سازه‌های پس کشیده، طراحی و اجرا

ترجمه

جلال صالحی مبین

نشر علم عمران

www.elme-omran.com
Info@elme-omran.com

عضو:

انجمن فرهنگی ناشران کتاب دانشگاهی

این اثر مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است، هرکس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر و مؤلف، نشر یا پخش یا عرضه کند مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

سرشناسه	اعلامی، بیژن – Aalami, Bijan O.
عنوان و پدیدآورنده	سازه‌های پس‌کشیده، طراحی و اجرا/ تالیف بیژن اعلامی؛ ترجمه جلال صالحی‌مبین.
مشخصات نشر	تهران : علم عمران، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	٦۱۰ ص.؛ ۲۲ × ۲۲ س‌م.
شابک	٦۰۰۰۰۰ ریال: ۳-٤۸-٥۱۷٦-٦۰۰-۹۷۸
یادداشت	عنوان اصلی: .Post-tensioned buildings; design and construction
موضوع	ساختمان‌سازی با بتن پیش‌تنیده --Prestressed concrete construction -- بتن پیش‌تنیده پس‌کشیده-- Post-tensioned prestressed concrete -- ساختمان‌های بلند -- طرح و ساختمان -Tall buildings - Design and construction
ارزش افزوده	صالحی مبین، جلال، ۱۳٦۱ -، مترجم
رده‌بندی کنگره	۱۳۹۷ ۲س٦الف/٦۸۳/۹ TA
رده‌بندی دیویی	٦۹۳/٥٤۲
شمارهٔ کتابخانهٔ ملی	٥۱۳۰۲٦۰

سازه‌های پس‌کشیده، طراحی و اجرا
ترجمه: جلال صالحی‌مبین

چاپ اول	بهار ۱۳۹۷
تعداد و قطع صفحات	٦۱۰ صفحه خشتی
حروف‌چینی و صفحه‌آرایی	علم عمران
شمارگان	۱۰۰۰
بهای کتاب	٦۰۰۰۰۰ ریال
شابک: ۳-٤۸-٥۱۷٦-٦۰۰-۹۷۸	ISBN:978-600-5176-48-3

نشر علم عمران: تهران، یوسف آباد، خیابان جهان آرا، بین خیابانهای ۱٦ و ۱۸، پلاک ۳۳، طبقه دوم، واحد ۱۱،
تلفن: ۸۸۳٥۳۹۳۰ دورنگار: ۸۸۳٥۳۹۳۲

حقوق چاپ و نشر برای نشر علم عمران محفوظ است.

مقدمه
مترجم

کتابی که پیش روی دارید حاصل تجربه ۳۵ ساله دکتر اعلامی می باشد که به جرات مایه افتخار ایران زمین و از صاحب نظران بزرگ در زمینه پیش تنیدگی می‌باشد. قبل از انتشار این کتاب بنده مقالات و نوشته های ایشان در موسسه انجمن پیش تنیدگی آمریکا (PTI) و سایر مجلات معتبر را خوانده بودم و با نرم افزار ابداعی ایشان، ADAPT، آشنایی داشتم. با مطالعه اولیه این کتاب دریافتم که مطالب این کتاب بسیاری از ابهامات طراحی دالها به ویژه پس تنیده را برطرف می‌کند و منبع خوبی برای اطلاعات طراحی و اجرا می باشد. معمولا مطالبی که در کتاب حاضر ذکر شده است یا در کتابهای درسی بدان پرداخته نشده است یا به خوبی توضیح داده نشده است و منجر به ایجاد مشکلات مفهومی در طراحی و اجرا شده است. این امر باعث شده است مواردی مانند پس کشیدگی در هاله‌ای از رمز و راز و پیچیدگی برای مهندسین باقی بماند. مطالب کتاب می تواند حلقه مفقوده اطلاعات بین مطالب دانشگاهی و هرآنچه که یک مهندس مشاور در طراحی و نظارت این سیستم سقف به آن نیازمند است را تامین کند. در کتاب سعی شده است به کمک تصاویر و نمودارها مفاهیم و روشها به درستی بیان گردد. فرض بر آن است که مطالعه کننده محترم با مبانی طراحی سازه‌های بتن مسلح آشنایی دارد و کتاب حاضر اصول پس تنیدگی را به طور کامل پوشش می دهد. اصولی که برای یک طراحی موثر و کارآمد لازم می باشد. تمرکز کتاب بر علم مهندسی قرار گرفته است تا هنر طراحی پس کشیدگی نشان داده شود؛ لذا تاکید بیشتر کتاب بر حالات حدی بهره‌برداری و مقاومت قرار گرفته است. هدف این بوده است که طیف وسیعتری از همکاران از کتاب بهره ببرند، چرا که با دانستن مفاهیم پایه، رسیدن به تجربه کافی برای طراحی بهینه راحت‌تر خواهد بود. پارامترها و محدوده‌های طراحی در کتاب بر مبنای آئین نامه های ACI318/IBC و Eurocode 2 و گزارش TR43 بیان شده است. لذا تصمیم بر ترجمه این کتاب گرفتم تا گامی هرچند کوچک در اعتلای دانش مهندسی این مرز و بوم

داشته باشم. امید است توانسته باشم منظور مولف را در حد وسع خود به خوبی انتقال داده باشم و مهندسین محترم بهره مناسب را از مطالب کتاب ببرند.

بنده این کتاب را تقدیم می کنم به مادر عزیز و همسر مهربانم که همیشه روشنایی بخش و آرامش دهنده قلبم بوده‌اند. در پایان، فرصت را مغتنم شمرده از زحمات و تلاشهای بی شائبه جناب آقای دکتر سید مهدی داودنبی مدیریت محترم انتشارات علم عمران در آماده‌سازی کتاب و ارائه پیشنهادات ارزنده سپاسگزاری می‌نمایم.

از اساتید، صاحبنظران و مطالعه کنندگان محترم تقاضا می‌گردد با ارائه نظرات و پیشنهادات ارزشمند خود از طریق آدرس الکترونیک info@kasrace.com ما را در ارائه هر چه بهتر این مجموعه در چاپ‌های بعدی آن یاری نمایند.

جلال صالحی مبین

بهار ۱۳۹۷

فهرست
مطالب

فصل اول. مقدمه..... ۱

۱.۱ هدف و رئوس مطالب..... ۲

۲.۱. تاریخچه مختصر از پس تنیدگی در صنعت ساخت..... ۴

مراجع..... ۱۱

فصل دوم. پیش‌تنیدگی..... ۱۳

۱.۲ شرح مختصری از پیش تنیدگی..... ۱۴

۱.۱.۲ گزینه‌های پیش‌تنیدگی..... ۱۴

۲.۲ ویژگی‌ها و مزایای بارز پیش‌تنیدگی پس‌کشیده..... ۱۵

۳.۲ کاربرد پس‌کشیدگی در ساختمان‌ها..... ۲۲

۱.۳.۲ سیستم‌های سقف- دال تخت..... ۲۳

۲.۳.۲ سیستم‌های سقف، تیر و دال..... ۲۷

۳.۳.۲ دال سکویی در ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه..... ۲۸

۴.۳.۲ صفحه انتقال دهنده..... ۲۹

۵.۳.۲ پی گسترده (رادیه)..... ۳۲

۶.۳.۲ کف‌های صنعتی..... ۳۳

۷.۳.۲ کفهای صنعتی سبک یا مسکونی (SOG)..... ۳۵

۸.۳.۲ بهسازی با پیش‌تنیدگی خارجی..... ۳۹

۹.۳.۲ پیش‌تنیدگی جهت باز گرداندن قاب‌های لرزه‌ای به حالت اولیه..... ۴۲

۱۰.۳.۲ پیش‌تنیدگی در دیوارها..... ۴۵

۱۱.۳.۲ پیش‌تنیدگی در ستون‌ها..... ۴۶

۱۲.۳.۲ کاربردهای خاص پیش‌تنیدگی..... ۴۶

۴.۲. مصالح و تجهیزات پیش‌تنیدگی..... ۴۶

۱.۴.۲ فولاد پیش تنیدگی..... ۴۸

۲.۴.۲ تاندون‌ها..... ۵۱

۳.۴.۲ تجهیزات کشش..... ۵۶

۴.۴.۲ تجهیزات تزریق دوغاب (گروت)..... ۵۸

۵.۲ اجرای پس‌تنیدگی..... ۵۹

۱.۵.۲ اجرا با تاندون‌های نچسبیده..... ۵۹

۲.۵.۲ اجرا با تاندون‌های گروت شده..... ۷۹

۳.۵.۲. علامت گذاری و ثبت موقعیت تاندون‌ها..... ۹۴

۶.۲ مقادیر مصالح و صرفه اقتصادی..... ۹۵

۱.۶.۲ مقادیر مصالح..... ۹۶

۲.۶.۲ هزینه ساخت..... ۱۰۶

۷.۲ تعمیر، بهسازی، نگهداری و طول عمر ۱۰۷
۱.۷.۲ دال‌های مسلح شده با تاندون‌های گروتی ۱۰۷
۲.۷.۲ دال‌های مسلح شده با تاندون نچسبیده ۱۰۸
۸.۲ مراجع ۱۱۱

فصل سوم. طراحی دالهای بتنی ۱۱۳
۱.۳ الزامات کلی ۱۱۴
۲.۳ الزامات روش طراحی ۱۱۴
۳.۳ طراحی بتن نسبت به سایر مصالح ۱۱۴
۴.۳ مشخصه‌های طراحی پیش‌تنیدگی ۱۲۲
۵.۳ روند تحلیل و طراحی ۱۲۴
۱.۵.۳ تحلیل و گام‌های طراحی ۱۲۴
۲.۵.۳ مدل‌سازی سازه‌ای ۱۲۴
۶.۳ مراجع ۱۳۵

فصل چهارم. مفاهیم طراحی و روش‌ها ۱۳۷
۱.۴ اهداف اصلی ۱۳۸
۱.۱.۴ ایمنی ـ حالت حدی نهایی (ULS) ۱۳۸
۲.۱.۴ عملکرد ـ حالت حدی بهره‌برداری (SLS) ۱۳۹
۳.۱.۴ اقتصاد طرح ۱۴۰
۴.۱.۴ قانونی بودن ۱۴۰
۲.۴ مصالح ۱۴۱
۱.۲.۴ بتن ۱۴۱
۲.۲.۴ فولاد پیش‌تنیدگی ۱۴۱
۳.۲.۴ فولاد غیرپیش‌تنیده ۱۴۲
۳.۴ انتخاب ابعاد و اندازه‌ها ۱۴۲
۱.۳.۴ فواصل تکیه‌گاهی ۱۴۲
۲.۳.۴ ضخامت دال ۱۴۳
۳.۳.۴ ابعاد تیر ۱۴۴
۴.۳.۴ نمونه‌های ابعاد متعارف ۱۴۴
۴.۴ دوام ۱۴۵
۱.۴.۴ در معرض خوردگی بودن ۱۴۵
۱.۱.۴.۴ پوشش آرماتورها ۱۴۵
۲.۱.۴.۴ کنترل عرض ترک ۱۴۶
۳.۱.۴.۴ انتخاب سیستم پس‌کشیدگی ۱۴۸
۲.۴.۴ حفاظت در برابر حریق ۱۵۰
۳.۴.۴ سایش ۱۵۳
۵.۴ مسیر بار ۱۵۴
۱.۵.۴ پیش‌نیازهای مسیر بار ۱۵۴
۲.۵.۴ روش نواری ۱۵۸
۳.۵.۴ دال به عنوان یک محیط پیوسته ۱۵۹
۴.۵.۴ سیستم‌های یک‌طرفه و دوطرفه ۱۶۰
۶.۴ سیستم سازه‌ای ۱۶۴
۱.۶.۴ سیستم‌های دال ۱۶۴
۲.۶.۴ نوار دال‌ها ۱۶۹
۳.۶.۴ سرستون / کتیبه (صفحه ضخیم شده) ۱۷۱
۴.۶.۴ دال‌های مجوف ۱۷۴
۴. ۶. ۵ تیرچه دال ۱۷۸
۴. ۶. ۶ تیرها ۱۷۸
۴. ۶. ۷ شرایط تکیه‌گاهی، مفصلی یا گیردار ۱۸۳
۸.۶.۴ مثال‌هایی از سایر سیستم‌های سقف ۱۹۰
۷.۴ بارگذاری ۱۹۳
۱.۷.۴ وزن سازه ۱۹۳
۲.۷.۴ سربار مرده ۱۹۳
۳.۷.۴ بار زنده ۱۹۳
۴.۷.۴ پیش‌تنیدگی ۱۹۴
۵.۷.۴ باد/ زلزله/ بارهای خاص ۱۹۵
۸.۴ پیش‌تنیدگی ۱۹۵
۱.۸.۴ بار متوازن ۱۹۵

۲.۸.۴ انتخاب نیرو ۲۰۰
۳.۸.۴ عرض بال مؤثر تیرهای T شکل ۲۰۳
۱.۳.۸.۴ مفهوم عرض مؤثر ۲۰۴
۲.۳.۸.۴ عرض مؤثر برای بارهای محوری ۲۰۹
۳.۳.۸.۴ عرض مؤثر برای طراحی مقاومتی ۲۱۳
۴.۸.۴ جایگذاری منطقی تاندون‌ها ۲۱۸
۵.۸.۴ حداقل متوسط پیش‌فشار ۲۲۱
۱.۵.۸.۴ پس‌زمینه تاریخی ۲۲۲
۲.۵.۸.۴ اهمیت کنونی حداقل پیش‌فشار ۲۲۲
۳.۵.۸.۴ ضوابط آیین‌نامه ۲۲۳
۴.۵.۸.۴ محاسبه متوسط پیش‌فشار ۲۲۵
۶.۸.۴ تلاش‌های فوق استاتیکی (تلاش‌های ثانویه) ۲۲۵
۱.۶.۸.۴تعریف تلاش‌های فوق استاتیکی (ثانویه) ۲۲۶
۲.۶.۸.۴ توسعه و گسترش تلاش‌های فوق استاتیکی ۲۲۶
۷.۸.۴ طراحی نیروی ثابت و نیروی متغیر ۲۳۱
۱.۷.۸.۴ تعریف نیروی مؤثر و متغیر ۲۳۱
۲.۷.۸.۴ مثال‌هایی از نیروهای طراحی مؤثر و متغیر ۲۳۳
۸.۸.۴ آرایش تاندون‌ها ۲۳۴
۹.۸.۴ انتخاب و عملکرد سیستم پس‌کشیدگی: چسبیده/ نچسبیده ۲۴۱
۹.۴ گزینه‌های تحلیل ۲۴۷
۱.۹.۴ فرضیات اساسی ۲۴۷
۲.۹.۴ روش‌های تحلیل ۲۴۸
۳.۹.۴ روش قاب ساده (SFM) ۲۴۸
۴.۹.۴ روش قاب معادل (EFM) ۲۴۸
۵.۹.۴ روش اجزاء محدود (FEM) ۲۵۰
۱.۵.۹.۴ مقدمه‌ای بر مفهوم FEM ۲۵۰
۲.۵.۹.۴ گسسته‌سازی (مجزا کردن) ۲۵۲
۳.۵.۹.۴ نیروها و تنش‌ها ۲۵۲
۴.۵.۹.۴ تراکم مش ۲۵۶
۵.۵.۹.۴ نیروها (تلاش‌ها) در مقاطع طراحی ۲۵۶
۱۰.۴ کنترل حالت حدی بهره‌برداری (SLS) ۲۵۸
۱.۱۰.۴ ترکیب بارها ۲۵۸
۲.۱۰.۴ کنترل ترک، کنترل تنش و آرماتورهای غیرتنیده براساس ACI318 ..... ۲۵۹
۳.۱۰.۴ کنترل ترک، کنترل تنش، آرماتورهای غیرتنیده براساس EC2 ..... ۲۶۹
۴.۱۰.۴ کنترل ترک، تنش و آرماتورهای غیرتنیده براساس TR43 ..... ۲۸۲
۱.۵.۱۰.۴ پس‌زمینه ۲۹۰
۲.۵.۱۰.۴ تنش دورترین تار و ترک‌خوردگی ۲۹۰
۳.۵.۱۰.۴ اهمیت عرض ترک محاسباتی ۲۹۱
۴.۵.۱۰.۴ کاربرد تنش‌های مجاز مطابق آئین‌نامه ۲۹۵
۶.۱۰.۴ خیزها ۲۹۵
۱.۶.۱۰.۴ کلیات ۲۹۵
۲.۶.۱۰.۴ محدودهٔ خیز قابل قبول ۲۹۵
۳.۶.۱۰.۴ تغییر شکل‌های مجاز ۲۹۷
۴.۶.۱۰.۴ روش‌های محاسبه خیز و مقایسه آن‌ها ۲۹۸
۵.۶.۱۰.۴ مقایسه روش‌های محاسبه خیز ۳۰۷
۶.۶.۱۰.۴ خیز دال‌های پس‌کشیده ۳۰۷
۷.۶.۱۰.۴ خیز بار زنده ۳۰۷
۸.۶.۱۰.۴ خیزهای دراز مدت ۳۰۸
۷.۱۰.۴ کنترل ارتعاش ۳۱۱
۱۱.۴ کنترل ایمنی (ULS) ۳۱۲
۱.۱۱.۴ ترکیب بارهای طراحی ثقلی ۳۱۲
۲.۱۱.۴ تلاش‌های فوق استاتیکی ۳۱۳
۱.۲.۱۱.۴ تلاش‌های فوق استاتیکی و نیاز مقاومتی ۳۱۳
۲.۲.۱۱.۴ تعیین تلاش‌های فوق استاتیکی ۳۱۵
۳.۲.۱۱.۴ مثالی از یک نوار طراحی ۳۲۰
۴.۲.۱۱.۴ تلاش‌های فوق استاتیکی برای سازه‌های پیوسته ۳۲۳
۵.۲.۱۱.۴ تلاش‌های فوق استاتیکی در ساخت چندفازی (چندمرحله‌ای) ۳۲۵
۳.۱۱.۴ بازتوزیع لنگرها ۳۲۹

۴.۱۱.۴ طراحی برای مقاومت ۳۳۳
۴. ۱۱. ۵ ایمنی در برابر لنگر ترک خوردگی ۳۳۵
۴. ۱۱. ۶ برش پانچ ۳۳۶
۴. ۱۱. ۶. ۱ برش یک طرفه و دو طرفه ۳۳۶
۴. ۱۱. ۶. ۲ مدل طراحی تجربی ۳۳۸
۴. ۱۱. ۶. ۳ تعمیم روابط برش پانچ ۳۳۸
۴. ۱۱. ۶. ۴ برش یک‌طرفه در طراحی دال ۳۴۰
۴. ۱۱. ۶. ۵ مقدار آرماتور برشی ۳۴۳
۴. ۱۱. ۶. ۶ بازشوها و برش پانچ ۳۴۴
۴. ۱۱. ۶. ۷ طراحی برش پانچ ACI318 ..... ۳۴۸
۴. ۱۱. ۶. ۸ طراحی برش پانچ EC2 ..... ۳۵۷
۹.۶.۱۱.۴ مثال برش پانچ در پس کشیدگی ۳۶۵
۴. ۱۱. ۷ برش یک‌طرفه ۳۷۸
۴. ۱۲ شرایط اولیه؛ انتقال نیروی پیش‌تنیدگی ۳۷۹
۴. ۱۲. ۱ ترکیب بارها ۳۸۰
۴. ۱۲. ۲ کنترل تنش دورترین تار ۳۸۰
۴. ۱۲. ۳ آرماتورهای انفجاری ۳۸۱
۴. ۱۲. ۴ کاربرد کنترل تنش حالت اولیه (انتقال نیرو) ۳۸۲
۴. ۱۲. ۵ کشش چندمرحله‌ای ۳۸۵
مراجع ۳۸۶

فصل پنجم. ۱۰ گام طراحی یک دال پیش‌تنیده ۳۸۹

۱۰ گام طراحی ۳۹۰

فصل ششم. طراحی سقف‌های پیش‌تنیده به روش محاسبات گام به گام ۳۹۳

پیشگفتار ۳۹۴
گام‌های طراحی ۳۹۵
۱. هندسه و سیستم سازه‌ای ۳۹۷
۱.۱ کلیات ۳۹۷
۲.۱ هندسه و شرایط تکیه گاهی ۳۹۷
۳.۱ خطوط تکیه گاهی و سطوح بارگیر ۳۹۷
۴.۱ نوار طراحی ایده آل سازی شده ۴۰۰
۲. مشخصات مصالح ۴۰۱
۱.۲بتن ۴۰۱
۲.۲ آرماتور غیر پیش تنیده (منفعل) ۴۰۱
۳.۲ پیش تنیدگی (شکل ۳.۲-۱ تا ۳.۲-۳) ۴۰۲
۳. بارها ۴۰۳
۱.۳ وزن خود سازه ۴۰۳
۲.۳ سربار مرده ۴۰۴
۳.۳ بار زنده : $3kN/m^2$ ۴۰۵
۴. پارامترهای طراحی ۴۰۶
۱.۴ آئین نامه‌های قابل کاربرد ۴۰۶
۲.۴ پوشش بتنی روی میلگردها و استرندهای پیش تنیده ۴۰۶
۳.۴ تنش‌های مجاز ۴۰۷
۴.۴ محدودیت عرض ترک ۴۱۰
۵.۴ تغییر شکل (خیز) مجاز ۴۱۱
۵. تلاش ناشی از بارهای زنده و مرده ۴۱۲
۶. پس‌کشیدگی ۴۱۴
۱.۶ انتخاب پارامترهای طراحی ۴۱۴
۲.۶ انتخاب نیروی تاندون پس کشیده و پروفیل آن ۴۱۵
۳.۶ انتخاب تعداد استرندها ۴۱۷
۴.۶ محاسبه بار متوازن ۴۱۸
۵.۶ تعیین عکس‌العمل‌های ناشی از بارهای متوازن (پیش‌تنیدگی) ۴۲۴
۷. کنترل آئین‌نامه‌ای برای شرایط بهره‌برداری ۴۲۵
۱.۷ ترکیب بارها ۴۲۵
۲.۷ کنترل تنش ۴۲۵
۳.۷ کنترل عرض (بازشدگی) ترک ۴۲۹
۴.۷ حداقل آرماتور ۴۳۱

۵.۷ کنترل تغییر شکل ۴۴۰
۸. کنترل آئین‌نامه‌ای برای مقاومت ۴۴۲
۱.۸ ترکیب بارها ۴۴۲
۲.۸ تعیین عکس‌العمل‌های فوق استاتیکی ۴۴۲
۳.۸ محاسبه لنگرهای طراحی ۴۴۲
۴.۸ طراحی مقاومتی (ULS) برای خمش و شکل‌پذیری ۴۴۳
۵.۸ طراحی و کنترل برش پانچ ۴۴۷
۹. کنترل آئین‌نامه‌ای برای شرایط اجرائی (Initial) ۴۴۷
۱.۹ ترکیب بارها ۴۴۷
۲.۹ کنترل تنش ۴۴۸
۱۰. جزئیات ۴۵۰
مراجع ۴۵۰

فصل هفتم. طراحی تیر پس کشیده محاسبات گام به گام ۴۵۱

مقدمه ۴۵۲
گام‌های طراحی ۴۵۳
۱. هندسه و سیستم سازه‌ای ۴۵۴
۱.۱ ابعاد و شرایط تکیه‌گاهی ۴۵۴
۲.۱ عرض موثر بال‌ها ۴۵۶
۳.۱ مشخصات مقطع ۴۵۷
۲. مشخصات مصالح ۴۵۷
۱.۲ بتن ۴۵۷
۲.۲ آرماتور غیر پیش‌تنیده (غیر فعال) ۴۵۷
۳.۲ پیش‌تنیدگی: (شکل ۳.۲-۱ تا ۳.۲-۴) ۴۵۸
۳. بارها ۴۵۹
۱.۳ وزن سازه ۴۵۹
۲.۳ سربار مرده ۴۵۹
۳.۳ بار زنده: $2.5kN/m^2$ ۴۶۰
۴. پارامترهای طراحی ۴۶۰
۱.۴ آیین‌نامه‌های قابل کاربرد ۴۶۰
۲.۴ پوشش میلگرد و استرند پیش‌تنیدگی ۴۶۰
۳.۴ تنش‌های مجاز ۴۶۰
۴.۴ محدودیت عرض ترک ۴۶۳
۵.۴ خیز مجاز ۴۶۴
۵. تلاش‌های داخلی ناشی از بارگذاری زنده و مرده ۴۶۵
۶. پس‌کشیدگی ۴۶۶
۱.۶ انتخاب پارامترهای طراحی ۴۶۶
۲.۶ انتخاب نیروی تاندون پس‌کشیده و پروفیل ۴۶۸
۳.۶ انتخاب تعداد استرندها ۴۶۹
۴.۶ محاسبه بارهای متوازن ۴۷۰
۵.۶ تعیین تلاش‌های ناشی از بارهای متوازن (پس‌کشیدگی) ۴۷۳
۷. کنترل آیین‌نامه‌ای برای بهره‌برداری ۴۷۳
۱.۷ ترکیب بارها ۴۷۳
۲.۷ کنترل تنش ۴۷۴
۳.۷ کنترل عرض ترک ۴۷۹
۴.۷ حداقل آرماتور ۴۸۳
۵.۷ کنترل خیز ۴۹۰
۸. کنترل ضوابط آیین‌نامه برای مقاومت ۴۹۳
۱.۸ ترکیب بارها ۴۹۳
۲.۸ تعیین تلاش‌های فوق استاتیکی ۴۹۴
۳.۸ محاسبه لنگرهای طراحی ۴۹۴
۴.۸ طراحی مقاومتی برای خمش و شکل‌پذیری ۴۹۵
۵.۸ طراحی برشی یک‌طرفه ۴۹۹
۹. کنترل ضوابط آیین‌نامه‌ای برای شرایط اولیه ۵۰۷
۱.۹ ترکیب بارها ۵۰۸
۲.۹ کنترل تنش ۵۰۸
۳.۹ تنش‌های مجاز ۵۰۸
۱۰. جزئیات ۵۰۹
مراجع ۵۰۹

فصل هشتم. کاربرد کامپیوتر در طراحی ساختمان‌های بتن مسلح معمولی یا پیش تنیده ۵۱۱
۱.۸ کلیات ۵۱۲
۲.۸ BIM، مدلسازی سازه و روند طراحی سازه ۵۱۲
۱.۲.۸ مدل‌های فیزیکی و تحلیلی، انتقال به فضای تحلیلی ۵۱۳
۳.۸ یکپارچه‌سازی تحلیل سازه در BIM ۵۱۷
۴.۸ تقریب در تحلیل ۵۱۸
۵.۸ مثال طراحی بر مبنای کامپیوتر ۵۲۲
۱.۵.۸ سازه ۵۲۲
۶.۸ مراجع ۵۲۷

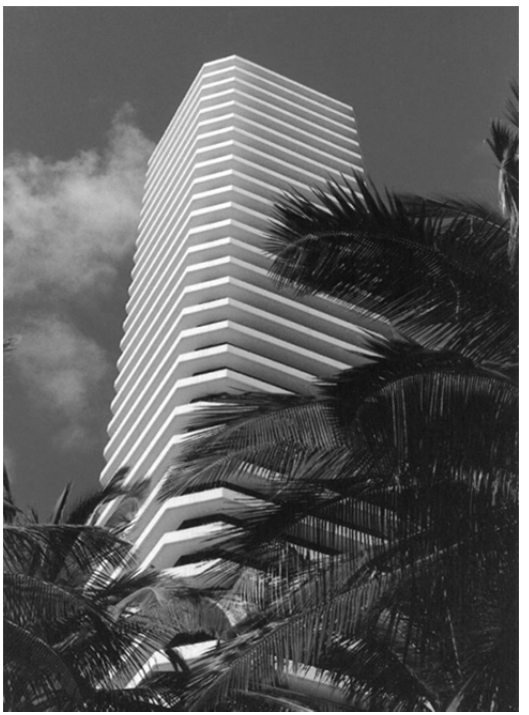
فصل نهم. پس‌تنیدگی در ساختمان‌های چند طبقه..... ۵۲۹
ساختمان چند طبقهٔ پس تنیده، سیاتل آمریکا ۵۲۹
۱.۹ تأثیرات سازه‌ای پس‌کشیدگی در ساختمان‌های چند طبقه ۵۳۰
۲.۹ تأثیر پیش‌تنیدگی روی تکیه‌گاه ستون‌ها و دیوارها ۵۳۰
۳.۹ پیش‌فشار ناشی از پس‌کشیدگی و قیود تکیه‌گاه‌ها ۵۳۲
۱.۳.۹ تأثیرات دما ۵۳۲
۲.۳.۹ پیش فشار ناشی از پیش‌تنیدگی ۵۳۲
۴.۹ مراجع ۵۳۵

فصل دهم. افت تنش در پیش‌تنیدگی ۵۳۷
۱.۱۰ کلیات ۵۳۸
۲.۱۰ توزیع تنش‌ها ۵۳۸
۳.۱۰ محاسبه افت اصطکاکی و استقرار ۵۴۱
۱.۳.۱۰ افت تنش ناشی از اصطکاک ۵۴۱
۲.۳.۱۰ ازدیاد طول ۵۴۳
۳.۳.۱۰ افت استقرار به سبب لغزش استرند ۵۴۴
۴.۱۰ تخمین افت تنش درازمدت ۵۴۵
۱.۴.۱۰ تغییر شکل ارتجاعی بتن (ES) ۵۴۵
۲.۴.۱۰ خزش بتن (CR) ۵۴۷
۳.۴.۱۰ جمع‌شدگی بتن (SH) ۵۴۸
۴.۴.۱۰ وادادگی فولاد پیش‌تنیدگی (RE) ۵۴۹
۵.۱۰ مثال‌ها ۵۵۲
۱.۵.۱۰ افت تنش اصطکاکی و درازمدت در یک دال پس‌کشیده نچسبیده ..۵۵۲
۲.۵.۱۰ افت‌های تنش اصطکاک و درازمدت یک تیر مسلح شده با پس‌تنیدگی چسبیده ۵۵۷
۶.۱۰ نمادها ۵۶۵
۷.۱۰ مراجع ۵۶۶

فصل یازدهم. مدلسازی سازه‌ای تاندون‌های پس‌کشیده ۵۶۷
۱.۱۱ الزامات مدلسازی سازه‌ای تاندون‌ها پیش‌تنیده ۵۶۸
۲.۱۱ گزینه‌های مدلسازی سازه‌ای برای تاندون‌های پیش‌تنیدگی ۵۷۰
۱.۲.۱۱ مدلسازی تاندون به صورت بار اعمالی ۵۷۰
۲.۲.۱۱ مدلسازی تاندون به صورت عضو بار مقاوم ۵۷۴
۳.۲.۱۱ ویژگی‌های مدل‌های تاندون و مقایسه آنها ۵۷۶
۴.۲.۱۱ مثال ۵۷۸
۳.۱۱ مراجع ۵۸۰

فصل دوازدهم. طراحی مقطع برای خمش ۵۸۱
۱.۱۲ نگاه اجمالی به طراحی خمشی ۵۸۱
۲.۱۲ طراحی بر مبنای سازگاری کرنش‌ها ۵۸۳
۳.۱۲ طرح خمشی بر مبنای روابط ساده شده آیین‌نامه‌ای ۵۹۷
۱.۳.۱۲ طرح خمشی ساده شده ACI318 ..... ۵۹۷
۲.۳.۱۲ طرح خمشی ساده شده EC2 ..... ۵۹۸
۴.۱۲ مراجع ۶۰۰

فصل اول
مقدمه



یک سازه پیش تنیده (برج فونیکس) در آمریکا

۱.۱ هدف و رئوس مطالب

این کتاب ما حصل بیش از ۳۰ سال تجربه در پس‌تنیدگی است که از طریق طراحی، آموزش، مشاهده و تعامل نزدیک با طراحان پس تنیده در سراسر جهان بدست آمده است. این کتاب تلاشی برای رفع ابهامات در عملیات پس تنیدگی و ارائه مفاهیم عمیق و اصول، هم در سازه‌های متداول و هم سازه های پیچیده است. سعی شده است تا از تکرار ارائه مطالب پس‌تنیدگی که در بسیاری از کتاب‌های درسی مناسب مانند کالینز و همکاران (۱۹۹۷) یا نیوی (۱۹۹۷) در دسترس است اجتناب شود و به جای آن، بر مطالبی تمرکز گردد که مهندسان به منظور ارائه یک طراحی خوب و یا ارزیابی ساختمان موجود به آن نیاز بیشتری دارند.

بر خلاف سازه‌های بتن مسلح معمولی، که در آن تعیین نیروهای طراحی و مقدار میلگردهای مربوط به این نیروها، آسان و مشخص است، طراحی موفقیت آمیز سازه پس‌تنیده نیاز به تجربه بالای طراح و دانشی فراتر از روابط کتب درسی که معمولا در دسترس عموم است، دارد. طراحان کهنه کار معمولا طراحی پس‌تنیدگی را نوعی هنر می‌دانند که به شدت با تئوری مقاومت مصالح مورد استفاده قرار گرفته در پس زمینه آن در تضاد است. طراحی پس‌تنیدگی قبل از شروع کار به فکر و اندیشه مبتنی بر تجربه نیاز دارد. این کتاب در جهت کمک به مهندس پس‌تنیده برای توسعه و تقویت دانش و تجربه خود که پیش زمینه یک طراحی خوب می‌باشد در نظر گرفته شده است.

این فصل بررسی مختصری از توسعه تاریخی پس‌تنیدگی در سازه‌ها ارائه می‌کند. **فصل دوم** تکنیک و روشهای پس‌تنیدگی با تمرکز بر سیستمها و ابزارهای رایج موجود را در کنار توجه به اقتصاد پس‌تنیدگی و تخمین مقادیر اولیه بیان می کند.

فصل سوم به تشریح مفاهیم و روش طراحی سیستم سقفهای پس‌کشیده می‌پردازد. این فصل مراحل تبدیل یک مدل سه بعدی دال سقف به نوارهای طراحی جهت طراحی سازه‌ای آن یا کنترل ضوابط آیین‌نامه‌ای را بیان می‌کند. این فصل حالت حدی بهره‌برداری[1] و حالت حدی نهایی[2] برای تعیین آرماتور لازم و سایر جزئیات را در بر می‌گیرد. روش ذکر شده در این فصل برای هر دو سیستم سازه‌های بتن مسلح معمولی و پس‌تنیده قابل کاربرد است. روش ارائه شده مبنای الگوریتمهای امروزی است که در نرم افزارهای طراحی به کار گرفته شده‌اند.

فصل چهارم مواردی که شما نیاز دارید تا به طور کامل پس‌تنیدگی را درک و در آن تبحر پیدا کنید را بررسی می‌کند. این مجموعه تلفیقی از موضوعات مختلف در هر یک از جنبه‌های مفهوم پس‌تنیدگی و طراحی است. این توضیحات جهت رفع کردن ابهاماتی است که معمولا در طراحی پس‌تنیدگی وجود دارد.

فصل پنجم ده مرحله طراحی دستی یک دال یا قاب پس‌تنیده را ارائه می‌کند.

در **فصل ششم**، مفاهیم اساسی و روش‌های ارائه شده در فصل چهارم و ده مرحله برای طراحی یک سازه سیستم پس تنیده ارائه شده در فصل پنجم را یکجا جمع‌آوری کرده است تا به شما کمک کند تا یک دال دو طرفه را به صورت دستی طراحی کنید. بر خلاف بسیاری از کتابهای درسی، که در آنها مثال ساده‌ای ارائه شده است، دالی برای فصل ششم انتخاب شده است که منعکس کننده شرایط واقع بینانه از ساخت باشد و در آن پارامترهای طراحی اغلب نه

1. Serviceability Limit State-SLS
2. Ultimate Limit State-ULS

منظم و نه ساده باشند. محاسبات دستی ارائه شده سیری در سناریوهای مختلفی است که شما به احتمال زیاد در طراحی سازه‌های واقعی با آن روبرو می‌شوید. نسخه آمریکایی کتاب بر اساس آئین‌نامه‌های ACI318، IBC [1] و همچنین آیین‌نامه اروپایی EC2[2]، با تاکید بر سیستم واحد آمریکایی می‌باشد. نسخه بین المللی کتاب (کتاب حاضر) علاوه بر آئین‌نامه‌های فوق مراحل طراحی بر اساس TR43[3] را با تاکید بر سیستم واحدهای بین المللی (SI) بیان می‌کند.

هرچند احتمالا امروزه تعداد بسیار کمی از مهندسان سقف پس تنیده را بوسیله حل دستی طراحی می‌کنند، با این حال اطلاعات فصل ششم (طراحی دستی) برای درک روند طراحی لازم می باشد. این فصل کمک می کند تا علاوه بر ایجاد مهارت لازم برای طراحی، طراحی های ارائه شده توسط روشهای خودکار صحت سنجی شوند. همچنین می‌تواند به عنوان یک مرجع مناسب برای مقایسه نتایج استخراج شده از آئین نامه‌های مختلف باشد.

در **فصل هفتم**، یک قاب را با به کارگیری رئوس مطالبی که در فصل ششم برای طراحی یک دال دو طرفه ارائه شد و بهره گیری از ۱۰ قدمی که در فصل پنجم مطرح شد را طراحی می‌کنیم. در فصل ۷، به تفاوت بین طراحی قاب و دال دو طرفه تمرکز می‌کنیم.

امروزه مهندسان کمی برای طراحی دستی سقف‌های معمولی در دفاتر مهندسی مشاور رغبت نشان می‌دهند. در سرتاسر جهان برنامه‌های کامپیوتری جایگزین طراحی دستی شده اند. **فصل هشتم**، بخشهای مدلسازی و تحلیل سقف پس تنیده به کمک طراحی خودکار نرم افزارهای تجاری موجود را پوشش می‌دهد.[4]

در اغلب نقاط دنیا، ساختمان‌های مسکونی و تجاری چند طبقه ساخته شده با سیستم پس‌تنیده دیده می‌شود. در بیشتر مواقع، مهندسان طراح هر طبقه ساختمان چند طبقه را به طور مجزا طراحی می‌کنند. تاثیر پس‌تنیدگی بر قاب‌های یک ساختمان چند طبقه در **فصل نهم** بررسی می‌شود. این فصل تغییرات در نیروهای داخلی ستون و دیوارها را به دلیل به کارگیری پس‌تنیدگی در دال طبقات بیان می‌کند و انتقال نیروی پس تنیدگی به دیوارها همراه با اثرات پس‌تنیدگی در جمع شدگی سقف را ارائه می‌کند.[5]

اتلاف تنش در کابل‌های پس تنیده و مقدار مجاز آن از اصول اولیه در طراحی اعضای پس‌تنیده است. **فصل دهم** منابع اتلاف نیروی پس‌تنیدگی و روند محاسبه آنها را ارائه می‌کند. چندین مثال عددی برای توضیح نحوه کاربرد آن ارائه شده است.

بررسی رفتار کابل‌های پس‌تنیده در طراحی و آنالیز سازه بطور وسیعی گسترش یافته است، از روش ساده بار متوازن که در اوایل دهه ۱۹۶۰ ارائه شده است تا مدلهای تحلیل روش اجزاء محدود که یک جهش در مدلسازی و تحلیل پس‌تنیدگی می‌باشد. **فصل یازدهم** یک تاریخچه کوتاه از مراحل پیشرفت در مدلسازی و تحلیل پس‌تنیدگی را ارائه می‌کند.

طراحی یک عضو برای خمش از گامهای معمول در طراحیهای پس‌تنیدگی می‌باشد. برای تکمیل شدن کار **فصل دوازدهم** به طراحی یک عضو پس‌تنیده تحت خمش می‌پردازد و جنبه‌های مختلف طراحی در اجرا را پوشش می‌دهد.

---

1. ACI 318-11,14; International Building Code (IBC,2012)
2. EC2 EN 1992-1-1;2004
3. TR43, 2005
4. Builder-ADAPT Floor Pro, www.adaptsoft.com

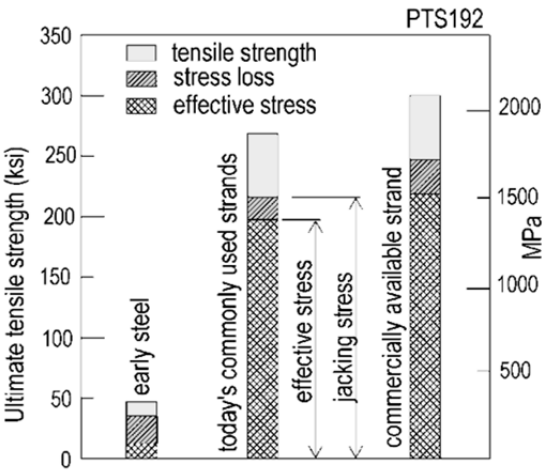
۵. تاثیرات جمع شدگی و کاهش اثرات نامطلوب آن با جزییات کافی در ADAPT TN241 و ADAPT TN242 ارائه شده است.

۲.۱. تاریخچه مختصر از پس تنیدگی در صنعت ساخت

به طور ساده پیش‌تنیدگی اعمال بار برای ایجاد فشار و خمش در اعضای بتنی می‌باشد. معمولا پیش‌تنیدگی در خلاف جهت لنگر و تنشهای کششی ناشی از سایر بارها عمل می‌کند. اصول پیش تنیدگی ساده است و در بخش ۱.۲ تشریح شده است. مختصری از گسترش تاریخی پیش تنیدگی در صنعت ساخت در مرجع (اعلامی ۲۰۰۷) ارائه شده است.

الف. تلاشهای اولیه: در سال ۱۸۷۲ جکسون مهندس اهل سانفرانسیسکو حق ثبت اختراع برای پیش‌تنیدگی را دریافت کرد. او میلگردهای فولادی را داخل مصالح بنایی قرار داد و به کمک رزوه میلگرد آن را تحت تنش قرار داد. اعمال نیروی متمرکز به درستی صورت گرفت، اما به دلیل خاصیت فولادهای موجود در آن زمان، این نیروها در دراز مدت تنزل یافتند. تلاش او بوسیله دوارینگ در سال ۱۸۸۸ در آلمان ادامه یافت. وی حق ثبت اختراع برای تنیده کردن دالها به کمک سیمهای فولادی را بدست آورد. به دلیل اینکه فولادهای اولیه تنش تسلیم نسبتا پایینی دارند (شکل ۲.۱ الف–۱)، هیچکدام از این تلاشهای اولیه موفق نبودند. نیروی اولیه کم جکها در کنار خزش و جمع شدگی بالای بتن، سبب استهلاک بیشتر نیروی پیش تنیدگی اعمالی به سازه می‌شد.

یک افزایش قابل توجه در تنش موثر استرندهای پیش‌تنیدگی بعد از همه اتلافها، اولین مرحله مهم در اجرائی کردن پیش‌تنیدگی بود. شکل ۲.۱ الف–۱ تنش موثر استرندهای مورد استفاده امروزی را نسبت به فولادهای اولیه نشان می‌دهد. همچنین در این شکل استرندهای با مقاومت بالاتر که به تدریج در صنعت ساختمان جای استرندهای موجود را می‌گیرند نیز ارائه شده است.



شکل ۲.۱ الف–۱ مقاومت فولاد و افتهای پیش تنیدگی

ب. ابزارهای عملی: از سال ۱۹۲۶ تا ۱۹۲۸، در فرانسه، فرسینه تاثیر افت تنش درازمدت در پیش تنیدگی را شناسایی کرد و فولادهای با مقاومت بالای جدید را با موفقیت در اعضای پیش‌تنیدگی به کار برد. در سال ۱۹۴۰، او سیستم مشهور و پذیرفته شده فرسینه را معرفی کرد، که شامل گوه

مخروطی برای تاندون ۱۲ رشته بود (شکل ۲.۱ ب-۱). توسعه فولادهای پر مقاومت، در کنار ابزارهای اعمال پیش تنیدگی اختراع شده، یک نقطه عطف دیگر در کاربرد موثر پیش تنیدگی ایجاد کرد. هر چند بسیاری از مهندسین متبحر، شامل منگل در بلژیک، گوین در فرانسه، لئونهارت در آلمان و میخایلف در روسیه توسعه تکنولوژی پیش‌تنیدگی را ادامه دادند و عمده تمرکز فعالیتهای پیش‌تنیدگی در سازه‌های خاص و پلها بوده است، اما توسعه دهندگان اولیه توجه کمی به استفاده از تکنیک پیش‌تنیدگی در صنعت ساختمان داشته‌اند.

(الف) نمای گوه و مخروط داخلی

(ب) شکل گیره سر هم بندی شده

شکل ۲.۱ ب-۱ گیره اولیه فرسینه (Freyssinet)

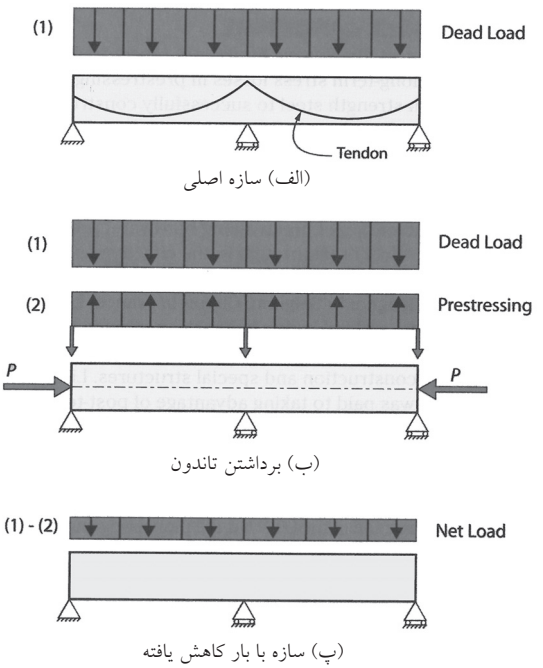
پ. ساختمان‌های پیش تنیده: از سالهای اولیه ۱۹۵۰ و با معرفی روش ساخت دال بالا رونده در آمریکا، استفاده مهندسین از پیش تنیدگی در جهت حذف ترکها و کاهش خیز دالهای تخت سبک در ساختمان‌ها شروع گردید. هر چند معرفی پیش تنیدگی توسط مخترعین آن دوره صورت گرفت، اما ابزار طراحی اصلی برای کاربرد پیش تنیدگی توسط لین (۱۹۶۳) به کمک مفهوم "بار متوازن" معرفی شد. در شکل اولیه آن، بار متوازن به مهندس محاسب اجازه می‌دهد که تاثیر پیش تنیدگی را در کاهش بارهای مرده وارد بر دال مشاهده کند - یک شرایط طراحی که مهندس به خوبی آن را درک می‌کند و می‌تواند به کار ببرد - (شکل ۲.۱ پ-۱). اقتصادی بودن پیش تنیدگی و ساده بودن روش بار متوازن به مهندسان پیشرو و پیمانکاران اجازه داد تا صنعت پیش تنیدگی را در آمریکا گسترش دهند.

روش بار متوازن با جزئیات در بخش ۱.۸.۴ ب توضیح داده شده است. به بیان ساده، در این روش فرض بر آن است که می‌توان بار محوری و اثرات خمش ناشی از پیش تنیدگی در عضو را جداگانه تحلیل کرد و سپس با اصل بر هم نهی نتایج را با هم ادغام کرد. به عبارت دیگر فرض می‌شود نیروی تاندون در تمام طول آن ثابت است. با مراجعه به شکل ۲.۱ پ-۱، قسمت (الف) شکل یک عضو با ضخامت ثابت که بار مرده ثابت (۱) به آن دارد می‌شود و به کمک یک تاندون پیوسته پیش تنیده شده است را نشان می‌دهد. در قسمت (ب) شکل تاندون از داخل عضو برداشته شده است و با بار معادل (۲) جایگزین شده است. بار معادل مساوی نیرویی است که توسط تاندون هنگامی که داخل عضو بوده است به آن وارد می‌شود. در قسمت (پ) تفاضل بار

(۱) و (۲)، بار کاهش یافته‌ای است که مبنای طراحی عضو به کمک روشهای سنتی می‌شود. قابل ذکر است که نیروی محوری P نشان داده شده در قسمت (ب) شکل سبب ایجاد یک فشار یکنواخت در طول عضو می‌شود که می‌تواند به اثرات خمش اضافه شود تا تحلیل تنش به پایان رسد.

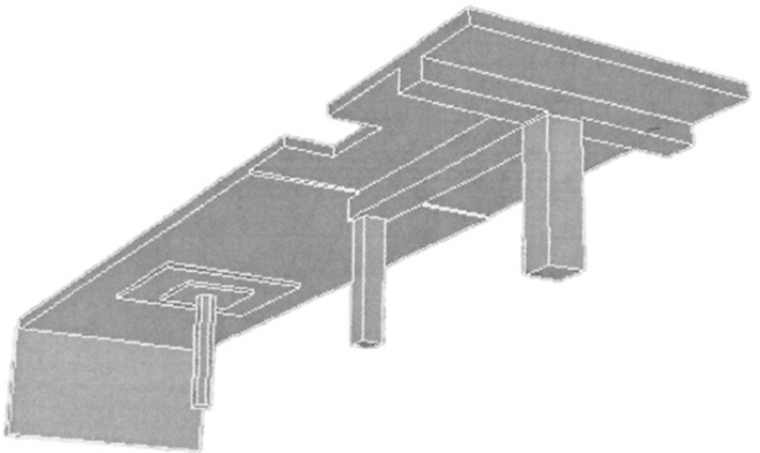
یکی از بزرگترین اشکالات روش بار متوازن ساده توضیح داده شده در قسمت فوق، محدودیت آن در دالهای با ضخامت ثابت می‌باشد. دالهای واقعی دارای ضخامت‌های متفاوتی هستند و می‌توانند در ترازهای مختلفی ایجاد شوند و یا سازه‌های تیر و دال، سبب نقض فرض اولیه روش بار متوازن می‌شوند. شکل ۲.۱ پ-۲ یک نوار طراحی از یک دال را نشان می‌دهد که محور مرکزی عضو در طول آن تغییر می‌کند و سبب ناکارآمدی روش بار متوازن ساده می‌شود.

"بار متوازن تعمیم یافته" توسط اعلامی (۱۹۹۰) معرفی شد و با جزییات کامل در فصل چهارم ارائه شده است و این روش را برای سیستم‌های دال متداول قابل استفاده می‌کند. به طور خلاصه، روش بار متوازن تعمیم یافته تحلیل اعضای پیش تنیده، هنگامی که فاصله بین نیروی فشاری و محور مرکزی عضو ثابت نیست را مقدور می‌سازد. در واقع، روش بار متوازن تعمیم یافته در کنار سایر ویژگی‌هایش، تحلیل اعضای پیش تنیده با ضخامت متفاوت را ارائه می‌دهد.



شکل ۲.۱ پ-۱ روش بار متوازن ساده شده و اثر پیش تنیدگی در کاهش بار مرده

شکل ۲.۱ پ-۳، قسمت (الف) یک عضو پیش تنیده با ضخامت غیر یکنواخت را نشان می‌دهد. درقسمت (ب) فرض می‌شود تاندون از داخل عضو برداشته شده و به وسیله بار معادل که شامل یک بار گسترده به سمت بالا و نیروی محوری متمرکز در دو انتهای عضو است جایگزین می‌شود. به دلیل ناهم راستایی نیروهای محوری، لنگر اضافی نیز در تیر ایجاد می‌گردد.



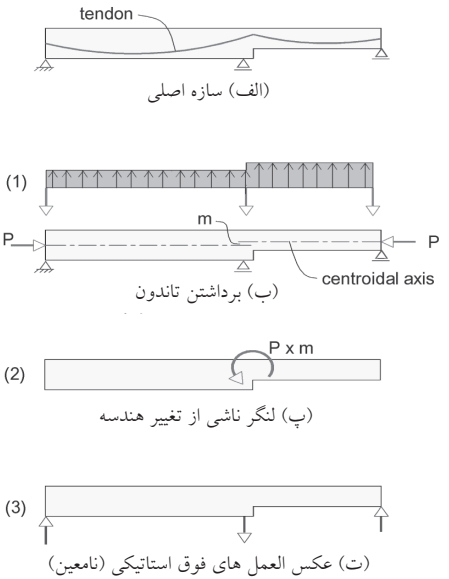
شکل ۲.۱ پ-۲ نمای یک نوار طراحی بدون هندسه یکنواخت

در قسمت (ج)، جهت جدا کردن اثرات نیروی محوری و خمش، یک لنگر در محل تغییر هندسه (ایجاد پله در ضخامت عضو) قرار داده می‌شود. در قسمت (د) اثر نیروهای قائم ناشی از هندسه تاندون (۱) و لنگرهای ایجاد شده در محل تغییر ضخامت عضو (۲) در عکس العمل‌های تکیه‌گاهی (۳) نشان داده شده است.

قابل ذکر است که نیروهای متمرکز ناشی از تاندونها در کنار ایجاد لنگر در محل تغییر ضخامت عضو، سبب تغییر عکس‌العملهای تکیه گاهی (۳) نیز می‌گردد. روش فوق و مفاهیم آن با جزئیات بیشتر در فصل ۴ ارائه شده است.

ت. ابزارهای طراحی اولیه، جزئیات و روشها: ارائه کامپیوترهای شخصی در دهه ۱۹۸۰ سبب گسترش نسل اول نرم افزارها گردید که به تبعیت از محاسبات دستی بر پایه جدا کردن نوارهای طراحی بنا نهاده شد که جزئیات آن در فصل سوم بیان شده است. گستردگی، در دسترس بودن و راحتی استفاده از اینگونه نرم افزارهای تحلیل و طراحی، مانند ADAPT-PT[1] و PT data[2] سبب رشد سریع اجرای ساختمان‌های پیش تنیده گردید.

1. ADAPT-PT www.adaptsoft.com
2. Structural Data Incorporated, Huntington Beach CA



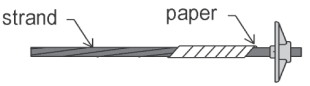
شکل ۲.۱ پ-۳ تشریح روش بار متوازن تعمیم یافته

دانش و ابزارهای محاسباتی و اجرائی با معرفی تاندونهای تک استرنده و ادوات مورد نیاز برای کشش و مهار آن که یک مورد ضروری برای اجرای دالهای باریک می‌باشد توسط ادوارد موسس شرکت پیش تنیدگی اطلس، تقویت گردید. سایر عوامل مهم گسترش استفاده از پیش تنیدگی، توسعه تاندونهای روکش دار، ایجاد موسسه پس تنیدگی PTI توسط کلیفرد و سمینارهای آموزشی فراوان و چاپ کتابهای راهنما در خصوص طراحی و اجرای ساختمانهای پیش تنیده بوده است.

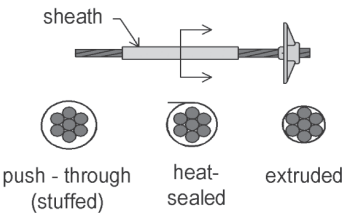
شکل۲.۱ ت-۱ توسعه تاندونهای نچسبیده تک استرند را در آمریکا نشان می‌دهد و شکل ۲.۱ ت-۲ یک ست گیره روکش‌دار مدرن را با ویژگی ضد خوردگی نشان می‌دهد.

ث. ابزارهای طراحی مدرن و یکپارچه با BIM : اتوماسیون روند طراحی، از فرضیات تا ساخت، با توسعه BIM (مدلسازی اطلاعات ساختمان) به اوج خود رسید. همانگونه که در فصل ۸ شرح داده شده است، BIM تلاش می‌کند تا کل طراحی و ساخت را در یک روند یک پارچه پیاده سازی کند و توانائی تبادل اطلاعات را بین رویه‌های مختلف برقرار کند.

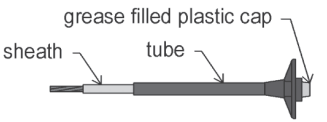
BIM یک چالش بزرگ در یکپارچه سازی کار مهندسین ساخت می‌باشد. استخراج اطلاعات از یک مدل سازه‌ای سه بعدی (شکل ۲.۱ ث-۱) و ایجاد یک مدل تحلیلی ایده‌آل سازی شده (شکل ۲.۱ ث-۲) و سپس تحلیل و طراحی آن و در نهایت انتقال اطلاعات به مدل سه بعدی، کاری سخت و دشوار است. پیشرفت‌های اخیر در مهندسی سازه و تکنولوژی نرم افزارها این چالش را برطرف ساخته است و با موفقیت موانع موجود در این راه را که در فصل ۸ ذکر شده است را حل می‌کند.



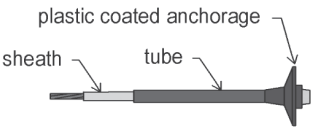
(الف) کاغذ پیچ شده ۱۹۷۰-۱۹۵۵



(ب) انواع روکش پلاستیکی ۱۹۶۰- تاکنون



(پ) پوشش دار- سیستم توصیه شده PTI, 1985



(ت) تاندون عایق شده الکتریکی

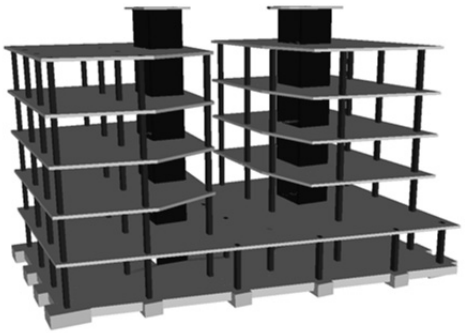
سیر تکامل تاندون چسبیده

شکل ۲.۱ ت-۱ توسعه تاندون نچسبیده تک استرند در آمریکا

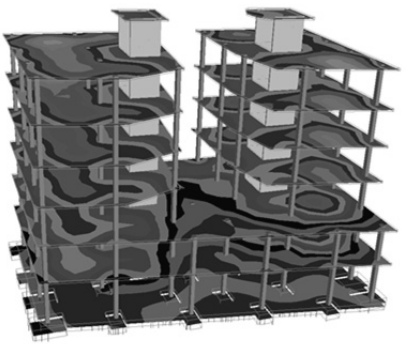
مدلسازی و طراحی یکپارچه کل سازه توسط BIM یک انتخاب مناسب در ساخت و سازه‌های بزرگ است. برای طراحی دالهای پیش تنیده و تیرها، ابزارهای طراحی بر مبنای نوارهای طراحی جدا شده همچنان مورد استفاده واقع می‌شود. همانگونه که در فصل ۳ توضیح داده خواهد شد، بر خلاف سازه‌های بتنی سنتی، در سازه‌های پیش تنیده، برای رسیدن به نقطه بهینه، تجربیات و دانش مهندس طراح نقش مهمی را بازی می‌کند. این روزها، نرم افزارهای محاسباتی براساس نوارهای طراحی که در شکل ۲.۱ ث-۲ نشان داده شده است می‌تواند عمل بهینه سازی را انجام دهد که این امکان در ابزارهای سه بعدی یک پارچه موجود نیست.

شکل ۲.۱ ت-۲ نمونه‌ای از گیره‌های تک استرند پوشش دار ضد خوردگی

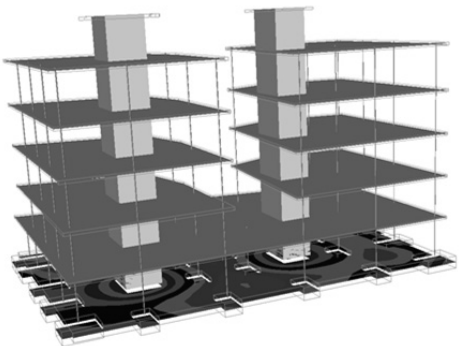
الف – مدل فیزیکی سازه (Edge)



ب- مدل تحلیلی سازه (Revit)



ج- تغییر شکل سازه و فونداسیون (Edge)



د- توزیع فشار خاک ناشی از تحلیل کل سازه (Edge)

شکل ۲.۱ ث-۱ ساختمان چند طبقه و مدل تحلیلی آن