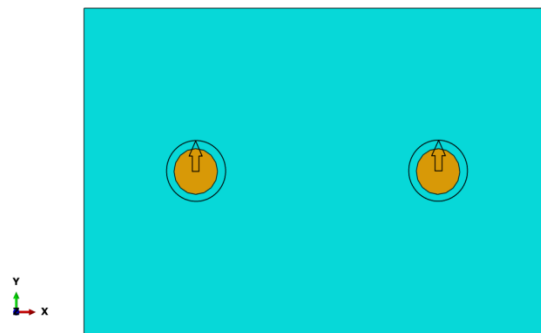
شکل ۵-۶- منحنی بار به تغییر مکان در میانه تیر فولادی

جدول ۶-۲- مقایسه بار نهایی نمونه‌ها با تغییر برون محوریت تاندون

نسبت تفاضل	بار نهایی مدل جدید به مدل اصلی	بار نهایی مدل اصلی (کیلو نیوتن)	بار نهایی (کیلو نیوتن)	نمونه مورد آزمایش
-.۰۶٪	۰.۹۹	۶۳۴,۳	۶۳۳,۹	تیر الف
۱,۳۱٪	۱,۰۱	۶۳۴,۳	۶۴۲,۷	تیر ب
۲,۱٪	۱,۰۲	۶۳۴,۳	۶۴۷,۷	تیر ج

۶-۳- اثر افزایش قطر تاندون در رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده شده

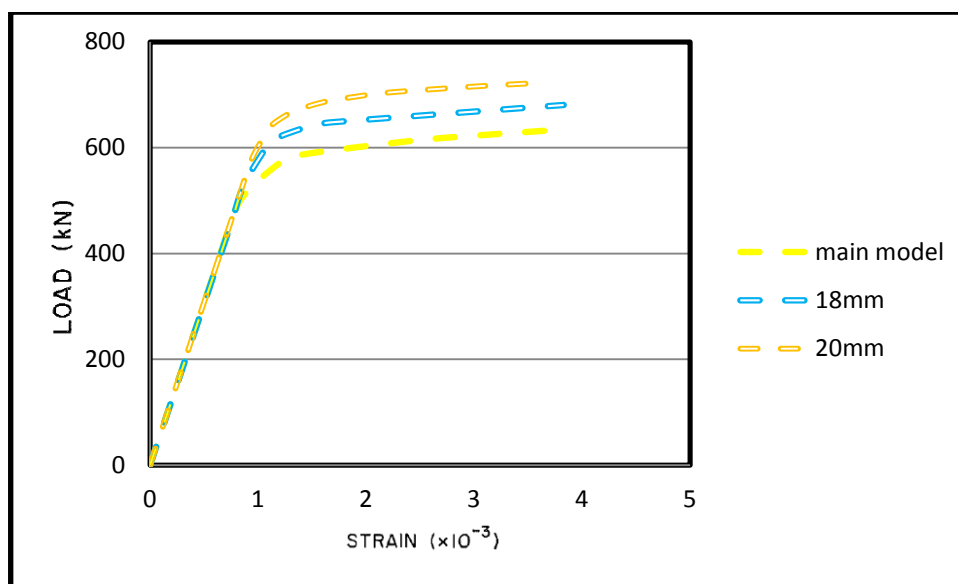
برای بررسی اثر قطر تاندون در رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده پس از کنترل تنش‌ها و ملزومات طراحی در فصل ۴، دو مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین صورت که قطر تاندون‌ها به ۱۸ میلی‌متر (تیر الف)، ۲۰ میلی‌متر (تیر ب) تغییر می‌کند (شکل ۶-۶). موقعیت تاندون‌ها نسبت به بال کششی بدون تغییر باقی می‌ماند. به طوری که مرکز تاندون‌ها نسبت به بال کششی ۵۷ میلی‌متر فاصله دارد. همچنین نیروی پیش‌تنیدگی نیز همان ۹۸ کیلو نیوتن در نظر گرفته می‌شود. جدول ۶-۳ شناسه و مختصات مدل‌های ذکر شده را آورده است.



شکل ۶-۶- افزایش قطر تاندون‌ها

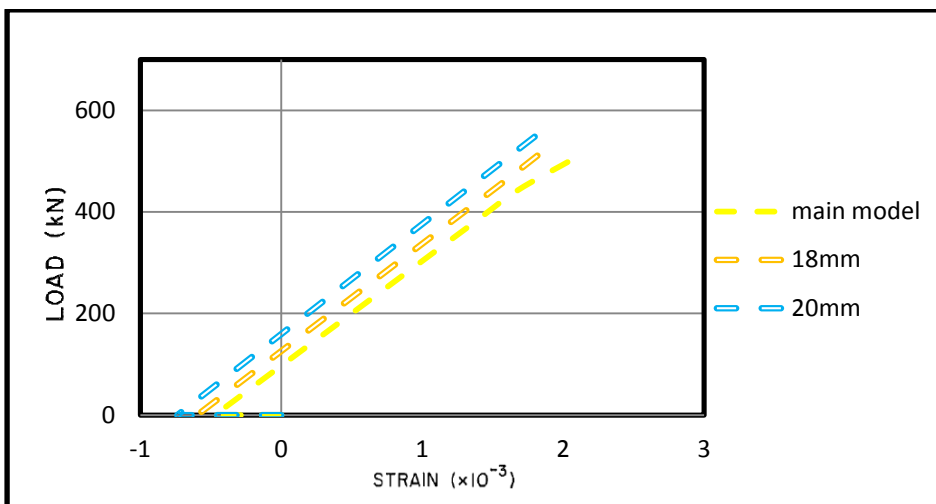
جدول ۳-۶- شناسه و مشخصات مدل‌های مورد آزمایش

نمونه مورد آزمایش	قطر تاندون (میلی‌متر)	نیروی پیش تنیدگی (کیلو نیوتن)	موقعیت تاندون نسبت به بال کششی (میلی‌متر)
تیر اصلی	۱۶	۹۸	۵۷
تیر الف	۱۸	۹۸	۵۷
تیر ب	۲۰	۹۸	۵۷

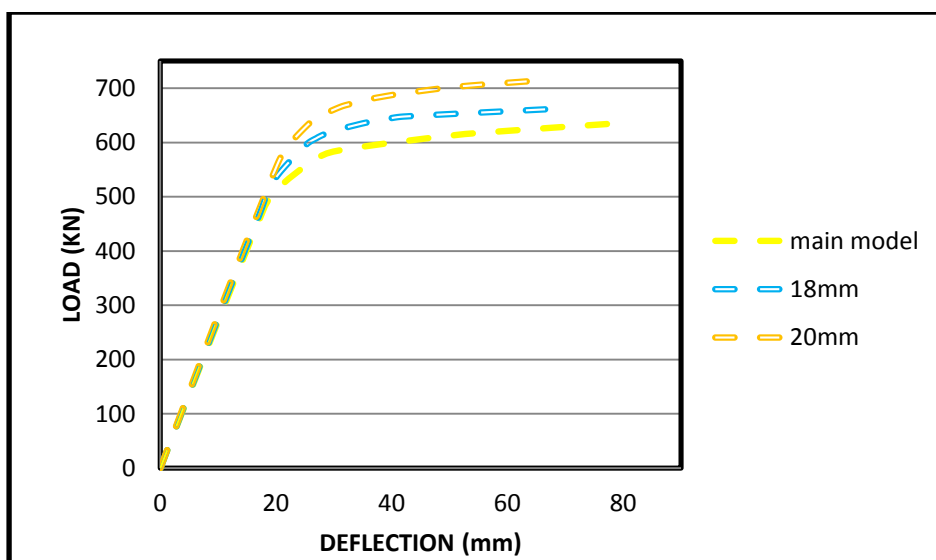


شکل ۶-۷- نمودار بار-کرنش دال بتنی

با توجه به رابطه‌ای که برای افزایش نیرو در تاندون ناشی از بار مرده و زنده در فصل ۴ مطرح شد، انتخاب تاندونی با قطر بزرگ‌تر، نرخ افزایش نیرو در تاندون را بیشتر می‌کند و متعاقباً بال کششی بیشتر فشرده می‌گردد (شکل ۶-۸). در نتیجه همان‌طور که در شکل ۶-۹ مشخص است هرچقدر که قطر تاندون بیشتر می‌شود میزان شکل‌پذیری کاهش پیدا می‌کند و در عوض ظرفیت باربری تیر مرکب افزایش می‌یابد.



شکل ۶-۸- نمودار بار- کرنش بال کششی



شکل ۶-۹- نمودار بار- تغییر مکان

جدول ۶-۴- مقایسه بار نهایی نمونه‌ها با افزایش قطر تاندون

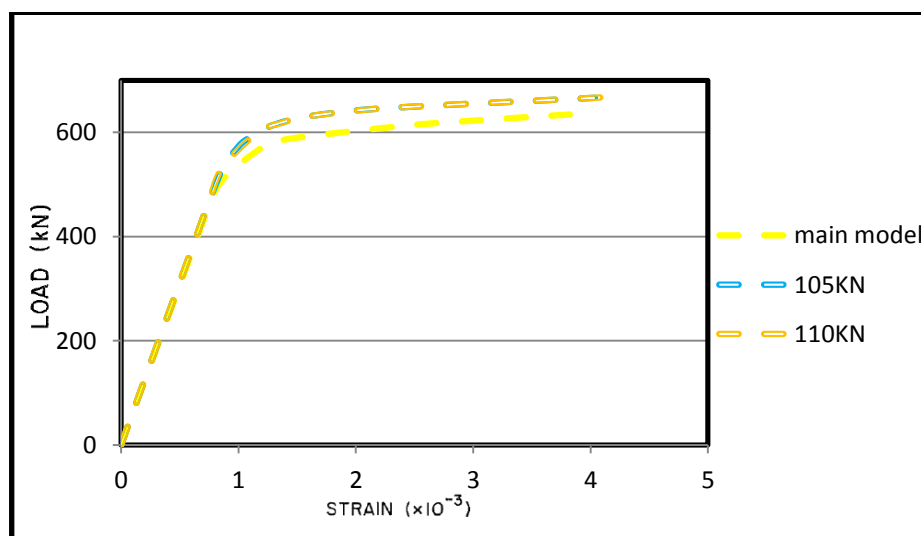
نمونه مورد آزمایش	بار نهایی (کیلو نیوتن)	بار نهایی مدل اصلی (کیلو نیوتن)	بار نهایی مدل جدید به مدل اصلی	نسبت تفاضل
تیر الف	۶۶۱,۷	۶۳۴,۳	۱,۰۴	۴,۳۱٪
تیر ب	۷۱۱,۹	۶۳۴,۳	۱,۱۲	۱۲,۲۲٪

۴-۶- اثر افزایش نیروی پیش تنیدگی در رفتار تیر مرکب

بنا به آنچه در فصل ۴ مطرح شد، با بررسی کنترل خدمت پذیری و همچنین در نظر گرفتن وادادگی در تاندون‌ها، نیروی پیش تنیدگی را افزایش می‌دهیم. به مدل اصلی نیروی ۹۸ کیلو نیوتن وارد می‌شود. حال با تغییر نیرو تا ۱۰۵ کیلو نیوتن (تیر الف) و به صورت محافظه کارانه تا ۱۱۰ کیلو نیوتن (تیر ب) به بررسی رفتار تیر مرکب خواهیم پرداخت. جدول ۵-۶ شناسه و مشخصات مدل‌های ذکر شده را آورده است.

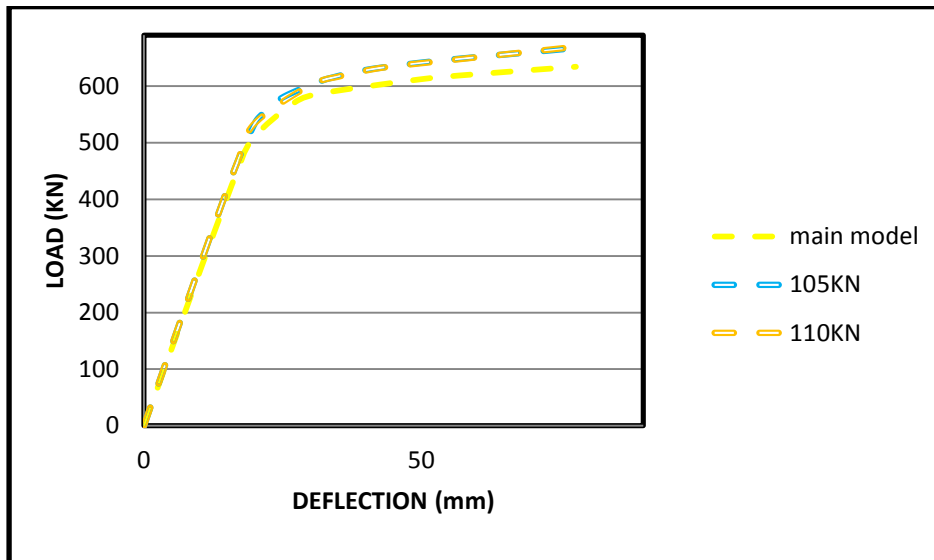
جدول ۵-۶- شناسه و مشخصات مدل‌های مورد آزمایش

نمونه مورد آزمایش	نیروی پیش تنیدگی (کیلو نیوتن)	موقعیت تاندون نسبت به بال کششی (میلی‌متر)
تیر اصلی	۹۸	۵۷
تیر الف	۱۰۵	۵۷
تیر ب	۱۱۰	۵۷



شکل ۱۰-۶- نمودار بار-کرنش دال بتنی

در شکل ۱۰-۶ نمودار بار-کرنش دال بتنی و در شکل ۱۱-۶ نمودار بار- تغییر مکان برای تیر مرکب تحت نیروهای مختلف نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود افزایش نیروی پیش تنیدگی موجب می شود تیر مرکب در بار نهایی بزرگ تری گسیخته شود.



شکل ۱۱-۶- نمودار بار- تغییر مکان

جدول ۶-۶- مقایسه بار نهایی نمونه ها با افزایش نیروی تاندون

نمونه مورد آزمایش	بار نهایی (کیلو نیوتن)	بار نهایی مدل اصلی (کیلو نیوتن)	بار نهایی مدل جدید به مدل اصلی	نسبت تفاضل
تیر الف	۶۶۶,۴	۶۳۴,۳	۱,۰۵	۵,۰۵%
تیر ب	۶۶۷,۷	۶۳۴,۳	۱,۰۵	۵,۲۶%

فصل ہفتم:

نتیجہ گیری و پیشہ داری

۷-۱- مقدمه

تیرهای مرکب پیش‌تنیده می‌توانند در ساخت‌وسازهای جدید و همچنین مقاوم‌سازی سازه‌های موجود مورد استفاده قرار گیرند. قرار دادن تاندون‌ها بدون اعمال پیش‌تنیدگی در وجه کششی تیر مرکبی که تحت لنگر خمشی مثبت می‌باشد، به نسبت کمی بار جاری‌شدگی بال کششی را افزایش و در عین حال موجب افزایش قابل توجهی در بار نهایی تیر مرکب می‌گردد. اما اعمال پیش‌تنیدگی به تاندون‌ها به طرز قابل توجهی بار جاری‌شدگی بال کششی را افزایش می‌دهد.

این پژوهش باهدف ایجاد یک مدل عددی باقابلیت پیش‌بینی رفتار تیرهای مرکب پیش‌تنیده به‌وسیله تاندون‌های خارجی با استفاده از روش اجزای محدود صورت پذیرفته است. بدین منظور تحلیل عددی نمونه‌ی تیر مرکب پیش‌تنیده، مربوط به آزمایش سعادت منش و همکاران توسط نرم‌افزار آباکوس (نسخه ۱-۱۰-۶) انجام گرفت. نتایج اجزای محدود تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی برای خیز، بار نهایی و بار جاری‌شدگی نشان دادند.

در ادامه با استفاده از چند مدل عددی، پارامترهایی از قبیل برون محوریت تاندون، افزایش قطر تاندون و افزایش نیروی پیش‌تنیدگی مورد بررسی قرار گرفت.

۷-۲- نتیجه‌گیری

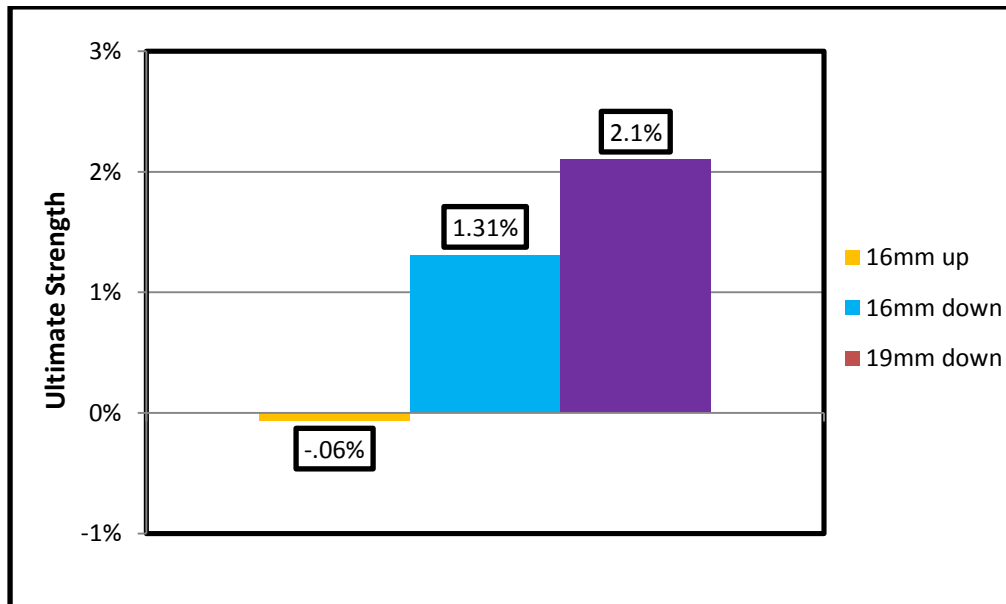
بر پایه بررسی‌های انجام‌شده نتایج کلی این پژوهش عبارت‌اند از:

۱- اضافه کردن یک تاندون به تیر مرکب بدون اعمال پیش‌تنیدگی، به طرز قابل توجهی بار نهایی را افزایش می‌دهد و به نسبت کمی بار جاری‌شدگی بال کششی را افزایش می‌دهد [۱۵].

۲- اضافه کردن یک تاندون به تیر مرکب و اعمال پیش‌تنیدگی به طرز قابل توجهی بار جاری‌شدگی بال کششی را افزایش می‌دهد، اما بار نهایی تغییر چندانی نمی‌کند [۱۵].

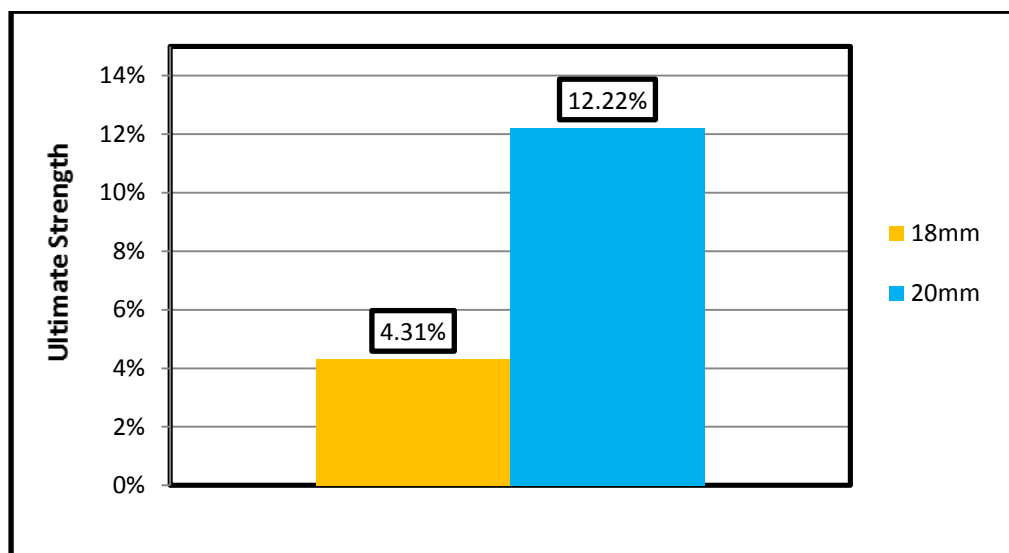
۳- هرچقدر که تاندون‌ها نسبت به تار خنثی دورتر واقع شوند، مقاومت بیشتری حاصل می‌گردد. به همین خاطر تاندون‌ها باید در ناحیه لنگر مثبت زیر بال تحتانی (بال کششی) قرار گیرند. زمانی که

لازم است تا تاندون‌ها در مقابل وسایل نقلیه با ارتفاع بالا محافظت شوند، باید در بالای بال کششی قرار گیرند.



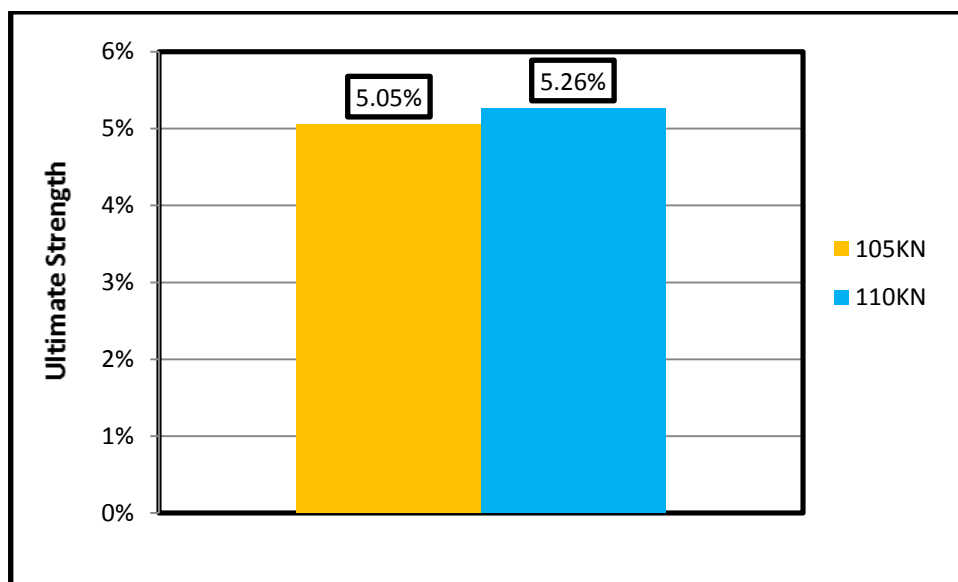
شکل ۷-۱- درصد تأثیر برون محوریت در مقاومت

۴- با نیروی پیش تنیدگی یکسان، هرچه قدر که سطح مقطع تاندون بزرگ‌تر انتخاب شود، خیز کاهش پیدا می‌کند و بار نهایی تیر مرکب افزایش می‌یابد.



شکل ۷-۲- درصد تأثیر قطر تاندون در مقاومت

۵- با در نظر گرفتن ملزومات طراحی افزایش در نیروی پیش تنیدگی، موجب افزایش در بار نهایی می‌گردد.



شکل ۷-۳- درصد تأثیر افزایش نیرو در مقاومت

۳-۷- پیشنهادات

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، برای ادامه تحقیقات در زمینه بررسی رفتار تیرهای مرکب پیش‌تنیده موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد.

- ۱- بررسی رفتار لغزشی برش گیرها در تیرهای مرکب پیش‌تنیده
- ۲- انجام تحقیقات آزمایشگاهی بر روی تیرهای مرکب پیش‌تنیده در زمینه تأثیر وادادگی تنش در تاندون‌ها، خزش و جمع شدگی دال بتنی
- ۳- بررسی رفتار تیرهای مرکب پیش‌تنیده با استفاده از فرم آویزان تاندون
- ۴- انجام مطالعات دقیق‌تر در مورد اثر پارامتری چون خستگی در مقاومت تیر مرکب پیش‌تنیده
- ۵- بررسی رفتار تیر مرکب پیش‌تنیده شده توسط کابل به‌عنوان تاندون
- ۶- بررسی رفتار تیرهای مرکب پیش‌تنیده شده تحت لنگر خمشی منفی

فهرست مراجع

- [۱] ازهری م.، میرقادی ر.؛ طراحی سازه های فولادی، جلد دوم، چاپ دوازدهم، انتشارات ارکان دانش، اصفهان، ۱۳۸۹.
- [۲] Saadatmanesh H., Albrecht P., Ayyub B. M.; Analytical study of prestressed composite beams, J. Struct. Div. ASCE, Vol. 115, Nr. 9, PP. 2364-2381, 1989b.
- [۳] Saadatmanesh H., Albrecht P., Ayyub B. M.; Guide lines for flexural design of prestressed composite beams, J. Struct. Div. ASCE, Vol. 115, Nr. 11, 1989c.
- [۴] Szilard R.; Design of prestressed composite steel structures, J. Struct. Div. ASCE, Vol. 85, Nr. 9, PP. 97-123, 1959.
- [۵] Hoadley P. G., Yong Y. G., Saadatmanesh H.; Behavior of prestressed composite steel beams, J. Struct. Div. ASCE, Vol. 89, Nr. 3, PP. 21-34, 1963.
- [۶] Reagan R. S., Krahl N. W.; Behavior of prestressed composite beams, J. Struct. Div. ASCE, Vol. 93, Nr. 6, PP. 87-108, 1967.
- [۷] Tochacek M., Mehta C. L., Ayyub B. M.; Economical design of prestressed plate girder, J. Struct. Div. ASCE, Vol. 98, Nr. 6, PP. 1273-1289, 1972.
- [۸] Tachibana Y., Kondo K., Ito K.; Experimental study on composite beams prestressed with wire cables, 7th Congress, Int. Assoc. Struct. Engrg., Rio de Janeiro, PP. 677-683, 1964.
- [۹] Stras J. C.; An experimental and analytical study of prestressed composite beams, M.S thesis, Rice University, Houston, Texas, 1964.
- [۱۰] Murkowski W.; Experimental testing of new type of prestressed steel girder, Poland, Poznan Polytechnic, Archives of Civil Engineering, Vol. 20, Nr. 4, PP. 699-712, 1974.
- [۱۱] Ferjencik P., Tochcek M.; Skutocne posobenie predpatych oel'ovych plnostennyh nosnikov, Czechoslovakia, Stavebnicky Cas, Vol. 28, Nr. 4, PP. 273-287, 1980.
- [۱۲] Klaiber F. W.; Strengthening of existing single span steel beam and concrete deck bridges, Iowa, Ames, Iowa State University, Dept. of Civ. Engrg., 1983.
- [۱۳] Saadatmanesh H., Albrecht P., Ayyub B. M.; Experimental study of prestressed composite beams, J. Struct. Div. ASCE, Vol. 115, Nr. 9, PP. 2349-2364, 1989a.
- [۱۴] Troitsky M., Zielinski Z., Rabbani N.; Prestressed-steel continuous span girders, J. Struct. Div. ASCE, Vol. 115, Nr. 5, PP. 1357-1370, 1989.

- [۱۵] Ayyub B. M., Yong Y. G., Saadatmanesh H.; Prestressed composite girders under positive moment, J. Struct. Div. ASCE, Vol. 116, Nr. 11, PP. 2931-2951, 1990.
- [۱۶] سروش نیا س.، بهشتیان ن.؛ کامل ترین مرجع علمی آباکوس، چاپ پنجم، انتشارات نگارنده دانش، تهران، ۱۳۹۱.
- [۱۷] Vermeer P.A., De Borst R.; Non-associated plasticity for soil, concrete and rock, Vol. 29, Nr. 3, 1984.
- [۱۸] پیش‌بینی رفتار بتن محصور در کامپوزیت FRP به روش اجزا محدود، داوود مستوفی نژاد، حسن سعادت‌مند، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۲، جلد ۱۸، تابستان ۱۳۸۶.
- [۱۹] Guo Z.; Strength and Deformation of Concrete, China, Beijing, Tsinghua University Press House, 1997.
- [۲۰] Kmiecik P., Kaminski M.; Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration, Archive of civil and mechanical engineering, Poland, Wrocław University of Technology, 2011.
- [۲۱] Wight J. K., Macgregor J. G.; Reinforced concrete: mechanics and design, sixth edition, Pearson, 2011.
- [۲۲] Vecchio F. J., Collins M. P.; The Modified Compression Field Theory for reinforced concrete elements subjected to shear, J. Struct. ACI, Vol. 83, Nr. 6, PP. 925-933, 1986.
- [۲۳] Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc, ABAQUS Theory Manual version 6.10, 2011.

Abstract

An innovative design concept that can be used for retrofitting existing bridges as well as for designing new bridges involves the utilization of prestressing in composite steel-concrete bridges. Prestressing the steel in a composite steel-concrete beam increases the load at which the steel beam yields, and also increases the ultimate strength of the composite section. At the same time, precompressing the tension flange improves the fatigue strength.

We have tried to study the performance of prestressed composite beams under positive moment using ABAQUS software.

First, a numerical model was simulated from a beam which had prestressing bars along the bottom (tension) flange and was subjected to positive bending moment (Hamid Saadatmanesh et al experiment, 1986). The accuracy of this modeling was approved because there was a good agreement between the results of the numerical method and the results of the experimental sample. Using finite element analysis, we studied the effects of parameters such as tendon eccentricity, larger tendon area and higher prestressing force on the behaviors of prestressed composite beams, afterwards.

Analyzing the results showed, prestressing a conventional composite beam can significantly increase the load at which first yielding occurs and the ultimate capacity of the beam.

Keywords: prestressed composite beam; tendon; ABAQUS; ultimate capacity.



Faculty of Civil Engineering

**Steel-Concrete Composite Beams Prestressed
with External Tendons**

Behrouz Zarei Shargh

Supervisor:

Dr. Farshid Alaei

**A thesis submitted in partial fulfillment
of the requirements for the degree of
Master of Science**

(Structural Engineering)

February 2016